

Programa Ambiente, Alterações Climáticas e Economia de Baixo Carbono

'Programa Ambiente'

Espaço Económico Europeu (EEA) Mecanismo Financeiro 2014-2021

07_Call#2_CircularBuild – Desenvolvimento e Validação do Conceito de Circularidade Aplicada à Construção Pré-Fabricada Modular

Accordingly, with the Articles 25.2.j) and 29.4 of the 'Applicants Guide for Financing of Projects Supported by Environment, Climate Change and Low Carbon Economy Programme'

https://www.eeagrants.gov.pt/media/2994/applicants-guide-for-financing-eea-grants_environment-projects_28112019.pdf

ATIVIDADE A.4 - Construção “CircularBuild”

D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real

Ficha Técnica

Autoria:

Armando Pinto, Investigador Principal, LNEC

Rafaela Mateus, Bolseira Doutoramento, LNEC

Mariana Neto, Bolseira Doutoramento, LNEC

Ricardo Nóbrega, Acolhimento, LNEC

Bruno Marques, Acolhimento, LNEC

Pedro Silva, Acolhimento, LNEC

Diogo Vilela, Acolhimento, LNEC

Lisboa, 2023-03-31

Resumo

O Projeto “CircularBuild – Desenvolvimento e Validação do Conceito de Circularidade Aplicada à Construção Pré-fabricada Modular”, visa a investigação de materiais alternativos para os painéis que viabilizem a completa circularidade do sistema construtivo Pré-fabricado Modular CircularBuild, reduzindo o consumo de recursos e a produção de resíduos, potencializando o reaproveitamento dos componentes, e contribuindo para o novo paradigma de “Edifícios Carbono Zero”. O sistema construtivo pré-fabricado Modular CircularBuild encontra-se descrito sucintamente, no entregável D1.1.

O Projeto CircularBuild, financiado pelos EEA Grants e operado pela Secretaria-Geral do Ambiente e Ação Climática, ao abrigo do Programa Ambiente, apresenta as seguintes seis atividades:

- **Atividade 1** – Estudo e Definição das Exigências Funcionais de Materiais Alternativos;
- **Atividade 2** – Preparação de Amostras e Validação Industrial;
- **Atividade 3** – Ensaios de Validação Funcional – Âmbito Laboratorial;
- **Atividade 4** – “Construção Piloto” CircularBuild;
- **Atividade 5** – Promoção e Disseminação de Resultados;
- **Atividade 6** – Gestão do Projeto.

Este documento da Atividade 4 resume os resultados da tarefa **“T4.4 – Realização de Ensaios em Condições Reais de Utilização”** do protótipo instalado no LNEC e constitui o entregável **“D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real”**.

Índice

Ficha Técnica	ii
Resumo.....	iii
Índice.....	iv
1. Introdução	5
1.1. Aspetos Gerais.....	5
1.2. Campo de Aplicação Solução Construtiva CircularBuild	6
1.3. Metodologia	8
2. Caso de Estudo – Protótipo Instalado no Campus do LNEC.....	9
2.1. Características Dimensionais da Envolvente e Clima	9
2.2. Envolvente Opaca.....	12
2.3. Envolvente Envidraçada	17
2.4. Sistema de ventilação	18
3. Avaliação do Desempenho Térmico e da Eficiência Energética.....	19
3.1. Aspetos Gerais.....	19
3.2. Requisitos Mínimos de Desempenho Energético Aplicáveis à Envolvente dos Edifícios	21
3.3. Requisitos Relativos aos Sistemas Técnicos	21
3.4. Requisitos de Conforto Térmico e de Desempenho Energético	21
3.5. Coeficiente Global de Perdas Térmicas da Construção.....	23
3.6. Inércia Térmica	25
3.7. Outros.....	26
4. Avaliação da Permeabilidade ao Ar.....	27
5. Avaliação Experimental do Coeficiente Global de Perdas Térmicas.....	29
Conclusões	32
Bibliografia	33
Assinaturas	34

1. Introdução

1.1. Aspetos Gerais

No âmbito da Atividade “A4 - Construção “CircularBuild” – Avaliação protótipo escala real” encontram-se previstas as seguintes avaliações:

- T4.1 – Elaboração do Projeto com Metodologia BIM;
- T4.2 – Fabrico e Instalação Piloto “CircularBuild”;
- T4.3 – Demonstração e Validação da Circularidade – Reconfiguração;
- **T4.4 – Realização de Ensaios em Condições Reais de Utilização;**
- T4.5 – Elaboração de ACV e Validação de Resultados (Ambientais, Económicos e Sociais);

A “**Atividade 4 – “Construção Piloto” CircularBuild**”, é composta por 7 entregáveis, tal como apresentado abaixo, sendo alvo deste documento o entregável “**D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real**”:

- D4.1 – Projeto BIM;
- D4.2 – Construção Piloto “CircularBuild”;
- **D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real;**
- D4.4 – Construção de Novos Painéis com Base em Materiais Reaproveitados;
- D4.5 – Construção de Novo Módulo Feito Apenas de Painéis;
- D4.6 – Ausência de Resíduos do Processo de Construção;
- D4.7 – Resultados da Avaliação AVC e LEVELS.

Este documento apresenta os resultados dos Ensaios em Condições Reais de Utilização realizados no protótipo CircularBuild instalado no campus do LNEC e constitui o entregável “**D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real**”.

1.2. Campo de Aplicação Solução Construtiva CircularBuild

O Sistema Construtivo CircularBuild, no âmbito do projeto, financiado pelos EEA Grants, destina-se ao desenvolvimento e qualificação de:

- Construção de edifícios habitacionais de 1 a 2 pisos, para aplicação em todo o território nacional continental português e regiões autónomas dos Açores e da Madeira, como todas as zonas para as quais não sejam excedidas as características de desempenho declaradas do sistema e compatíveis com tal uso;
- O sistema poderá contemplar a construção de edifícios com outras tipologias de construção desde que as características de desempenho declaradas sejam compatíveis com tal uso;
- Os edifícios assentes na solução construtiva CircularBuild, poderão corresponder a uma habitação isolada, um conjunto de habitações em banda ou habitações de dois fogos de um piso sobrepostas;
- As construções poderão ser edificadas sobre uma estrutura metálica, do tipo estacaria ou HEB ou sobre fundações em betão, proporcionando um desvão ventilado sobre o pavimento e sem contacto direto da solução construtiva com o solo;
- Para a cobertura, encontra-se prevista uma solução de cobertura plana não acessível;
- A solução construtiva CircularBuild, apresenta disponível na sua modularidade, a adoção de painéis de parede com 0.945m de largura e 2.5m ou 3.0m de altura, de acordo com as necessidades programáticas do espaço a edificar;
- Os painéis de piso/piso intermédio/cobertura, apresentam disponível, a adoção de painéis com 0.945m de largura e 3.0m, 4.0m, 5.0m e 6.0m de comprimento, permitindo vãos com as dimensões referidas, ou múltiplos do dessa mesma medição, de acordo com as necessidades programáticas do espaço a edificar;
- Encontram-se previstas soluções específicas para a integração das infraestruturas técnicas, elétricas, monitorização, sensorização, domótica e hidráulicas, através da realização standard de negativos maquinados aquando da maquinaria dos painéis em unidade industrial;
- A solução adotada para a realização da ventilação dos espaços construídos é realizada através da integração de sistemas de ventilação forçada, com recuperador de calor, com e sem condutas;

- A Solução Construtiva CircularBuild, autoportante, não carece de uma estrutura específica (tradicional), uma vez que a resistência do conjunto edificado é conferida pela ligação mecânica entre painéis, através da estrutura em alumínio integrada na constituição dos painéis;
- O encaixe entre painéis é realizado através do perfil UNUS L (NZ.644.009), que envolve as laterais dos painéis, com a aplicação do perfil de madeira entre dois perfis UNUS L (NZ.644.009), ficando o sistema travado e obrigando os painéis a manterem-se ligados e fixados entre si;
- O revestimento de paredes em cozinhas e instalações sanitárias carecerá da solução existente no mercado, como do definido para o local, podendo ser cerâmico, vidro, etc;
- O revestimento aplicado sobre o pavimento, poderá ser flutuante cerâmico, etc;
- Para cada edificação, são realizados pela CONCEXEC, projetos detalhados, de planeamento destinado ao processo de produção industrial, os painéis adotados e os negativos a introduzir em cada painel, de modo a permitir a execução de uma construção sustentável e que obedeça aos princípios da economia circular;



Figura 1. Exemplos de plantas de habitações CircularBuild.

O preenchimento dos painéis de parede standard é constituído por:

Solução Construtiva CircularBuild:

- 1. Reboco Armado Interior 4mm
- 2. AGEPAN DWD Protect 16mm
- 3. XPS 100mm
- 4. XPS 50mm
- 5. Estrutura em Alumínio (EN AW6060 T5)
- 6. AGEPAN DWD Protect 16mm
- 7. Aglomerado de Cortiça 40mm
- 8. Reboco Armado Exterior NEUCE 4mm

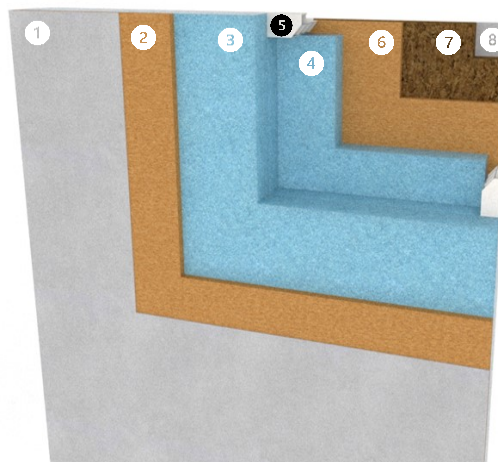


Figura 2. Representação Gráfica da Solução Construtiva.

1.3. Metodologia

A avaliação do desempenho em condições reais da construção CircularBuild compreendeu a realização de Ensaio no protótipo instalado no campus do LNEC e foi constituída pelas seguintes tarefas:

- i) Avaliação por cálculo do desempenho térmico e energético do sistema Construtivo CircularBuild, aplicado ao protótipo (SCE, 2020);
- ii) Avaliação do comportamento passivo (Pinto e Fragoso, 2018), encontra-se em curso ao longo de 6 meses;
- iii) Realização de ensaio de pressurização para avaliar a permeabilidade ao ar do protótipo (EN ISO 9972, 2015);
- iv) Ensaio para avaliar em condições reais o coeficiente global das perdas térmicas (EN 17888-2 (draft), 2022).

A avaliação do desempenho energético destina-se a estudar a conformidade do sistema construtivo com os requisitos de edifícios com necessidades de energia quase nulas (NZEB) aplicáveis à construção nova (SCE, 2020). Para avaliar o comportamento passivo da construção adotaram-se os critérios adotados no estudo (Pinto e Rui Fragoso, 2018), nomeadamente a percentagem de tempo fora da zona de conforto térmico.

2. Caso de Estudo – Protótipo Instalado no Campus do LNEC

2.1. Características Dimensionais da Envolvente e Clima

O protótipo CircularBuild sobre a qual incide esta avaliação foi inicialmente utilizada no ensaio sísmico e posteriormente foi desmontada, transportada e instalada no campus do LNEC e completada com os revestimentos e caixilharia, Figura 2, Figura 3, Figura 4 e

Figura 5 onde são apresentadas as peças desenhadas referentes às plantas, cortes e alçados do protótipo.

O protótipo tem as características geométricas resumidas no Quadro 1, apresentando um fator de forma elevado (construção pouco compacta) e uma elevada fração envidraçada por unidade de área de pavimento (31%), predominantemente exposta a sul (2 janelas) e uma janela exposta a poente. Existem 85 m de pontes térmicas lineares na construção. A construção CircularBuild não tem pontes térmicas planas. O protótipo encontra-se apoiada sobre uma estrutura de aço, tendo por baixo do pavimento o ar exterior.

Quadro 1. Protótipo – Características geométricas.

Elemento	Valor
Área de parede	55.6 m ²
Área de cobertura	10.2 m ²
Área de pavimento	10.2 m ²
Área envidraçada	6.3 m ²
Área da porta	2.1 m ²
Área total da envolvente	84.4 m²
Área útil de pavimento	20.3 m²
Volume interior útil	50.8 m³
FF (área envolvente/ volume interior)	1.7 m⁻¹
Área envidraçada / Área útil	31%
Pontes térmicas lineares	85 m



Figura 2. Protótipo CircularBuild no campus do LNEC.

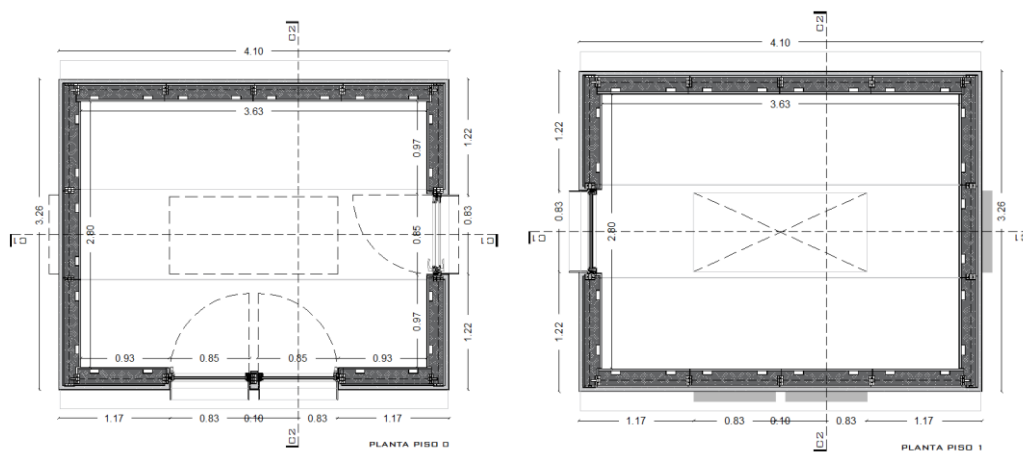


Figura 3. Protótipo – Plantas.

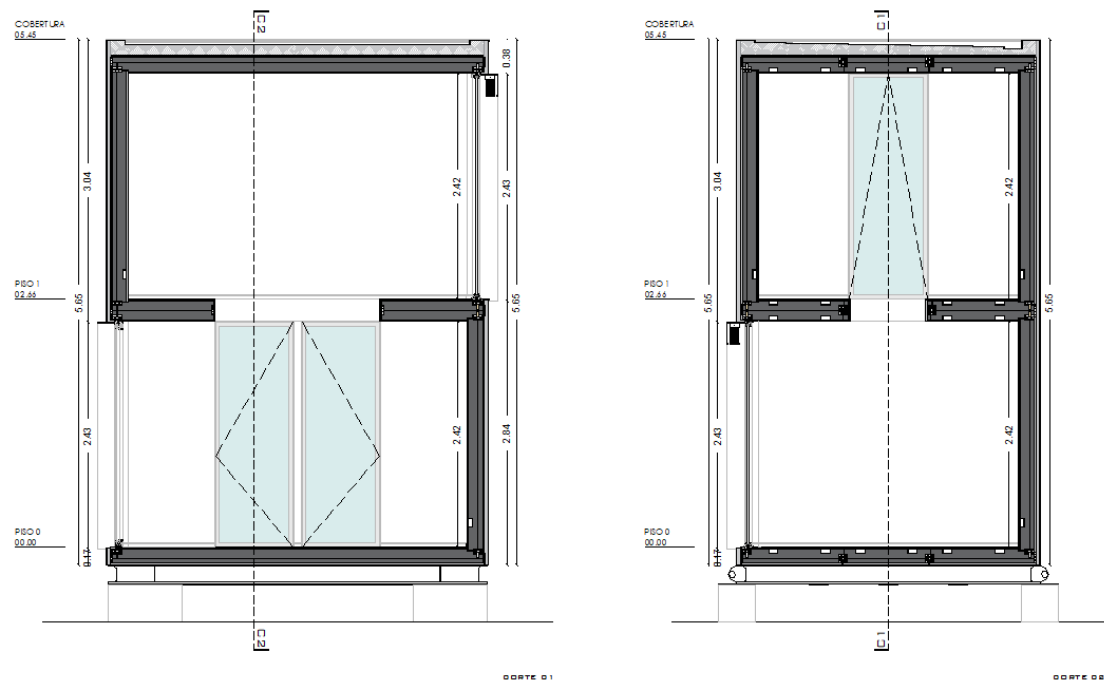


Figura 4. Protótipo - Cortes verticais.

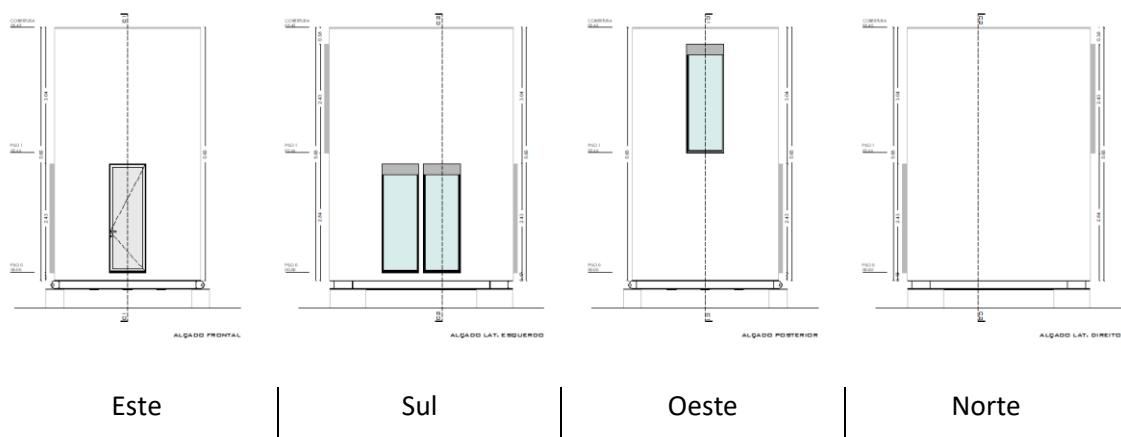


Figura 5 - Protótipo – Alçados.

A célula situa-se no campus do LNEC, pertencendo à zona Climática I1 e V2, com 1056 graus-dias de aquecimento, uma temperatura média no mês mais frio de 10.8 °C e uma temperatura média no verão de 21.8 °C, como se indica seguidamente:

Graus-dia	1,056		
Zona Climática de Inverno	I1	Zona Climática de Verão	V2
Temperatura Média Exterior Inverno (°C)	10.8	Temperatura Média Exterior Verão (°C)	21.8
Duração da estação de aquecimento (meses)	5.3	Duração da estação de arrefecimento (meses)	4.0

2.2. Envolvente Opaca

Na construção da célula são utilizados os painéis CircularBuild para as paredes, teto e cobertura. A caracterização térmica dos painéis é realizada no relatório (Pinto e Mateus, 2023). O Painel de Parede Exterior Standard possui uma espessura de 230 mm, uma largura de 945 mm e uma altura de 2500 mm. O Painel de Piso Standard apresenta uma espessura de 182 mm, uma largura de 945 mm e um comprimento de 3084 mm (considerando em análise o caso de 3 Módulos). Estes painéis são ligados entre si através de perfis de alumínio e perfil de travamento de madeira, sem ser necessária qualquer outra estrutura reticular, e são reforçados no centro do aro exterior com um quadro de reforço de alumínio, no caso dos painéis de parede, e com uma viga de madeira lamelada, no caso dos painéis de piso.

As zonas homogêneas dos painéis são constituídas pelas camadas identificadas no Quadro 2, Figura 6, Figura 7, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e Figura 8.

Quadro 2. Camadas das zonas homogêneas dos painéis de parede, cobertura e pavimento.

Material	Parede	Cobertura	Pavimento
Revestimento NEUCE de 4 mm no interior	X	X	X
DWD Protect 16 mm	X	X	X
XPS 100 mm	X	X	X
XPS 50 mm	X	X	X
DWD Protect 16 mm	X	X	X
Aglomerado de cortiça 40 mm	X		
DWD Protect 16 mm		X	
XPS 100 mm		X	
Revestimento NEUCE de 4 mm no exterior	X		X

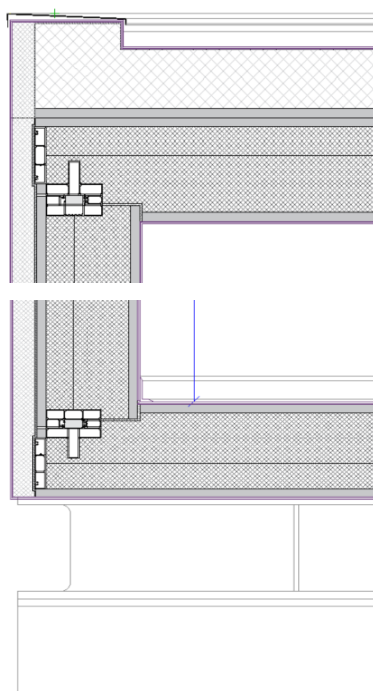


Figura 6. Composição das soluções de parede, cobertura e pavimento.

As características dos materiais encontram-se no Quadro 3, enquanto o coeficiente de transmissão térmica dos painéis (U) se encontra no Quadro 4 e o valor do coeficiente de transmissão térmica linear (Y) no Quadro 5.

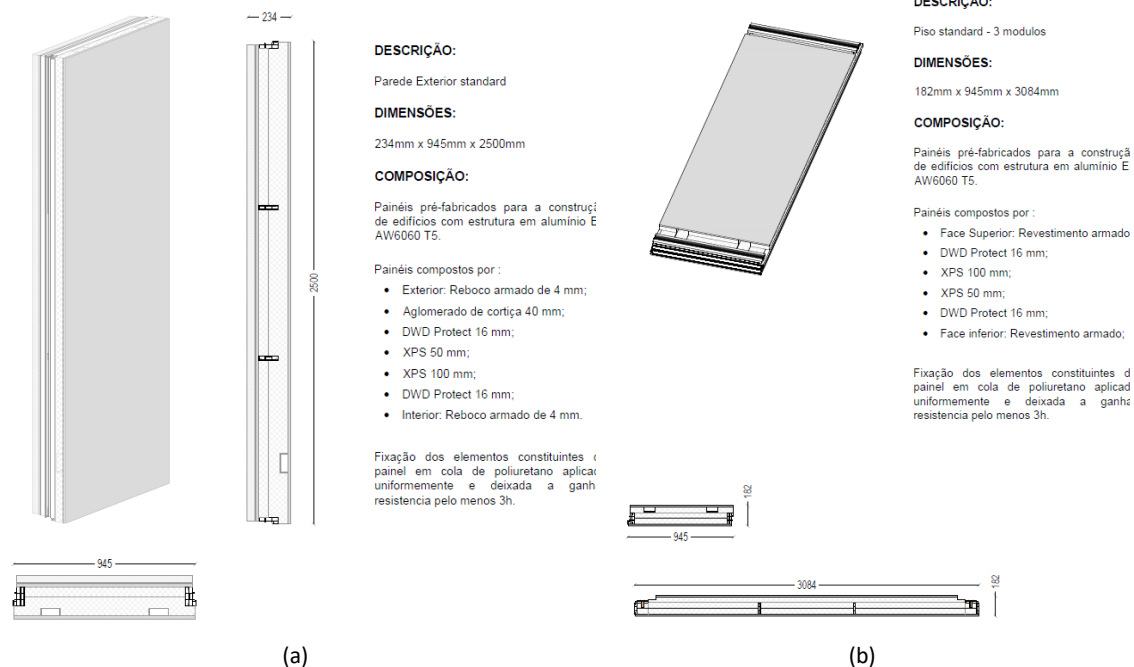


Figura 7. Representação dos painéis de parede exterior standard (a) e de piso standard (b) (Fonte: fabricante).

- 1. Reboco Armado Interior 4mm
- 2. AGEPAN DWD Protect 16mm
- 3. XPS 100mm
- 4. XPS 50mm
- 5. Estrutura em Alumínio (EN AW6060 T5)
- 6. AGEPAN DWD Protect 16mm
- 7. Aglomerado de Cortiça 40mm
- 8. Reboco Armado Exterior NEUCE 4mm

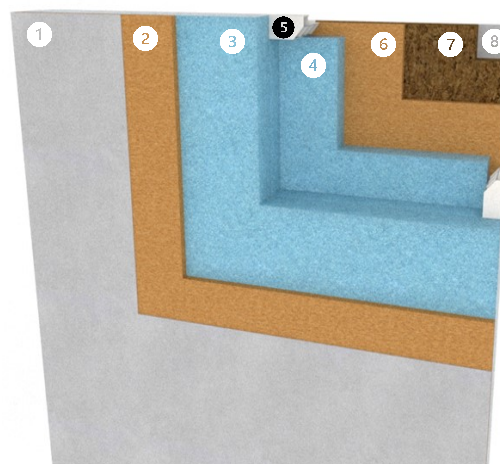


Figura 9. Representação Gráfica da Solução Construtiva (Fonte: fabricante).

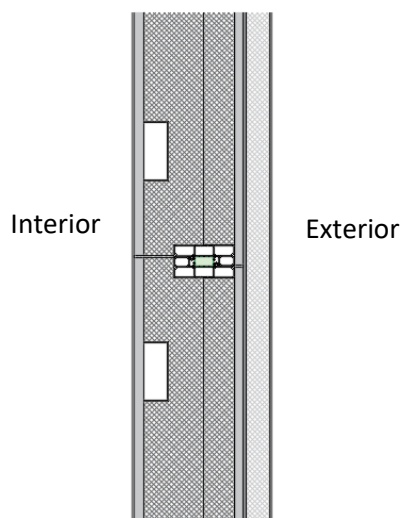


Figura 8. Pormenor de ligação do Painele de Parede Exterior Standard (Fonte: fabricante).

Quadro 3. Características técnicas dos principais materiais dos painéis.

Material	Espessura (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)
Argamassa Armada NEUCE (Exterior)	4	1000	0,200	1000
Aglomerado de Cortiça Expandida (ICB)	40	230	0,040	1560
Agepan DWD Protect 16 mm	16	565	0,090	2100
Poliestireno Extrudido - XPS 50	50	230	0,035	1450
Poliestireno Extrudido - XPS 100	100	230	0,037	1450
Reboco Delgado Armado NEUCE (Interior)	4	1000	0,200	1000

*Valores baseados nas informações dos fabricantes, contudo não foi disponibilizada a ficha técnica

Quadro 4. Valor do coeficiente de transmissão térmica equivalente dos Painéis CircularBuild [W/(m².K)].

Painéis	CircularBuild	Valores de referência (SCE, 2021)		
	U _{d,s}	Zona I1	Zona I2	Zona I3
Parede exterior standard	0.195	0.50	0.40	0.35
Pavimento standard	0.240	0.40	0.35	0.30
Cobertura standard	0.193	0.40	0.35	0.30

Quadro 5. Valor do coeficiente de transmissão térmica linear da solução CircularBuild.

Pormenor	Ligação	Y [W/(m.K)]	
		CircularBuild	Valores de referência (SCE, 2021)
1	Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido	0.00042	0.50
2	Fachada com pavimento de nível intermédio	0.057	0.50
3	Piso com a parede de frações independentes	0.17	0.50
4	Fachada com a cobertura	0.0045	0.60
5	Cobertura com a parede de frações independentes	0.076	0.60
6	Duas paredes verticais em ângulo saliente (corte II)	0.018	0.40
7	Fachada com a caixilharia: verga, ombreiras e peitoril	0.21	0.25
8	Fachada com a caixilharia: soleira	0.11	0.25

A porta de entrada é opaca e apresenta um coeficiente de transmissão térmica (U_d) de $1.8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

2.3. Envolvente Envidraçada

Nas janelas encontram-se instalados vidros baixo emissivos, com controlo solar 6-16-44.2 ($U_g=1.3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $g_v=0.21$) e caixilho de alumínio com corte térmico da marca Navarra N17100 (Figura 9), com as características indicadas no Quadro 6.

Quadro 6. Resumo das características dos vãos envidraçados.

Exposição solar das janelas	Sul	Oeste
U_w	$1.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$1.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
g_v	0.21	0.21
Proteção solar	Estore veneziano de laminas metálicas escuras	Lona pouco transparente escura
$g_{t,vc}$	0.09	0.14
g_{tot}	0.025	0.039
$f_o\cdot f_f$	0.90	0.90
$g_{tot}\cdot f_o\cdot f_f$	0.023	0.035
Permeabilidade ao ar	Classe 4	Classe 4
U_g	$1.3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$1.3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

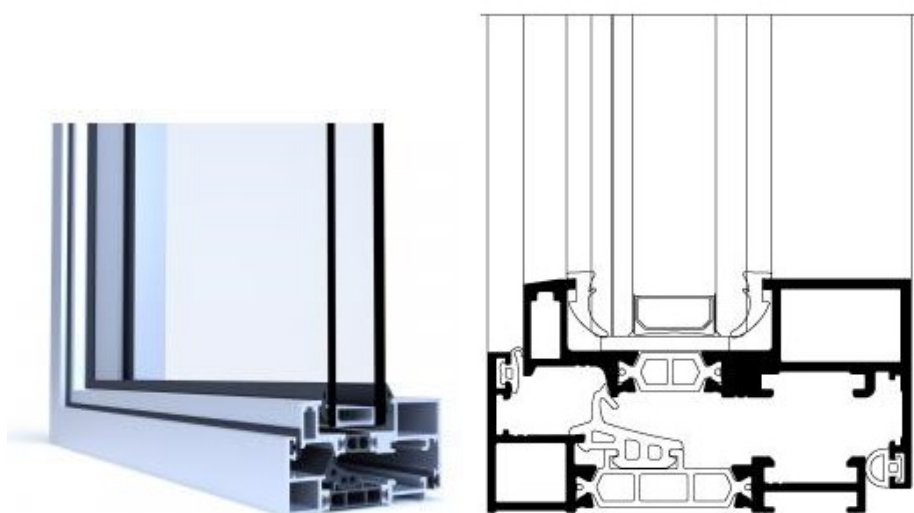


Figura 9. Pormenor representativo da solução de caixilharia.

2.4. Sistema de ventilação

Para promover a ventilação geral e permanente da construção, com reduzidas perdas térmicas é adotado um sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor com uma taxa de renovação de ar de 0.5 h^{-1} ($25 \text{ m}^3/\text{h}$). Para assegurar o arrefecimento gratuito, sempre que necessário, o sistema de ventilação mecânica é regulado no modo de *by-pass* à recuperação de calor e com um caudal de ar variável que pode ter o valor de até 1.2 renovações de ar por hora.

No protótipo encontra-se instalado um sistema de ventilação com as características indicadas no Quadro 7 e Figura 10. O sistema de ventilação, constituído por duas unidades de ventilação reversíveis, tem uma eficiência de recuperação de calor máxima de 93%.

Quadro 7. Características da unidade de ventilação mecânica.

Velocidade ventilador	1	2	3	4
Caudal (m^3/h)	10	20	40	60
Consumo (W)	3.9	4.2	5.5	6.7
W/(m^3/h)	0.39	0.21	0.14	0.11

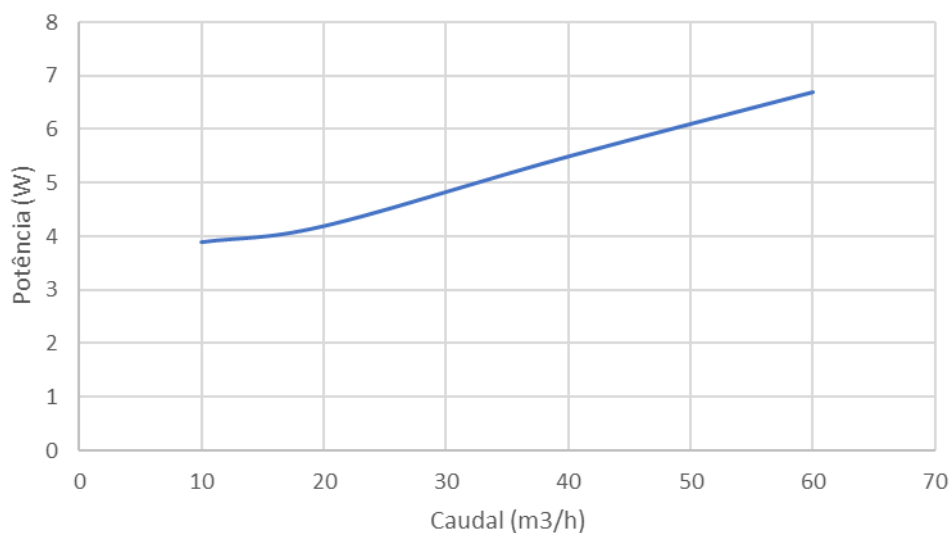


Figura 10. Consumo de energia elétrica de uma unidade de ventilação.

3. Avaliação do Desempenho Térmico e da Eficiência Energética

3.1. Aspetos Gerais

Para avaliar o desempenho térmico e a eficiência energética das construções CircularBuild é utilizada a metodologia regulamentar (Despacho n.º 6476-E, 2021; Portaria n.º 138-I, 2021; SCE, 2020), na qual devem ser verificados:

- i) Requisitos mínimos de desempenho energético aplicáveis à envolvente dos edifícios:
 - a. Envolvente opaca (coeficiente de transmissão térmica, Quadro 8);
 - b. Envolvente envidraçada (coeficiente de transmissão térmica e de proteção solar, Quadro 9 e Quadro 10).
- ii) Requisitos relativos aos sistemas técnicos:
 - a. Sistemas de ventilação (caudal mínimo de ar novo R_{ph} de 0.5 h^{-1});
 - b. Sistemas fixos de climatização;
 - c. Sistemas de preparação de AQ;
 - d. Sistemas de produção de energia elétrica;
 - e. Instalações de elevação;
 - f. Infraestruturas de carregamento de veículos elétricos.
- iii) Requisitos de conforto térmico e de desempenho energético:
 - a. Conforto térmico, necessidades de aquecimento ($N_{ic}/N_i \leq 0.75$ zona I1; $N_{ic}/N_i \leq 0.85$ zona I2; $N_{ic}/N_i \leq 0.90$ zona I3));
 - b. Conforto térmico, necessidades de arrefecimento ($N_{vc}/N_v \leq 1.00$);
 - c. Desempenho energético (classe A ou melhor);
 - d. Energia primária total ($R_{NT} \leq 0.50$);
 - e. Energia primária renovável ($Ren_{Hab} \geq 0.50$);
 - f. Ser edifício NZEB, cumprindo os requisitos anteriores.

Os critérios, condições de cálculo e de verificação e todos estes indicadores e parâmetros encontram-se definidos na legislação (Despacho n.º 6476-E, 2021; Despacho n.º 6476-H, 2021; Portaria n.º 138-I, 2021; SCE, 2020). Nas secções seguintes avalia-se o desempenho da construção CircularBuild face a estes requisitos e classe de desempenho energético.

Como referido no Capítulo 2, o protótipo encontra-se localizado nas zonas climáticas I1 e V2.

Quadro 8. Coeficiente de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca.

Portugal Continental			Zona Climática		
Tipo de elemento	Condição fronteira		I1	I2	I3
Zona corrente da envolvente.	Verticais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,50	0,40	0,35
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior ou interior com $b_{zlu} > 0,7$	0,40	0,35	0,30
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20
Zona de PTP	Verticais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,75	1,60	1,45
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior	0,90		
		Interior com $b_{zlu} > 0,7$	1,25	1,00	0,90
		Interior com $b_{zlu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20

Quadro 9. Coeficiente de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente envidraçada.

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Portugal Continental:			
Edifícios de habitação	2,80	2,40	2,20
Edifícios de comércio e serviços	3,30	3,30	3,30

Quadro 10. Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares ($g_{tot,max}$).

Tipo de edifício	Inércia do espaço	Zona Climática		
		V1	V2	V3
Edifícios de habitação	Fraca	0,15	0,10	0,10
	Média ou forte	0,56	0,56	0,50

Nota: Excetuam-se vãos expostos a norte.

3.2. Requisitos Mínimos de Desempenho Energético Aplicáveis à Envolvente dos Edifícios

Os requisitos mínimos aplicáveis aos elementos da envolvente opaca e envidraçada estabelecidos na (Portaria n.º 138-I, 2021), são satisfeitos pelas soluções do protótipo CircularBuild como se mostra no Quadro 11.

Quadro 11. Protótipo CircularBuild – Verificação de requisito aplicável à envolvente.

Elemento	CircularBuild	Requisito mínimo (SCE, 2021)
		Zona I1
Parede exterior standard	$U = 0.195 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$U = 0.50 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Pavimento standard	$U = 0.240 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$U = 0.40 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Cobertura standard	$U = 0.193 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$U = 0.40 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Janelas	$U_w = 1.8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$U_w = 2.8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Janelas	$g_{\text{tot}} \cdot f_o \cdot f_f$ 0.023 e 0.035	0.048*

* $g_{\text{tot}} \times 0.15 / (A_{\text{env}} / A_p) = 0.10 \times 0.15 / 0.31 = 0.048$

3.3. Requisitos Relativos aos Sistemas Técnicos

O sistema de ventilação adotado na célula de satisfaz ao requisito mínimo de ventilação de 0.5 h^{-1} , tendo para efeitos de verificação do requisito de verão estabelecido um caudal de $40.6 \text{ m}^3/\text{h}$, ou seja, $R_{ph} = 0.83 \text{ h}^{-1}$. Para melhorar a eficiência energética, o sistema de ventilação tem recuperação de calor com eficiência de 93% e um consumo específico de ventilação de $0.21 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$. O protótipo não tem mais sistemas técnicos regulados.

3.4. Requisitos de Conforto Térmico e de Desempenho Energético

Na Figura 11 apresentam-se os resultados da avaliação do desempenho energético do protótipo CircularBuild. Salienta-se que a célula não tem necessidades de AQS, pelo que não é possível calcular a componente Ren_{hab} . No Quadro 11 apresenta-se a verificação dos requisitos de conforto térmico e de desempenho energético, evidenciando o desempenho satisfatório, nomeadamente na estação de inverno.

Caso o protótipo fosse considerado um T0 e fosse considerado um sistema solar térmico com 1.3 m² de área de coletores, um reservatório de AQS de 100 l e dispositivos de elevada eficiência hídrica, então a componente renovável de energia é maior e é atingida a classe de eficiência energética A+ e NZEB20, Figura 12. Com um sistema fotovoltaico o edifício basicamente pode ficar autossuficiente.

Quadro 12. Protótipo CircularBuild – verificação de requisitos de conforto e eficiência energética.

Elemento	CircularBuild		Requisito (SCE, 2021)
	Sem AQS	Com AQS	Zona I1
Conforto térmico, necessidades de aquecimento	$N_{ic}/N_i=0.14$	$N_{ic}/N_i=0.14$	$N_{ic}/N_i \leq 0.75$
Conforto térmico, necessidades de arrefecimento	$N_{vc}/N_v=0.99$	$N_{vc}/N_v=0.99$	$N_{vc}/N_v \leq 1.00$
Desempenho energético	Classe A	Classe A+	classe A ou melhor
Energia primária total	$R_{NT} = 0.45$	$R_{NT} = 0.16$	$R_{NT} \leq 0.50$
Energia primária renovável	Não aplicável	51%	$Ren_{Hab} \geq 0.50$
NZEB20	Não aplicável	Sim	$R_{NT} \leq 0.40$

Símbolo	Descrição	Valor	Referência	Requisito Renovável (%)
Nic	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (kWh/m ² .ano)	13.62	95.95	0.00
Nvc	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m ² .ano)	12.10	12.22	
Qa	Energia útil para preparação de água quente sanitária (kWh/ano)	1189	1189	Nic/Nt
Wvm	Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores (kWh/ano)		149.52	0.45
Eren	Energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados (kWh/ano)	0	0	
Eren AQS	Energia produzida a partir de fontes renováveis para produção de AQS (kWh/ano) (para efeito de verificação do requisito mínimo)	0	0	
Eren,ext	Energia produzida a partir de fontes renováveis para outros usos (kWh/ano)		0.00	
Ntc	Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kWh/m ² .ano)	182.59	404.14	Classe Energética

Figura 11. Resultados da avaliação do desempenho energético da Protótipo (sem AQS e PV).

Sigla	Descrição	Valor	Referência	Renovável Requisito Ren _{req} (%)
Nic	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (kWh/m ² .ano)	13.62	95.95	51.53
Nvc	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m ² .ano)	12.10	12.22	
Ga	Energia útil para preparação de água quente sanitária (kWh/ano)	1070	1189	Nic/Nt
Wvm	Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores (kWh/ano)		149.52	0.16
Eren	Energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados (kWh/ano)	788	0	
Eren AQS	Energia produzida a partir de fontes renováveis para produção de AQS (kWh/ano) (para efeito de verificação do requisito mínimo)	788	0	
Eren,ed	Energia produzida a partir de fontes renováveis para outros usos (kWh/ano)		0.00	
Nlt	Necessidades nominais anuais globais de energia primária (kWh/m ² .ano)	65.01	404.14	
				Classe Energética A+

Figura 12. Resultados da avaliação do desempenho energético do protótipo com sistema solar térmico (1.3 m²) para duas pessoas (sem PV).

3.5. Coeficiente Global de Perdas Térmicas da Construção

Para apreciar a qualidade do isolamento térmico da envolvente, nesta secção realiza-se uma comparação do nível de isolamento térmico da solução construtiva CircularBuild face à solução construtiva de referência de uma construção nova (Despacho n.º 6476-H, 2021). Para esse efeito, é considerado o coeficiente global de transferência de calor (H_{tot}) dado pela expressão (1) e que resulta da soma do coeficiente de transferência de calor por transmissão (H_{tr}) dado pela expressão (2) com o coeficiente de transferência de calor por ventilação (H_{ve}) dado pela expressão (3). No cálculo de H_{ve} , neste exercício não são consideradas as infiltrações de ar.

$$H_{tot} = H_{ve} + H_{tr} \quad (1)$$

$$H_{tr} = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_i \psi_i \cdot B_i \quad (2)$$

$$H_{ve} = 0,34 \times R_{ph} \times A_p \times p_d \times (1 - \eta_{RC}) \quad (3)$$

Em que:

H_{tot} – Coeficiente global de transferência de calor [W/K];

H_{tr} – Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente [W/K];

U_i – Coeficiente de transmissão térmica do elemento i da envolvente [W/(m².K)];

A_i – Área do elemento i da envolvente, medida pelo interior do edifício [m²];

ψ_i – Coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear i [W/(m.K)];

B_i – Desenvolvimento linear da ponte térmica linear i , medido pelo interior do edifício [m];

ATIVIDADE A.4, D4.3 – Avaliação e Cálculo de Desempenho Real

07_Call#2_CircularBuild – Desenvolvimento e Validação do Conceito de Circularidade Aplicada à Construção Pré-Fabricada Modular

H_{ve} - Coeficiente de transferência de calor por ventilação [W/K];

η_{RC} – Rendimento do sistema de recuperação de calor;

Rph – Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento [h⁻¹];

A_p – Área interior útil de pavimento [m²];

P_d – Pé direito médio ponderado [m].

No Quadro 13 apresentam-se os resultados do cálculo dos coeficientes de transferência de calor para o protótipo CircularBuild e para construções novas equivalente com os coeficientes de transmissão térmica de referência aplicáveis às zonas climáticas I1, I2 e I3. Na Figura 13, apresenta-se o coeficiente global de transferência de calor (H_{tot}) expresso por unidade de área de pavimento, sendo perceptível que a construção CircularBuild apresenta um nível de transferência de calor de 38% de uma construção nova da zona climática I1 (ex. Lisboa) a 45% de uma construção nova na zona I3, ou seja, reduz as perdas térmicas em 62% a 55% face ao limite máximo aplicável às construções novas, sendo um bom indicador do nível de isolamento desta solução. A melhoria do isolamento da construção CircularBuild está predominantemente associada à redução das PTL e das zonas correntes dos elementos opacos, bem como no uso do sistema de ventilação com recuperação de calor.

Como exemplo do efeito da melhoria do isolamento térmico, salienta-se que para aquecer o protótipo 10 °C são necessários cerca de 380 W, enquanto para uma construção nova (SCE novo I1) são necessários cerca de 1000 W.

Quadro 13. Coeficientes de transferência de calor do protótipo.

Elemento	CircularBuild	I1	I2	I3
Opaco (W/K)	19.1	37.0	30.2	26.3
Envidraçado (W/K)	11.4	17.7	15.2	13.9
PTL (W/K)	6.8	35.3	35.3	35.3
Transmissão H_{tr} (W/K)	37.2	90.0	80.7	75.5
Ventilação H_{ve} (W/K)	0.6	8.6	8.6	8.6
Total H_{tot} (W/K)	37.8	98.6	89.3	84.1
Total (W/(m².K))	1.9	4.9	4.4	4.1

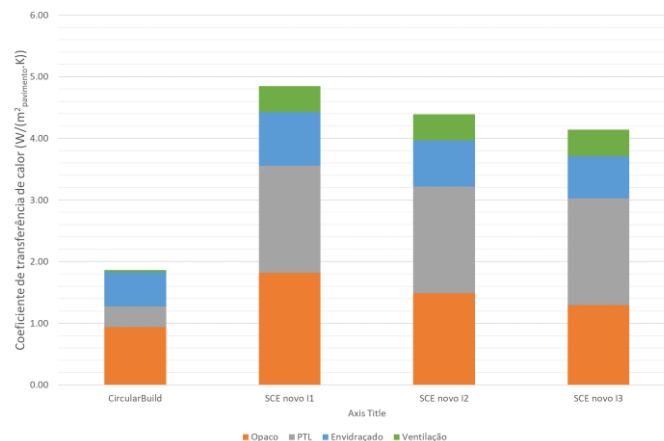


Figura 13. Coeficientes de transferência de calor do protótipo por unidade de área de pavimento (H/A_p).

3.6. Inércia Térmica

Os painéis da construção CircularBuild têm uma massa de 51 kg/m^2 , sendo uma construção leve. Dessa massa, para a inércia térmica interior contribuem apenas as camadas superficiais:

- Uma face a contribuir para a inércia térmica do espaço: 16 kg/m^2 ;
- Duas faces a contribuir para a inércia térmica do espaço: 32 kg/m^2 .

Para a construção, considera-se a massa térmica superficial (I_t) de 60 kg/m^2 , pertencendo a construção à classe de inércia térmica fraca ($I_t < 150 \text{ kg/m}^2$). Contudo, caso sejam aplicados revestimentos interiores cerâmicos/pedra, a construção pode passar a pertencer à classe de inércia térmica média, melhorando ainda mais o respetivo desempenho térmico passivo.

Na fábrica UnusHome em Oliveira de Azeméis, estão instaladas duas construções UnusHouse (Figura 14), uma com revestimento exterior com cortiça e outra com revestimento de argamassa com cor cinzenta. No âmbito dessa visita foram realizadas medições da temperatura no exterior e no interior dessas construções, encontrando-se os resultados na Figura 15. A construção não tem soluções especiais de controlo de ganhos solares pelos vãos envidraçados, nem sistema de ventilação com free-cooling. Nessas construções de inércia térmica fraca, mas com isolamento elevado, constata-se que para uma amplitude térmica exterior diária máxima de 11°C , no interior a obteve-se uma amplitude diária de 5°C na casa com revestimento de cortiça e de 9°C na outra construção com revestimento cinzento. Nesse sentido, apesar da construção ser de inércia térmica fraca, existe capacidade de atenuação da amplitude térmica diária no interior, como se constata dos resultados da construção com revestimento de cortiça.



a) Revestimento a cortiça



b) Revestimento com argamassa e cor cinzenta

Figura 14. Construções em Oliveira de Azeméis com a solução UnusHouse.

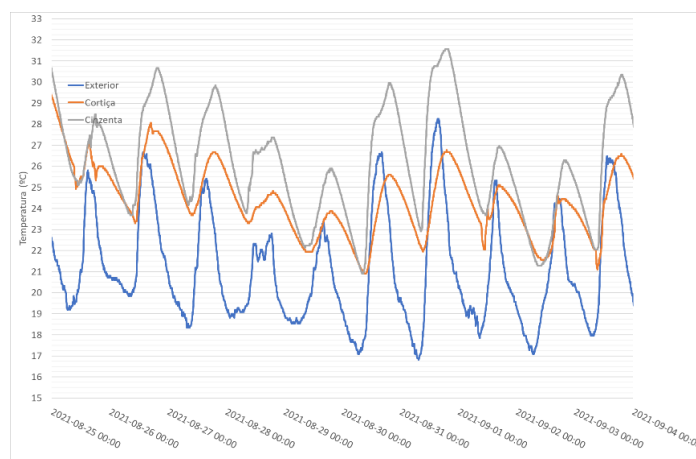


Figura 15. Resultados da medição da temperatura nas construções em Oliveira de Azeméis.

3.7. Outros

Para assegurar os requisitos de eficiência energética (SCE, 2020), de conforto térmico e de edifícios de consumo de energia quase nula (NZEB), é valorizada a utilização nas construções de sistemas de AQS eficientes, dispositivos de elevada eficiência hídrica e o aproveitamento de fontes renováveis de energia. Esses sistemas são facilmente integrados nas construções CircularBuild (assim como nas outras) e não são aqui estudados em detalhe.

Nesta avaliação considera-se a utilização de um sistema solar térmico com apoio elétrico para a produção de AQS. Os coletores solares têm 1.3 m² de área, com inclinação de 40º e armazenamento com um volume de 100 l e a utilização de dispositivos de elevada eficiência hídrica e tubagem com isolamento térmico. O sistema tem uma fração solar de 73%.

4. Avaliação da Permeabilidade ao Ar

Para avaliar a permeabilidade ao ar da construção CircularBuild foi realizado de ensaio de pressurização de acordo com a norma (EN ISO 9972, 2015), tendo sido desligado e selado o ventilador da construção e instalada a porta ventiladora na porta de entrada.

Na realização do ensaio foram utilizados os equipamentos indicado no Quadro 14. Os resultados apresentam-se na Figura 16 para o ensaio em pressão positiva e na Figura 17 para o ensaio em pressão negativa. O protótipo ensaiado tem um valor n50 de 4.4 h⁻¹, que é um valor elevado tendo por base o valor recomendado por (Pinto, 2008) de 2.8 h⁻¹ para moradias unifamiliares isoladas.

Quadro 14. Características do equipamento de medição.

Equipamento	Grandeza	Gama	Incerteza expandida
Porta Ventiladora	Caudal de ar	0 m ³ /h a 4500 m ³ /h	5 %
Micromanómetro	Diferença de pressão	- 3 735 Pa a +3 735 Pa	5 %
Termohigrómetro	Temperatura do ar	10 °C a 30 °C	0.1 °C
Termohigrómetro	Humidade relativa do ar	20 % a 80 %	1 %
Barómetro	Pressão atmosférica	800 mbar a 1200 mbar	10 mbar

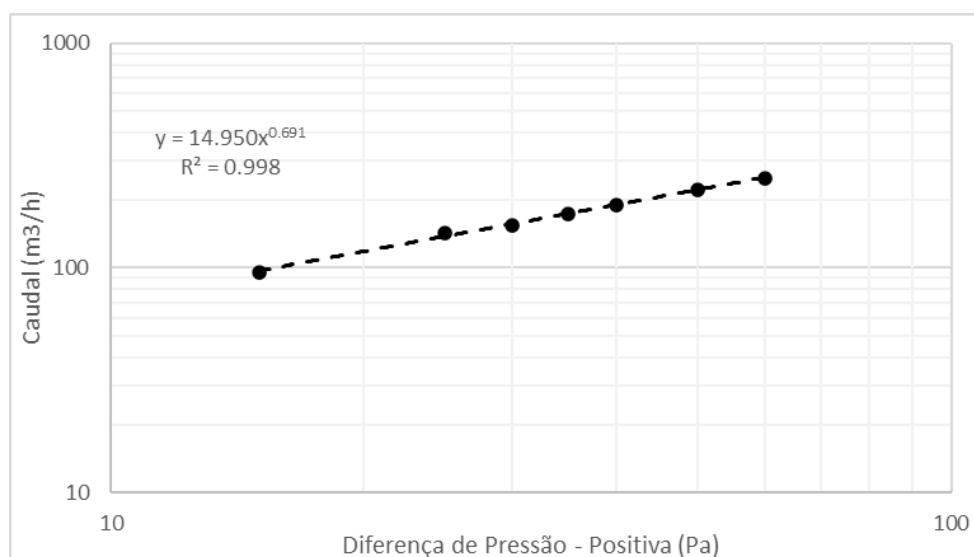


Figura 16. Resultado ensaio de pressurização – Pressão Positiva.

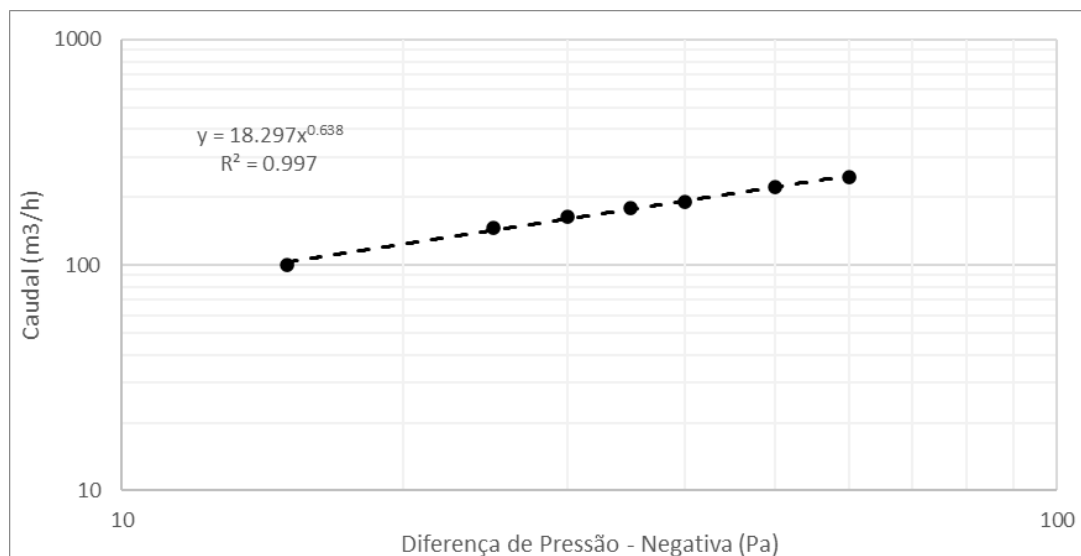


Figura 17. Resultado ensaio de pressurização – Pressão Negativa.

5. Avaliação Experimental do Coeficiente Global de Perdas Térmicas

Foi realizado um ensaio para avaliar em condições reais o coeficiente global das perdas térmicas da construção CircularBuild, seguindo a metodologia especificada no projeto de norma (EN 17888-2 (draft), 2022). Na Figura 18 apresentam-se os registos da temperatura no interior da célula, no exterior e a potência de aquecimento da célula para obter 30°C e tentar ter uma temperatura interior superior à temperatura exterior. Na Figura 19 representam-se os resultados do período utilizado para o estudo da construção e estimativa experimental de H_{tot} . Na Figura 20 representa-se a radiação solar incidente em superfície horizontal.

Com base nos dados da temperatura, interior, exterior e da radiação solar estima-se experimentalmente um coeficiente global de perdas térmicas de 30 W/K, que é 80% do valor 37.8 W/K, calculado na secção 3.5, o que se considera um resultado satisfatório. Efetivamente no cálculo realizado na secção 3.5, considera-se existir uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior de 20 °C, enquanto no ensaio se obteve-se um valor menor para a diferença de temperatura média, de 11°C, o que reduz as perdas térmicas experimentais face ao cálculo.

No período final do ensaio regista-se que em regime de *freefloat* a construção teve uma amplitude diária da temperatura que oscilou entre 21.4 °C e 24.1 °C (amplitude de 2.7 °C), dentro da gama de conforto e com uma amplitude diária não tão elevada como na célula cinzenta e de cortiça (ver secção 3.6).

A análise com termografia da envolvente da construção durante o ensaio (ex. Figura 21) não evidenciou a existência de heterogeneidades, constatando-se que o isolamento proporcionado pelos elementos exteriores aos perfis de alumínio dos painéis é suficiente para não permitir identificar os mesmos.

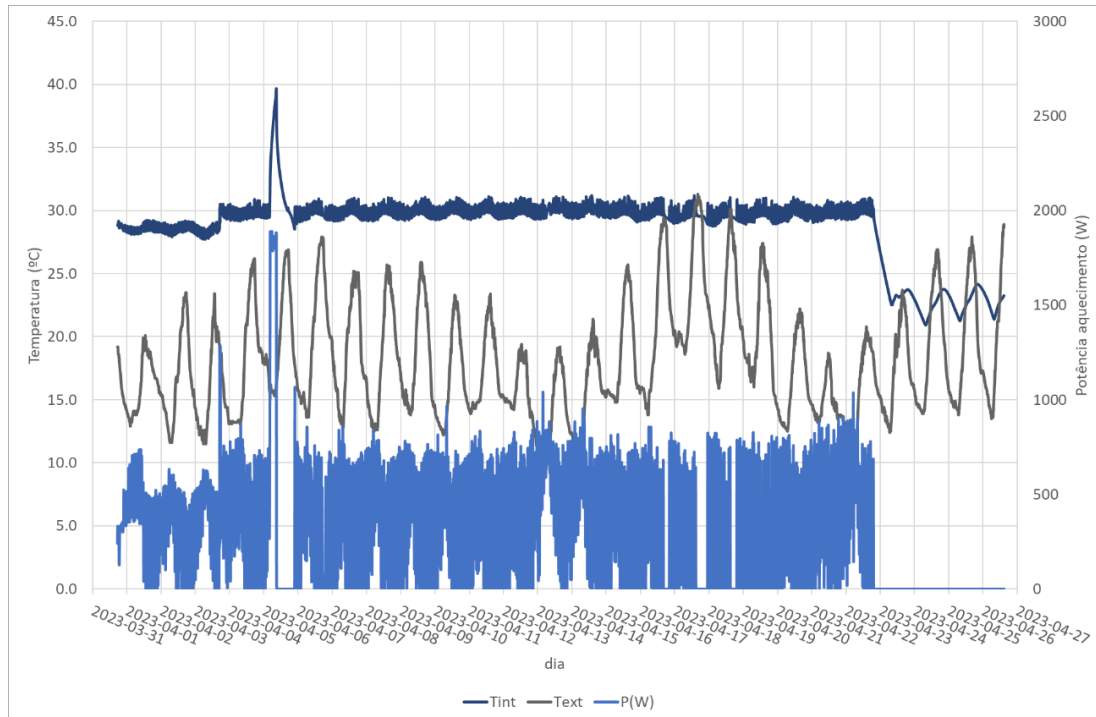


Figura 18. Resultados da monitorização da construção.

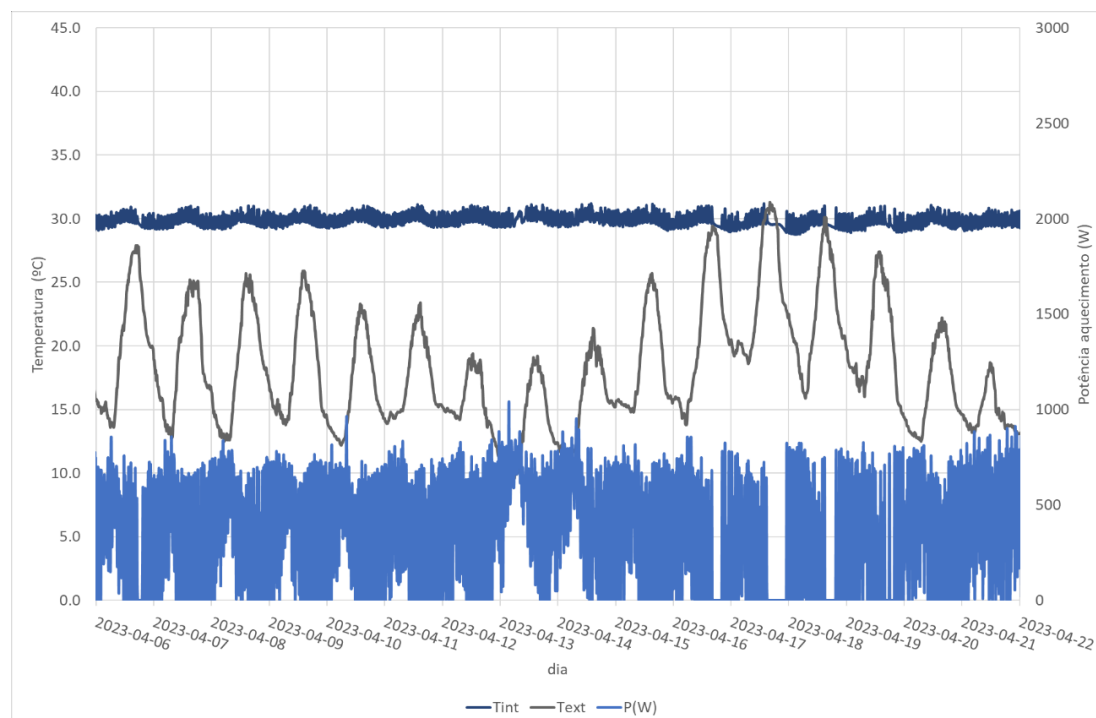


Figura 19. Resultados da monitorização da construção utilizados para calcular H_{tot} (W/K).

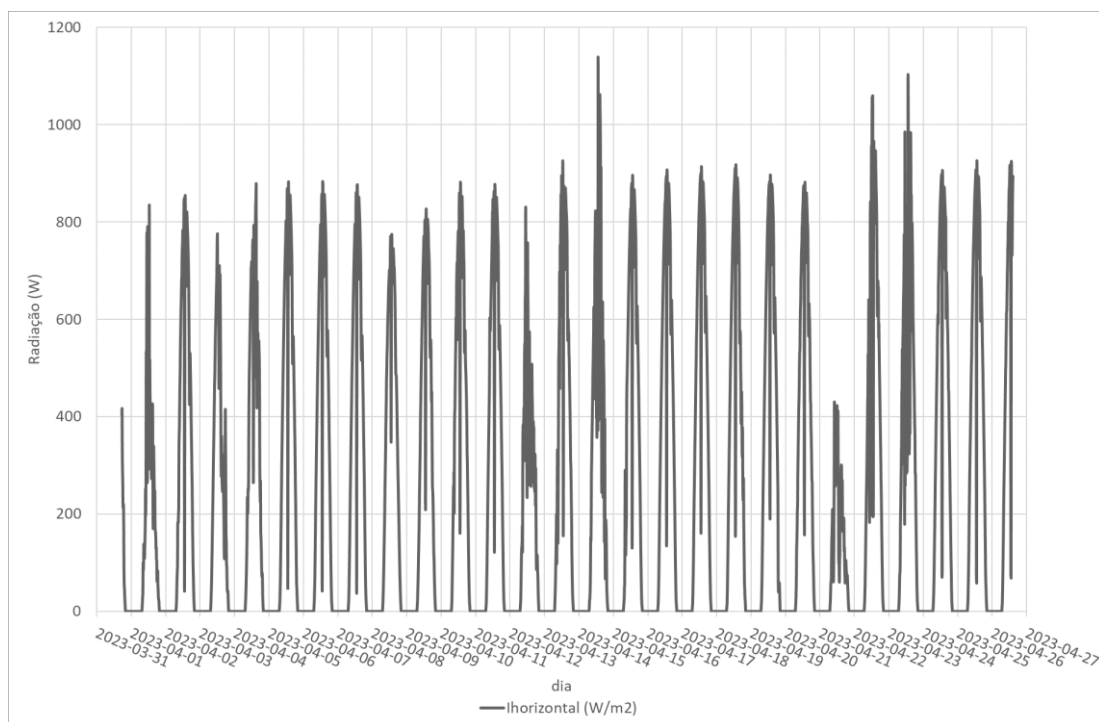


Figura 20. Radiação solar global em superfície horizontal.

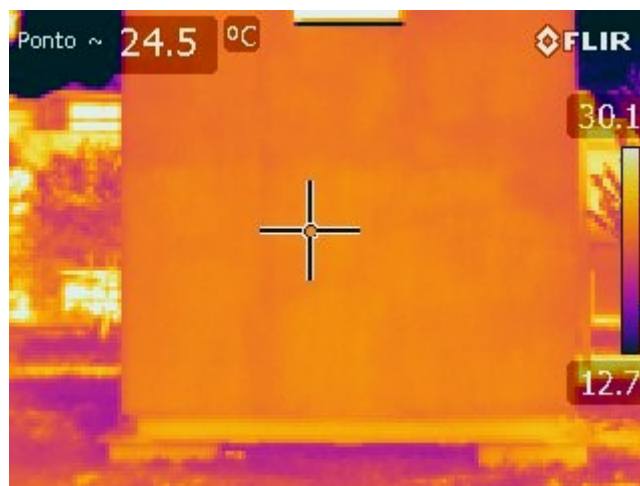


Figura 21. Termografia de uma das fachadas da construção.

Conclusões

Foi realizada a avaliação da construção CircularBuild instalada no Campus do LNEC, tendo sido avaliados por cálculo o desempenho térmico e eficiência energética, bem como foi realizada uma avaliação experimental destinada a estimar a permeabilidade ao ar e o isolamento térmico da construção.

Os resultados desta avaliação evidenciam que a construção CircularBuild:

- Apresenta um nível de transferência de calor de 38% de uma construção nova de referência da zona climática I1 (ex. Lisboa) a 45% de uma construção nova na zona I3, ou seja, reduz as perdas térmicas em 62% a 55% face ao limite máximo aplicável às construções novas, sendo um bom indicador do nível de isolamento desta solução. A melhoria do isolamento da construção CircularBuild está predominantemente associada à redução das PTL e das zonas correntes dos elementos opacos, bem como no uso do sistema de ventilação com recuperação de calor;
- A construção CircularBuild satisfaz aos requisitos mínimos de desempenho térmico e de conforto térmico (SCE, 2020);
- Os resultados da avaliação do desempenho energético do protótipo CircularBuild, que esta pertence à classe A (sem qualquer sistema AQS e de climatização), caso o protótipo fosse considerado um T0 e fosse considerado um sistema solar térmico seria atingida a classe A+ e NZEB20 e com um sistema fotovoltaico o edifício basicamente pode ficar autossuficiente;
- No ensaio de pressurização obteve-se um valor n_{50} de 4.4 h^{-1} , que é um valor superior ao recomendado de 2.8 h^{-1} , existindo oportunidade de melhorar;
- O resultado da avaliação experimental do coeficiente global de perdas térmicas é (30 W/K) é inferior ao valor obtido por cálculo de (38 W/K) em cerca de 80%, evidenciando que os valores de cálculo se podem considerar conservativos;
- No período final do ensaio regista-se que em regime de *freefloat* a construção teve uma amplitude diária da temperatura oscilou entre $21.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $24.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (amplitude de $2.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$), dentro da gama de conforto.

Bibliografia

- DESPACHO N.º 6476-E, 2021 – **Aprova os requisitos mínimos de conforto térmico e de desempenho energético aplicáveis à conceção e renovação dos edifícios**. Lisboa.
- DESPACHO N.º 6476-H, 2021 – **Aprova o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE)**. Lisboa.
- EN 17888-2 (DRAFT), 2022 – **Thermal performance of buildings - In situ testing of building test structures - Part 2: Steady-state data analysis for aggregate heat loss test**. Bruxelas.
- EN ISO 9972, 2015 – **Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method (ISO 9972:2015)**. Geneve.
- PINTO, A.; RUI FRAGOSO, 2018 – **INDICADOR DE COMPORTAMENTO TÉRMICO SOLAR PASSIVO DE HABITAÇÕES. Estação de Aquecimento**. Lisboa, LNEC. Relatório n.º 185/2018 – DED/NAICI.
- PINTO, Armando, 2008 – **Aplicação da Avaliação de ciclo de vida à análise energética e ambiental de edifícios**
- PINTO, Armando; FRAGOSO, Rui, 2018 – **Indicador de Comportamento térmico Solar passivo de habitações**. Lisboa: LNEC, relatório n.º 185/2018 – Departamento de Edifícios/NAICI.
- PINTO, Armando; MATEUS, Rafaela, 2023 – **CIRCULARBUILD Avaliação do coeficiente de transmissão térmica (U) e das pontes térmicas lineares (2)**. Lisboa, LNEC. Relatório n.ºXXX/2023.
- PORTARIA N.º 138-I, 2021 – **Regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético relativos à envolvente dos edifícios e aos sistemas técnicos e a respetiva aplicação em função do tipo de utilização e específicas características técnicas**. Lisboa.
- SCE, 2020 – **Estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944**. Decreto-Lei n.º 101-D/2020.
- SCE, Manual, 2021 – **Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios**. Direção-geral de Energia e Geologia.

Assinaturas

Projeto CircularBuild

Nome	
Data e Assinatura	
Cargo/Entidade	

Operador de Programa – Secretaria Geral do Ambiente

Nome	
Data e Assinatura	
Cargo/Entidade	