

Reabilitação de edifício de habitação no centro histórico do Porto

Calibração do modelo de simulação dinâmica com base na monitorização térmica

Alexandre Soares dos Reis Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, alexandre.soares.reis@ua.pt

Petra Vaquero Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, pvquero@ua.pt

Marta Ferreira Dias Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, mfdias@ua.pt

Alice Tavares Centro de Investigação em Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Laboratório Associado CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro, Universidade de Aveiro, tavares.c.alice@ua.pt

Aníbal Costa Centro de Investigação em Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, agc@ua.pt

Jorge Fonseca Centro de Investigação em Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, jfonseca@ua.pt

RESUMO

A reabilitação de edifícios nos centros históricos ou centros urbanos tem sido e continuará a ser um desafio face aos condicionalismos de natureza estética, funcional e regulamentar, nomeadamente, nas exigências ao nível dos requisitos de qualidade térmica da envolvente. Porém, a diferença entre os consumos teóricos, resultantes da metodologia de cálculo proposta pela legislação, e os consumos reais pode ser muito significativa, em especial quando, na realidade portuguesa os edifícios ou não são aquecidos ou, se forem, será de forma intermitente, no entanto, a referida metodologia assume que o aquecimento existe e é contínuo.

O principal objetivo deste estudo é avaliar o efeito, no conforto térmico dos ocupantes, resultante da aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores de edifícios a reabilitar no Centro Histórico do Porto, pelo que se desenvolveu um modelo de simulação dinâmica multizona, no *software* TRNSYS. De forma a validar os resultados obtidos na simulação, procedeu-se à calibração do modelo, procurando aproximar os valores teóricos das temperaturas interiores obtidas no cálculo, aos valores reais registados num edifício residencial localizado no Centro Histórico do Porto e, recentemente, reabilitado. Sendo o objetivo principal da intervenção a minimização do desconforto térmico dos ocupantes, foram efetuadas intervenções criteriosas, apenas nos elementos com influência nesse desconforto. O edifício foi instrumentado, existindo, à data, dados de temperatura e humidade interior dos diferentes espaços. Tendo o modelo devidamente calibrado através da análise da incerteza dos resultados, o edifício foi simulado, em regime *free float*, sem qualquer isolamento térmico nas paredes exteriores e com espessuras de 2 cm e 8 cm de isolamento na face interior das paredes exteriores. Os resultados sugerem que o impacto, nas condições de conforto térmico no inverno, é bastante reduzido quando se isolam as paredes exteriores e, ao isolar pela face interior, o conforto no verão também é penalizado uma vez que ocorre um aumento do número de horas de sobreaquecimento.

PALAVRAS-CHAVE conforto térmico . edifícios residenciais . centros históricos . reabilitação . simulação dinâmica

1. INTRODUÇÃO

O Centro Histórico do Porto apresenta uma arquitetura que testemunha várias épocas, nomeadamente, romana, medieval, renascentista, barroca e neoclássica [1]. Em 1979, Portugal aderiu à Convenção para a Proteção do Património Mundial, Cultural e Natural, adotada em 1972 pela Conferência Geral da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), que fixa os deveres dos Estados Membros quanto à preservação e proteção do património [2]. A responsabilidade de salvaguardar a identidade do Centro Histórico do Porto, reconhecido pela UNESCO como Património da Humanidade, desde 1996, representa, para o Estado Português, um enorme desafio face aos constrangimentos legais motivados por legislação diversa, nomeadamente, a associada à transposição para o direito nacional da diretiva europeia para o desempenho energético dos edifícios, a *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) [3]. De facto, fazer cumprir os requisitos mínimos do coeficiente de transmissão térmica superficial dos elementos construtivos, conforme está preconizado na transposição da diretiva, pode não ser compatível com uma arquitetura milenar a preservar e, paradoxalmente, poderá ter um impacto muito reduzido no conforto dos ocupantes, face ao funcionamento dos edifícios em regime de *free float*, ou seja, sem qualquer tipo de aquecimento ambiente.

2. ESTUDO DE CASO

O edifício em estudo, localizado junto à Sé do Porto, na Rua D. Hugo, casa 10 (figura 1), representa uma tipologia típica do Centro Histórico do Porto, com frente estreita (4,94 m) e uma profundidade de 7,70 m, integrado no meio de um quarteirão, com um piso térreo semienterrado uma vez que a frente confronta com a rua, mas o tardo possui, aproximadamente, 3 m enterrados. Possui 4 pisos (P0, P1, P2 e P3) e duas frações de habitação independentes, uma de tipologia T0 no rés-do-chão

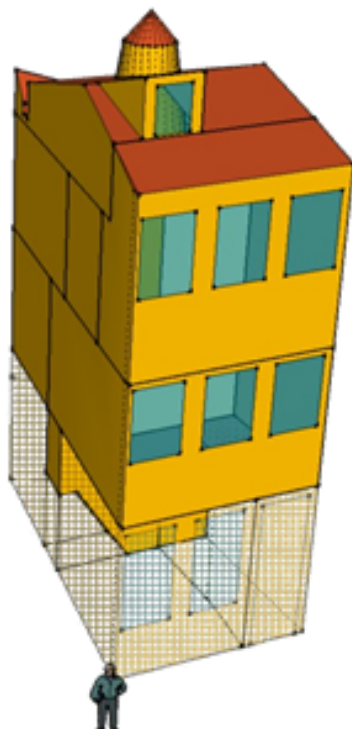
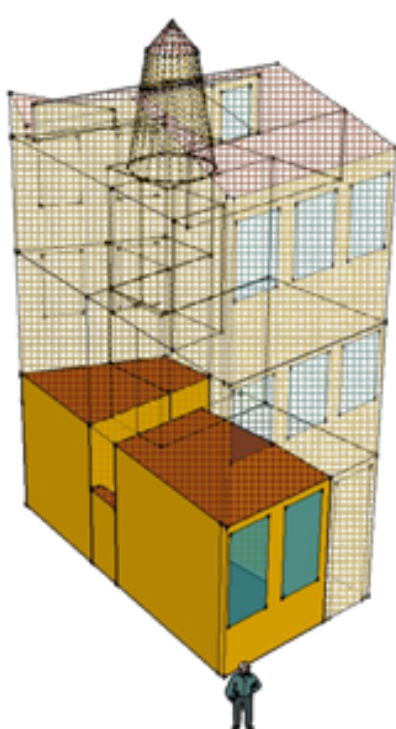
(Piso 0 – P0) e outra de tipologia T2 ocupando os restantes pisos (Piso 1 – P1, Piso 2 – P2 e Piso 3 – P3).

O edifício tem como elemento caracterizador uma escada centralizada, posicionada transversalmente, que define a compartimentação interior, com um compartimento para a frente e outro para o tardo. A escada interior é encimada pela tradicional claraboia. Em termos de exposição solar e condições para iluminação natural, a fachada principal está virada a nascente e a de tardo a poente. Porém, a fachada a poente encontra-se, permanentemente, sombreada pelo edifício da Sé de quem está separada por uma estreita viela. O sistema construtivo é o tradicional do Porto para a época, com paredes de alvenaria de granito, quer para as fachadas (cerca de 0,60 m de espessura) quer para as paredes meeiras (cerca de 0,30 m de espessura) sendo estas comuns aos edifícios contíguos. As paredes interiores eram de tabique simples, existindo algumas de tijolo cerâmico furado de 7 cm decorrentes de alterações na compartimentação original. A restante estrutura de pavimentos era de madeira, com vigas de secção redonda (20 cm), na maior parte dos casos não retilíneas, demonstrando a antiguidade do edifício. As vigas de pavimento perfaziam toda a largura do edifício e apoiavam nas paredes meeiras. A estrutura de cobertura era de madres, onde se apoiavam varas interrompidas na zona do corpo da claraboia, tendo o ripado e as telhas marselha e havendo ainda uma única janela, do tipo trapeira, que assegurava a iluminação natural deste espaço. Todos os vãos envidraçados existentes no edifício apresentavam vidro simples com 2,5 mm de espessura, aros de madeira e portadas de madeira pelo interior em alguns vãos.

A intervenção de reabilitação teve como princípio orientador a preservação de todos os elementos arquitetónico-construtivos originais do edifício e um compromisso de equilíbrio em relação às melhorias do conforto térmico interior com a menor intrusividade possível. Neste sentido, a solução de reabilitação

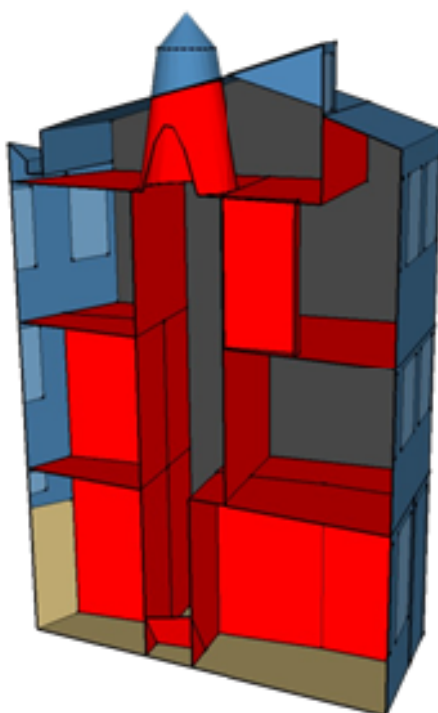
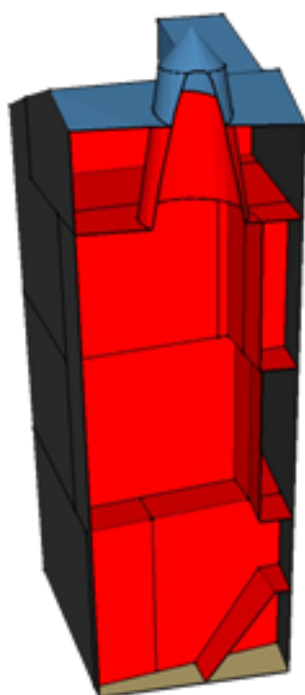


1 | Casa 10 da Rua D. Hugo, Porto.



2 | Modelo 3D do edifício, assinalando-se o T0 (à esquerda) e o T2 (à direita).

3 | Modelo 3D do edifício, cortes exemplificativos do zoneamento utilizado.



2

3

procurou otimizar o comportamento passivo do edifício e introduzir melhorias sem colocar o utente excessivamente dependente de equipamentos para climatização ou, pelo menos, podendo controlar os momentos em que os pretende utilizar ou ter custos de manutenção, face à sua capacidade económica. Por este motivo, foram valorizados os aspetos associados ao aproveitamento dos ganhos solares no inverno, bem como a inércia térmica das paredes de alvenaria de granito. Assim, apenas foi isolada a cobertura, com 12 cm de aglomerado negro de cortiça expandida, não tendo sido aplicado qualquer isolamento térmico nas paredes exteriores uma vez que, pelo exterior iria interferir na demarcação existente das orlas em granito dos vãos e pelo interior comprometeria a inércia térmica. Os vãos envidraçados da fachada principal foram reabilitados, mantendo-se a madeira e o vidro simples. Face ao elevado estado de degradação dos vãos envidraçados da fachada tardoz, os mesmos foram substituídos por uma nova caixilharia de madeira com vidro duplo. Os vãos envidraçados representam 17% (vidro simples) e 7% (vidro duplo) da área total correspondente à envolvente vertical exterior.

3. CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

Utilizando uma ferramenta de simulação dinâmica multizona, o *TRNSYS*, auxiliado por uma ferramenta de modelação 3D de edifícios, o *SKETCHUP*, desenvolveu-se o modelo de simulação dinâmica que serviu de base ao presente estudo, tendo-se considerado um fator de redução de perdas de 0,6 para os imóveis que confinam com o imóvel analisado [4]. Na figura 2 e na figura 3, a título exemplificativo, apresentam-se algumas imagens do modelo

Tabela 1 | Calibração do modelo de simulação dinâmica multizona

	NMBE	CV(RMSE)	R ²
ASHRAE	±10%	<30%	>75%
IPMVP	±5%	<20%	
T0 P0 Sala frente	-9%	14%	83%
T2 P1 Sala Frente	-1%	12%	71%
T2 P2 Quarto Frente	0%	11%	78%
T2 P2 Quarto Tardoz	-2%	11%	76%

tridimensional desenvolvido e no qual o edifício foi dividido em 13 zonas de simulação.

As soluções construtivas utilizadas na simulação tiveram por base a publicação ITE 50 [5] do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 [4].

Quanto aos dados climáticos, recorreu-se aos ficheiros de referência utilizados no Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) [6], disponibilizados pela Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) [7].

A precisão dos modelos de simulação dinâmica é importante uma vez que, após a validação do modelo através de um procedimento de calibração, este pode ser utilizado para prever vários cenários que conduzam à redução dos consumos energéticos e da melhoria das condições de conforto no interior dos edifícios. Tendo em conta a *Guideline 14-2014* [8] da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), a calibração é o processo de redução da incerteza dos dados de saída de um modelo mediante determinadas condições, face aos resultados reais medidos nas mesmas condições. Um modelo calibrado é aquele que, sob o mesmo conjunto de condições, consegue reproduzir as monitorizações realizadas, sendo a sua precisão avaliada através de uma análise de incerteza [9].

Entre 1 de março de 2020 e 21 de dezembro de 2020, com o edifício ainda desocupado, foram recolhidos dados provenientes de uma campanha de monitorização das temperaturas interiores de vários espaços do edifício. A calibração foi concretizada

através da comparação dos resultados reais com os resultados obtidos através do modelo de simulação para a Sala Frente (T0 | P0), Sala Frente (T2 | P1), Quarto Frente (T2 | P2) e Quarto Tardoz (T2 | P2). Foram tidas em conta as orientações da *Guideline 14-2014* da ASHRAE bem como do documento *Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings, Volume I do International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP) [10] que consideram os seguintes índices para a análise da incerteza dos resultados de um modelo de simulação:

- Erro de enviesamento médio normalizado, *Normalized Mean Bias Error* (NMBE);
- Coeficiente de variação do erro quadrático médio, *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CV(RMSE));
- Coeficiente de determinação, R².

Analisando a tabela 1 constata-se que os valores de NMBE e de CV(RMSE) se encontram dentro dos limites propostos pela ASHRAE e pelo IPMVP, exceto a Sala Frente (T0 | P0), na qual o NMBE excede, em alguns pontos percentuais, o intervalo de ± 5% proposto pelo IPMVP, cumprindo o intervalo de ± 10% proposto pela ASHRAE.

No caso do coeficiente de correlação, R², não se trata de um valor prescritivo, mas apenas de uma recomendação, coincidente em termos de valores, na ASHRAE e IPMVP, que aconselham R² > 75%. Apenas um dos compartimentos apresenta um valor inferior, no entanto, bastante próximo (71%), pelo que se considerou que o modelo se encontrava calibrado.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Com o modelo calibrado procedeu-se a uma análise do impacto da aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores, que representam 17% da área total da envolvente, no conforto térmico dos ocupantes. Salienta-se que, dentro do espírito associado à reabilitação do edifício, não foram isoladas as paredes exteriores pelo que a primeira simulação realizada (base) teve em conta o edifício ocupado, respeitando as soluções construtivas atuais e em regime *free float*. A segunda e a terceira simulação foram em tudo semelhantes à primeira, mas admitindo a aplicação, pelo interior das paredes exteriores, de 2 cm e 8 cm de aglomerado negro de cortiça expandida, barreira pára-vapor e gesso cartonado com 1,3 cm. A solução com 2 cm de isolamento (Pextl2cm) está de acordo com o previsto no Decreto-Lei n.º 95/2019 [11], a legislação mais recente no âmbito da reabilitação de edifícios residenciais, em conformidade com os coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis estipulados pela Portaria n.º 297/2019 [12]. A solução onde se prevê a aplicação de 8 cm de isolamento (Pextl8cm) tem por base o Decreto-Lei n.º 118/2013 [6] e os requisitos para edifícios novos ou intervenções em componentes de edifícios definidos pela Portaria n.º 379-A/2015 [13].

Os resultados sugerem que o isolamento tem um impacto reduzido nas temperaturas interiores dos compartimentos principais, durante o seu período de ocupação, conforme se pode constatar nos histogramas das figuras 4 a 7, que representam o número de horas de ocorrência de temperaturas interiores, nos meses de novembro a fevereiro, em diferentes gamas de temperatura.

4 | Número de horas de ocorrência de gamas de temperaturas – Sala Frente (T0 | P0).

5 | Número de horas de ocorrência de gamas de temperaturas – Sala Frente (T2 | P1).

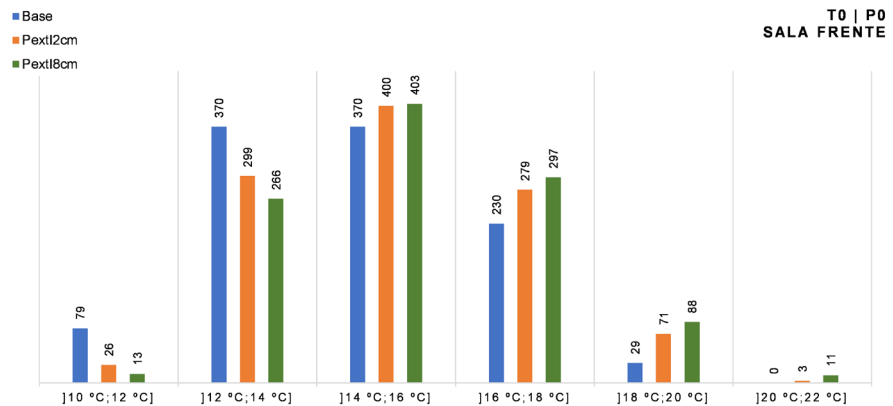
6 | Número de horas de ocorrência de gamas de temperaturas – Quarto Frente (T2 | P2).

7 | Número de horas de ocorrência de gamas de temperaturas – Quarto Tardoz (T2 | P2).

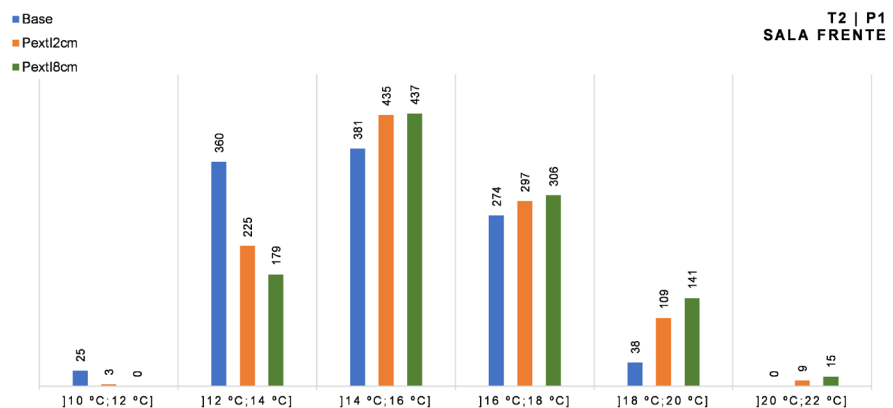
Verifica-se que a colocação de isolamento, pelo interior das paredes exteriores do edifício, reduz o número de horas com temperaturas mais baixas e aumenta as horas com temperaturas mais altas. No entanto, constata-se que a alteração não é significativa, mesmo aumentando a espessura do isolamento de 2 cm para 8 cm (tabelas 2 e 3). Em contrapartida, a colocação deste material pelo lado interior das paredes exteriores provoca o sobreaquecimento dos espaços nos meses de verão tendo-se verificado diferenças entre 19% e 36% e entre 30% e 61%, relativamente à situação sem isolamento, para os isolamentos de 2 cm e 8 cm, respetivamente. Salienta-se que não foi equacionada a aplicação de isolamento pelo exterior uma vez que tal intervenção iria descaracterizar o edifício em virtude da demarcação das orlas em granito dos vãos.

5. CONCLUSÕES

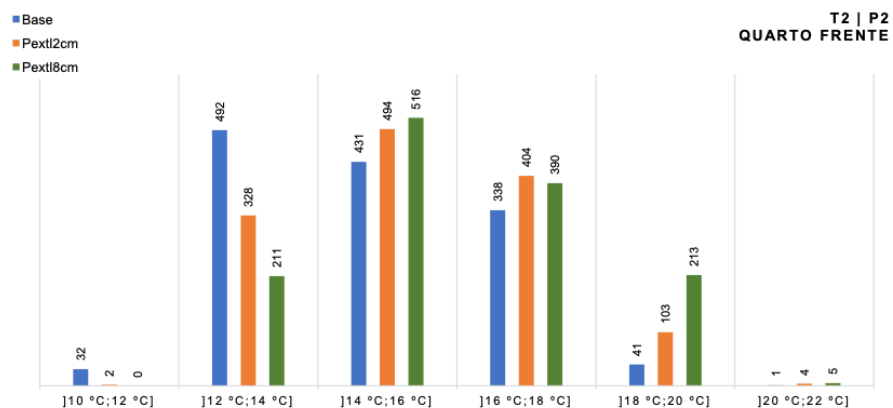
Este trabalho de investigação baseou-se num edifício, recentemente reabilitado, no Centro Histórico do Porto e que, ainda desocupado, foi sujeito a uma campanha de monitorização das temperaturas interiores. Com os dados desta monitorização foi possível efetuar a calibração de um modelo de simulação dinâmica multizona, de acordo com os critérios da ASHRAE e do IPMVP. Feita a calibração, simularam-se dois cenários. Um primeiro cenário em que se simulou a ocupação do edifício, tal como está, ou seja, reabilitado respeitando a preservação dos elementos arquitetónico-constructivos originais com a menor intrusividade possível. Um segundo cenário em que se simulou o edifício cumprindo os pressupostos da legislação atual para a reabilitação de edifícios residenciais [13, 14]. Por fim, um terceiro em que se seguiram os requisitos mínimos previstos para edifícios novos ou intervenções em componentes de edifícios [6, 15]. Compararam-se as temperaturas interiores registadas nos compartimentos principais, de novembro a fevereiro,



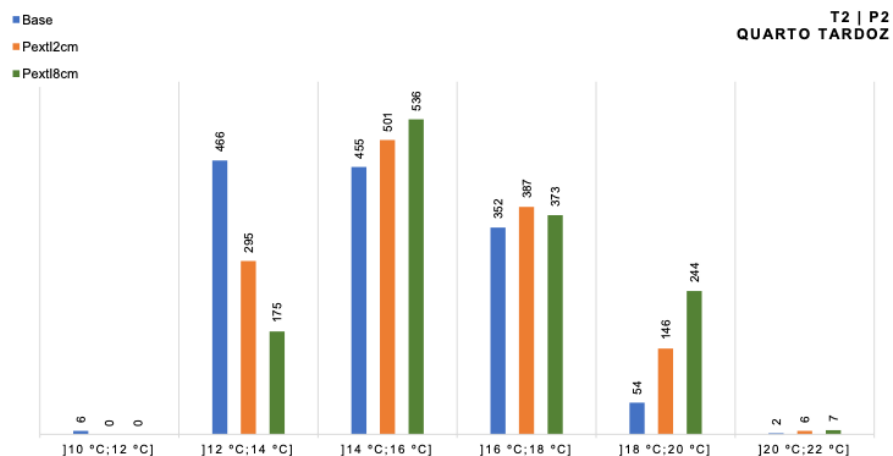
4



5



6



7

**Tabela 2** | Redução do número de horas com temperaturas inferiores a 16 °C (em relação à base)

novembro a fevereiro		T0 P0	T2 P1 Sala Frente	T2 P2 Quarto Frente	T2 P2 Quarto Tardoz
T < 16 °C	Pextl2cm	-11%	-13%	-14%	-14%
	Pextl8cm	-17%	-20%	-24%	-23%

Tabela 3 | Aumento do número de horas com temperaturas superiores a 27 °C (em relação à base)

junho a setembro		T0 P0 Sala Frente	T2 P1 Sala Frente	T2 P2 Quarto Frente	T2 P2 Quarto Tardoz
T > 27 °C	Pextl2cm	21%	28%	19%	36%
	Pextl8cm	30%	40%	30%	61%

no período ocupado de cada espaço e concluiu-se que a alteração no número de horas com temperaturas inferiores a 16 °C não é significativa e a colocação de isolamento térmico nas paredes exteriores neste tipo de edifícios, por uma questão meramente legislativa, não faz sentido pelo reduzido impacto que lhe está associado, com a agravante de se aumentar o risco de sobreaquecimento no verão uma vez que se constatou que o número de horas com temperaturas superiores a 27 °C aumentou.

A responsabilidade por parte do Estado Português de salvaguardar a identidade dos Centros Históricos, ou dos edifícios antigos mesmo que não classificados, não deveria estar tão condicionada pelas exigências regulamentares em termos da eficiência energética uma vez que, em regime de *free-float*, a aplicação de isolamento térmico em paredes exteriores tem um impacto reduzido nas temperaturas interiores dos espaços e, por consequência, no conforto térmico dos ocupantes, sendo um investimento com impacto negativo na preservação da autenticidade do património edificado.

AGRADECIMENTOS

A autora Alice Tavares agradece o apoio financeiro através de bolsa de pós-doutoramento à FCT, ao MCTES, ao FSE através do Programa Operacional Regional Centro e à UE, bem como ao CICECO e ao RISCO da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi apoiado pela Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (projeto POCI-01-0145-FEDER-008540), financiada pelos fundos FEDER, através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) – e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia ■

REFERÊNCIAS

- [1] Direção-Geral do Património Cultural, «DGPC | Centro Histórico do Porto, Ponte Luiz I e Mosteiro da Serra do Pilar». <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-mundial/portugal/centro-historico-do-porto/> (acedido Abr. 11, 2021).
- [2] Direção-Geral do Património Cultural, «DGPC | Património I Património Mundial em Portugal». <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-mundial/> (acedido Abr. 11, 2021).
- [3] Parlamento Europeu, «Diretiva (UE) 2018/844», 2018. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj?locale=pt> (acedido Abr. 08, 2021).
- [4] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia – Direção-Geral de Energia e Geologia, «Despacho (extrato) 15793-K/2013, 2013-12-03», *Diário da República Eletrónico*, 2013. <https://dre.pt/home/-/dre/2975224/details/maximized> (acedido Abr. 14, 2021).
- [5] SANTOS, Pina dos; MATIAS, Luís, ITE 50 – *Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Versão atualizada 2006*. LNEC.
- [6] Assembleia da República, «Lei 52/2018, 2018-08-20», *Diário da República Eletrónico*, Ago. 20, 2018. <https://dre.pt/pesquisa/-/search/116108098/details/maximized> (acedido Fev. 07, 2021).
- [7] Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), «Ficheiros climáticos de referência do SCE», 2016. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/sce-er/> (acedido Abr. 14, 2021).
- [8] D. R. Landsberg, J. A. Shonder, K. A. Barker, C. R. L. Hall, e D. T. Reindl, «ASHRAE Guideline 14-2014». 2014.
- [9] G. R. Ruiz e C. F. Bandera, «Validation of calibrated energy models: Common errors», *Energies*, vol. 10, n. 10, 2017, doi: 10.3390/en10101587.
- [10] International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP), «Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings, Volume I». 2002.
- [11] Presidência do Conselho de Ministros, «Decreto-Lei 95/2019, 2019-07-18», *Diário da República Eletrónico*, Jul. 18, 2019. <https://dre.pt/home/-/dre/123279819/details/maximized> (acedido Fev. 07, 2021).
- [12] Ministério do Ambiente e Transição Energética, «Portaria 297/2019, 2019-09-09», *Diário da República Eletrónico*, Set. 09, 2019. <https://dre.pt/home/-/dre/124539913/details/maximized> (acedido Fev. 07, 2021).
- [13] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, «Portaria 379-A/2015, 2015-10-22», *Diário da República Eletrónico*, 2015. <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/70789581/details/maximized> (acedido Abr. 18, 2021).
- [14] Ministério do Ambiente e Transição Energética, «Portaria 297/2019, 2019-09-09», *Diário da República Eletrónico*, Set. 09, 2019. <https://dre.pt/home/-/dre/124539913/details/maximized> (acedido Fev. 07, 2021).
- [15] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, «Portaria 379-A/2015, 2015-10-22», *Diário da República Eletrónico*, 2015. <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/70789581/details/maximized> (acedido Abr. 18, 2021).