

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESCOLAS ANTES E APÓS A REABILITAÇÃO

Francisca C. Barbosa^{1*}, Vasco P. de Freitas¹ e Manuela Almeida²

1: Construct-LFC

Faculdade de Engenharia

Universidade do Porto

e-mail: {francisca.barbosa, vpfreita}@fe.up.pt, web: <https://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/>

2: Departamento de Engenharia Civil

Escola de Engenharia

Universidade do Minho

e-mail: malmeida@civil.uminho.pt web: <http://www.civil.uminho.pt/index.php>

Palavras-chave: Edifícios escolares, reabilitação, protótipo, conforto, desempenho térmico

Resumo. *A grande maioria das escolas portuguesas caracteriza-se por um desconforto higrotérmico assinalável, em condições de serviço, resultante das características construtivas da envolvente, do perfil de ocupação das salas de aula e da falta de recursos financeiros para a gestão das escolas. Existem também muitos edifícios escolares degradados que irão exigir intervenções num futuro próximo. Nesse sentido, é necessário encontrar tecnologias construtivas que, atendendo à realidade climática, económica e cultural, conduzam a soluções com desempenho higrotérmico e conforto adequados.*

Existem em Portugal cerca de 100 escolas do modelo Brandão não reabilitadas. Atualmente, estão a ser efetuadas medições in situ de temperatura, humidade relativa, concentração de CO₂ e consumos energéticos numa sala de aula de um edifício escolar Brandão localizado no Porto (sala protótipo). Esta monitorização tem como objetivo avaliar as condições destas escolas em serviço.

No âmbito deste estudo, implementaram-se algumas medidas de reabilitação na sala de aula protótipo, nomeadamente na envolvente (isolamento da cobertura e proteções solares) e nos sistemas técnicos (ventilação e aquecimento), com o objetivo de encontrar um modelo otimizado que possa ser replicado em futuras intervenções.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados experimentais do desempenho térmico de uma sala tipo, antes da introdução de medidas de reabilitação, que caracterizam as escolas Brandão não reabilitadas, em serviço, e que permitem quantificar o desconforto durante o período de ocupação. Apresentam-se igualmente os resultados após a introdução das medidas de reabilitação e as correspondentes alterações no comportamento térmico do espaço e no conforto térmico dos utilizadores. Desenvolveram-se ainda indicadores de desconforto que facilitam o estudo comparativo de diferentes soluções de reabilitação.

1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos edifícios do parque escolar português caracteriza-se por um desconforto higrotérmico assinalável, em condições de serviço, resultante das características construtivas da envolvente, do perfil de ocupação das salas de aula e da falta de recursos financeiros para a gestão das escolas.

Em Portugal, as escolas são o local onde as crianças e jovens passam mais tempo a seguir à própria casa. Por esse motivo, justificam-se os esforços para assegurar um ambiente higrotérmico apropriado e uma qualidade do ar interior (QAI) que promova um ambiente saudável na sala de aula. Os valores baixos das renovações de ar em salas de aula estão relacionados com uma redução da atenção e vigilância que afeta negativamente a memória e a concentração [1, 2]. A redução das taxas de ventilação e permissão para variações de temperatura elevadas no interior da sala de aula podem reduzir a performance das crianças e jovens até 30% [3].

De 2007 a 2011, os edifícios escolares portugueses foram alvo de investimentos de construção na ordem dos 2400 milhões de euros. No total, foram reabilitadas em Portugal, no âmbito do programa de modernização Parque Escolar, cerca de 175 escolas secundárias, com um investimento unitário médio de construção de 13 milhões de euros (840 euros por metro quadrado segundo a Parque Escolar e 877 euros por metro quadrado segundo a Inspeção Geral de Finanças) [4, 5].

Apesar dos esforços, o Programa Parque Escolar não atingiu totalmente os resultados esperados. O investimento e a qualidade da intervenção foram elevados mas não tiveram em consideração a realidade económica das escolas, que conduziu à não utilização dos sistemas instalados. Almeida and de Freitas [6] estudaram diversas escolas reabilitadas e não reabilitadas e concluíram que, apesar de os resultados da QAI serem piores nas salas não reabilitadas, os resultados nas salas reabilitadas são diferentes dos esperados porque a ventilação mecânica e a climatização se encontram muitas vezes desativadas. De igual modo, nem sempre foi considerada a diversidade climática do país e a necessidade de adaptar as medidas de intervenção à localização dos edifícios. Por estes motivos, os edifícios reabilitados nem sempre têm as requeridas condições de conforto em serviço.

A necessidade de reabilitação dos edifícios escolares não terminou com o programa de modernização Parque Escolar. Das 5800 escolas públicas, continuam a necessitar de reabilitação, a curto prazo, centenas de escolas secundárias e escolas básicas do 1º, 2º e 3º ciclo que apresentam problemas ou anomalias por resolver. Considera-se que algumas das escolas que ficaram por reabilitar apresentam condições de utilização inaceitáveis.

A reabilitação de edifícios escolares é, portanto, um problema premente da sociedade portuguesa. Existem ainda muitos edifícios com baixo conforto e profundamente degradados que irão exigir intervenções num futuro próximo. É necessário encontrar tecnologias construtivas que, atendendo à realidade climática, económica e cultural, conduzam a soluções com desempenho higrotérmico e conforto adequados e que melhorem as condições de aprendizagem dos estudantes.

2. SITUAÇÃO PRÉ-EXISTENTE

Este estudo centra-se numa tipologia escolar do ensino básico, a tipologia *Brandão*, replicada por todo o país durante a década de 70 do século passado [7]. Estimam-se cerca de 100 escolas desta tipologia em todo o país.

O projeto é do tipo pavilhonar, composto por blocos de aulas com um piso único de planta quadrangular e pátio central descoberto (Figura 1) [8]. O acesso às salas de aula pode fazer-se pelo exterior, a toda a volta do edifício (circulação exterior). Alternativamente, a circulação pode fazer-se internamente, através dos espaços letivos. Nesse caso, o acesso não é independente e para aceder a uma sala é obrigatória a passagem pelas restantes salas do bloco de aulas.

Para a concretização do estudo desta tipologia escolar foi selecionada uma sala de aula tipo (Figura 1)

de uma escola do modelo *Brandão*, localizada na cidade do Porto, onde estão a ser efetuadas medições *in situ* de temperatura, humidade relativa, concentração de CO₂ e consumos energéticos. As escolas desta tipologia, não reabilitadas e com condições higrotérmicas em serviço desadequadas, têm muito baixos consumos energéticos, decorrentes da ausência de climatização.

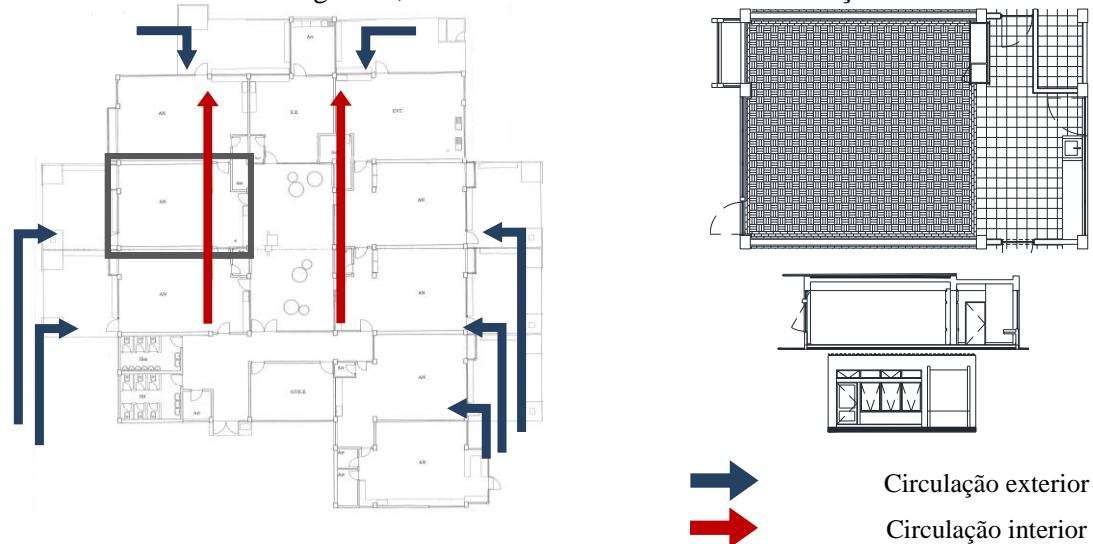


Figura 1. (esq.) Bloco de salas de aula. (dir.) Sala de aula em estudo.

O objetivo principal deste trabalho é a quantificação do desconforto no inverno nas escolas *Brandão* na situação pré-existente (regime de livre flutuação de temperatura, sem climatização) e após a construção do protótipo em três situações distintas: (a) regime de livre flutuação de temperatura; (b) estratégia de aquecimento reduzida (3h/dia) e (c) estratégia de aquecimento regular (10h/dia).

A quantificação do desconforto térmico antes e após a reabilitação permite comparar o desconforto nestas escolas na situação pré-existente e após uma intervenção minimalista de custos conhecidos. A introdução de estratégias de aquecimento complementa esta análise.

A quantificação do desconforto, associada à ocupação real do espaço, está na base da definição dos indicadores de desconforto. Estes permitirão, por um lado, quantificar a percentagem de tempo em que os ocupantes, em média, se sentem desconfortáveis (ou seja, acima ou abaixo de determinada referência) e, por outro lado, quantificar o esforço necessário para se atingir determinadas condições de conforto de referência. O índice de desconforto de inverno (ID_i) é definido como o somatório das diferenças positivas entre a temperatura de conforto (20°C) e a temperatura real, em °C.hora (equação 1). O ID_i é classificado como “base 20” quando a temperatura de conforto de referência é de 20°C.

$$ID_{i,b} = \sum_{t_i}^n (\theta_b - \theta_i), \text{ quando } \theta_i < \theta_b \quad (1)$$

onde $ID_{i,b}$ é o índice de desconforto na base definida, em °C.hora, t_i é cada período de tempo sequencial, θ_b é a temperatura de conforto de referência (temperatura base) e θ_i é a temperatura medida experimentalmente em cada t_i .

A percentagem de tempo de desconforto ($\%TD_b$) é definida como somatório dos intervalos de tempo em que existe desconforto (na base definida) sobre o somatório de todos os intervalos de tempo com ocupação (equação 2).

$$\%TD_b = \frac{\sum t_i \text{ com desconforto}}{\sum t_i \text{ com ocupação}} \quad (2)$$

3. PROJETO DE REABILITAÇÃO

A construção de um protótipo no âmbito deste trabalho tem como objetivo principal o estudo e otimização de um modelo que possa ser replicado em futuras intervenções. A monitorização experimental permitiu aferir as alterações no comportamento térmico do espaço e no conforto térmico dos utilizadores.

As intervenções implementadas nesta sala foram as seguintes (Figura 2):

- ✓ Introdução de um sistema de aquecimento elétrico;
- ✓ Construção de uma divisória que distinga a zona útil da sala de aula e a zona de circulação;
- ✓ Introdução de um sistema de ventilação com entrada natural de ar exterior filtrado e saída forçada por um sistema mecânico;
- ✓ Instalação de um vão envidraçado no solário;
- ✓ Instalação de estores exteriores;
- ✓ Introdução de isolamento na cobertura;
- ✓ Pequenas intervenções de melhoramento do estado geral.



Figura 2. Intervenções na sala de aula protótipo.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Situação pré-existente

Em regime de flutuação de temperatura e antes da introdução de qualquer medida de reabilitação, a flutuação de temperatura no interior da sala de aula toma a forma da Figura 3. Observam-se picos de temperatura durante a ocupação, correspondendo a ganhos solares e ganhos internos, mas existe uma clara situação de desconforto, com temperaturas inferiores a 18°C na maior parte do tempo de ocupação.

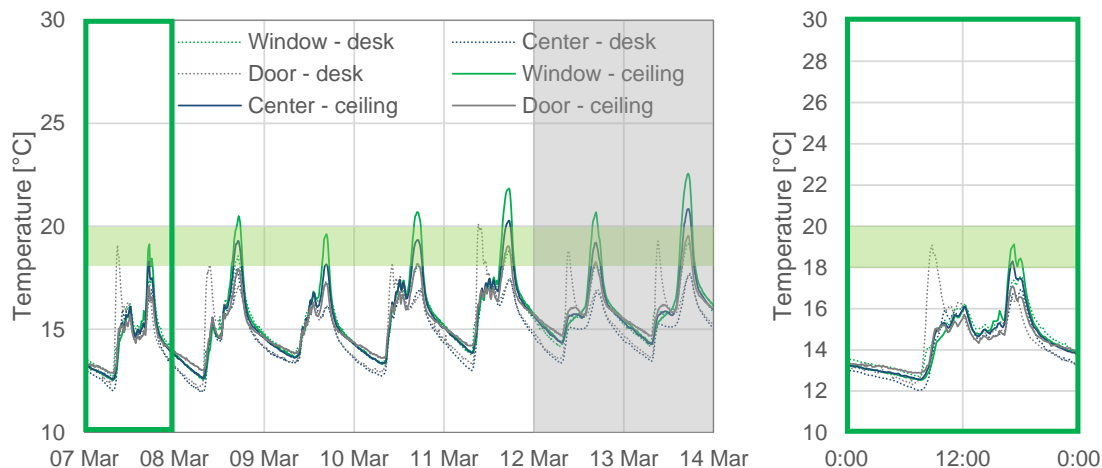


Figura 3. Flutuação de temperatura nos diferentes pontos de medição numa semana de inverno na situação pré-existente.

O cálculo dos indicadores de desconforto na base 20 para as semanas de inverno de 2016 revela a existência de desconforto em 100% do tempo de ocupação (Figura 4, à esquerda). Observando com mais detalhe uma semana tipo (7 a 11 de março), a temperatura média interior dentro da sala de aula é praticamente sempre inferior a 18°C, durante o período de ocupação (Figura 4, à direita). Nesta análise apenas se considera o período de ocupação uma vez que se pretende garantir o conforto nesse período.

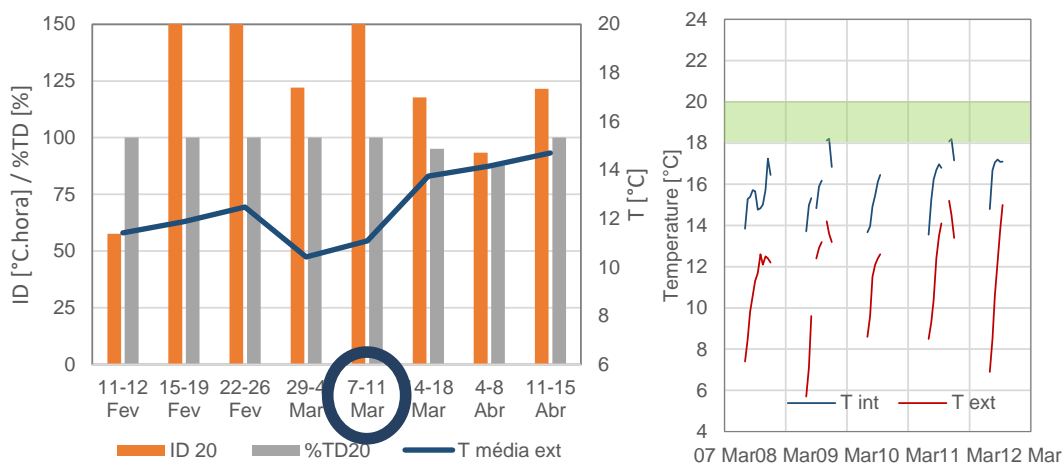


Figura 4. (esq.) ID_{20} e $\%TD$ em diferentes semanas de inverno na situação pré-existente. (dir.) Temperatura média interior e exterior numa semana de inverno durante o período de ocupação.

4.2. Após construção do protótipo

Depois da construção do protótipo e utilizando o sistema de aquecimento, a flutuação de temperatura no interior da sala de aula numa semana de inverno de 2018 toma a forma da Figura 5. Observa-se uma importante estratificação da temperatura, com temperaturas mais elevadas ao nível do teto e temperaturas de conforto ao nível das mesas de trabalho dos estudantes.

Nesta fase estabeleceram-se três estratégias de climatização distintas, que permitiram observar o comportamento da sala de aula perante diferentes solicitações e avaliar o desconforto em cada uma delas: (a) regime de livre flutuação de temperatura no interior da sala, ou seja, ausência de climatização (b) estratégia de aquecimento reduzida, durante 3 horas ao início da manhã, com uma potência instalada de 4 kW e (c) estratégia de aquecimento regular, durante todo o dia de aulas (10 horas), com a mesma potência instalada.

O cálculo dos indicadores de desconforto na base 20 para as semanas do inverno de 2018 em livre flutuação de temperatura revela a existência de desconforto em 100% do tempo de ocupação (Figura 6, à esquerda), embora os valores do ID_{20} tenham reduzido consideravelmente quando comparados com os valores da situação pré-existente (de 140 °C.hora para 95 °C.hora, em média).

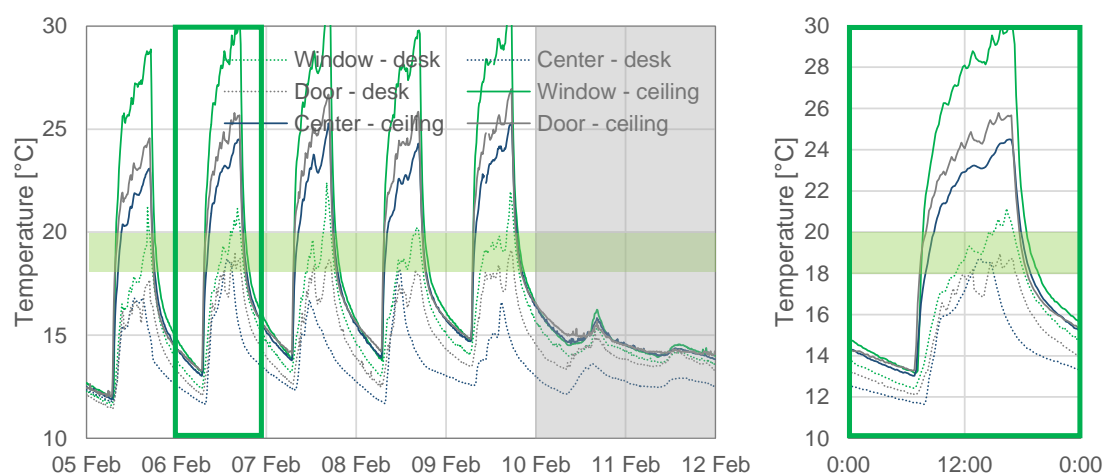


Figura 5. Flutuação de temperatura nos diferentes pontos de medição numa semana de inverno após a construção do protótipo.

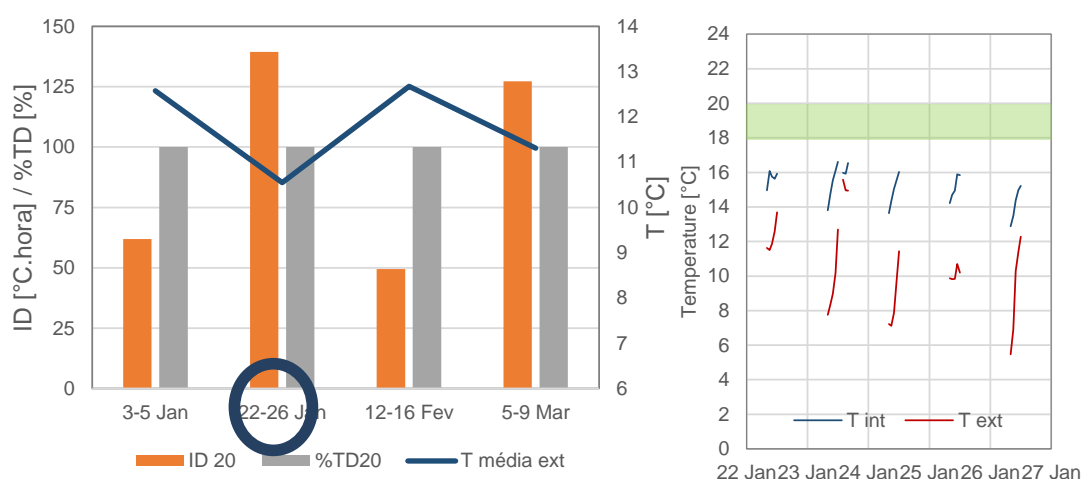


Figura 6. (esq.) ID_{20} e %TD em diferentes semanas de inverno após a construção do protótipo – estratégia (a). (dir.) Temperatura média interior e exterior numa semana de inverno durante o período de ocupação.

O cálculo dos indicadores de desconforto na base 20 para a estratégia de aquecimento (b) revela a redução do tempo de desconforto para cerca de 80% (Figura 7, à esquerda) e também uma redução importante dos valores do ID_{20} quando comparados com a situação em livre flutuação de temperatura (de 95 °C.hora para 56 °C.hora, em média). Observando com mais detalhe uma semana tipo (29 de janeiro a 2 de fevereiro), a temperatura média interior dentro da sala de aula situa-se entre os 18°C e os 20°C, durante o período de ocupação (Figura 7, à direita) e atinge um valor máximo ao final das três horas de aquecimento e uma redução a partir desse momento.

O cálculo dos indicadores de desconforto na base 20 para a estratégia de aquecimento (c) revela a redução do tempo de desconforto para cerca de 30% (Figura 8, à esquerda). Apesar de a temperatura média exterior ter sido mais exigente nestas semanas (situação que não é possível controlar experimentalmente) observa-se uma redução significativa dos valores do ID_{20} quando comparados com a estratégia de aquecimento (b) (de 56 °C.hora para 13 °C.hora, em média). Esta redução poderia ser ainda maior se estivessemos a considerar as mesmas condições exteriores. Observando com mais detalhe uma semana tipo (15 a 19 de janeiro), a temperatura média interior é superior a 18°C e em alguns momentos atinge os 22°C, durante o período de ocupação (Figura 8, à direita).

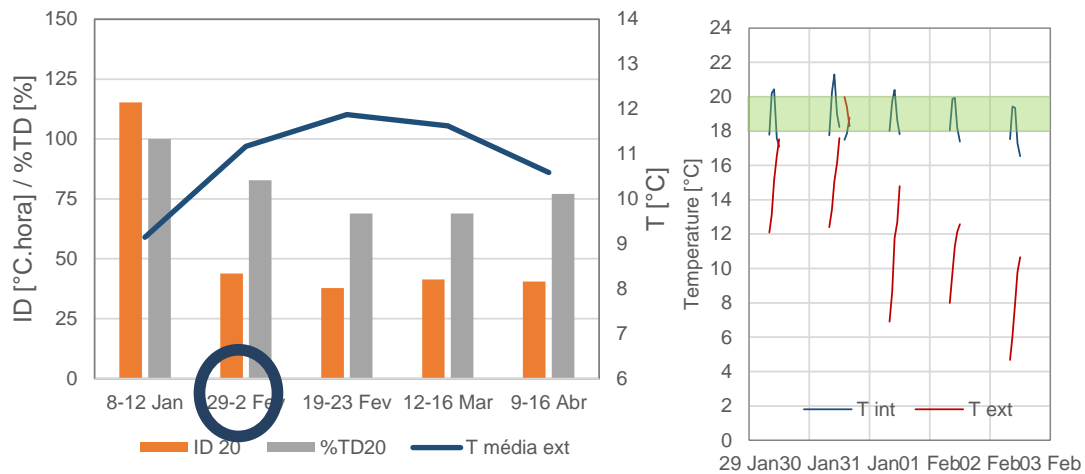


Figura 7. (esq.) ID_{20} e %TD em diferentes semanas de inverno após a construção do protótipo – estratégia (b). (dir.) Temperatura média interior e exterior numa semana de inverno durante o período de ocupação.

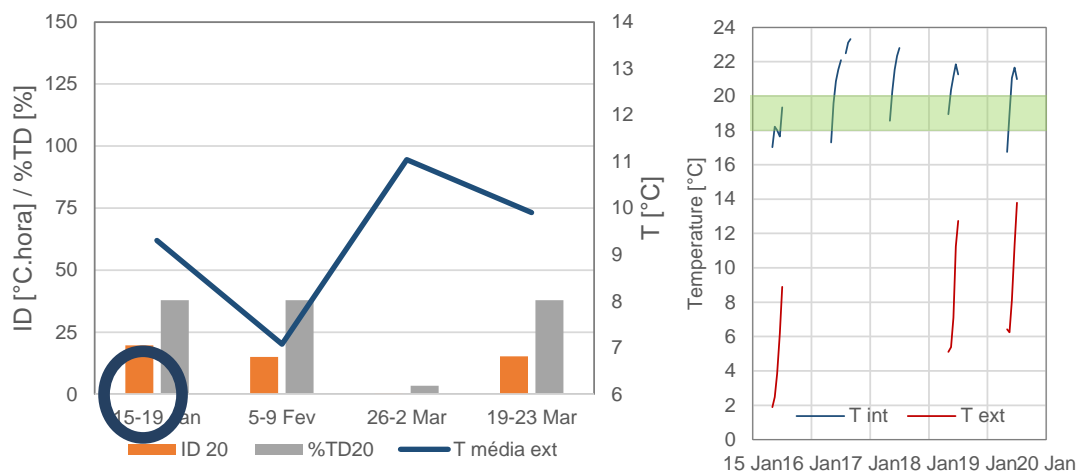


Figura 8. (esq.) ID_{20} e %TD em diferentes semanas de inverno após a construção do protótipo – estratégia (c). (dir.) Temperatura média interior e exterior numa semana de inverno durante o período de ocupação.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi quantificado o desconforto numa escola *Brandão* tipo na situação atual e foi proposta uma intervenção de reabilitação minimalista que permitiu reduzir este desconforto. A reabilitação incluiu intervenções na envolvente da sala de aula protótipo e nos sistemas de aquecimento e ventilação.

Após a intervenção quantificou-se o desconforto sentido pelos estudantes em três situações distintas: (a) livre flutuação de temperatura, sem qualquer climatização; (b) estratégia de aquecimento de 3 horas/dia ao início da manhã; (c) estratégia de aquecimento regular de 10 horas/dia. Contabilizam-se as alterações na temperatura do ar interior associadas às estratégias de aquecimento de baixos consumos.

A comparação dos ID_{20} e %TD da situação pré-existente e após a reabilitação no período de ocupação revelou uma redução do ID_{20} (de 140 °C.hora para 95 °C.hora, em média), embora a %TD se tenha mantido sensivelmente a mesma.

A comparação dos ID_{20} e %TD das três estratégias de climatização pós-reabilitação revelou uma redução do desconforto em ambos os indicadores da estratégia (a) para a estratégia (b) e da estratégia (b) para a estratégia (c) (de 95 °C.hora para 56 °C.hora e de 56 °C.hora para 13 °C.hora, em média, respetivamente).

Os consumos energéticos semanais nas três situações correspondem aproximadamente a 0 kWh, 60 kWh e 200 kWh, respetivamente para as estratégias (a), (b) e (c).

A comparação das três estratégias de climatização pós-reabilitação permitiu concluir que a temperatura de conforto de 20°C no inverno implica um aquecimento de 10 horas/dia e corresponde a um consumo energético semanal na ordem dos 200 kWh.

6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros referem-se acertos na campanha experimental, nomeadamente o início do horário de aquecimento nas estratégias (b) e (c), uma vez que se verifica um certo desconforto nas primeiras horas da manhã.

Deverá ser feita igual análise para o período de verão, antes e após reabilitação.

Este modelo experimental servirá para validar com maior robustez o modelo numérico criado no *software* Wufi Plus e simular diferentes estratégias de intervenção nas escolas *Brandão*.

O objetivo final deste trabalho é uma proposta de recomendações práticas e exigências funcionais para a reabilitação dos edifícios *Brandão* em diferentes localizações climáticas, que sirvam o propósito de apoio à decisão.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.; Bolsa FCT PD/BD/52658/2014.



REFERÊNCIAS

- [1] Z. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi, and M. J. Williams, "Ventilation rates in schools and pupils' performance," *Building and Environment*, vol. 48, pp. 215-223, 2// 2012.
- [2] T. M. Stafford, "Indoor air quality and academic performance," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 70, pp. 34-50, 3// 2015.
- [3] P. Wargocki and D. P. Wyon, "Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective," *Building and Environment*, vol. 59, pp. 581-589, 1// 2013.
- [4] Parque Escolar - Programa de Modernização das Escolas do Ensino Secundário. (2016, 09.2016). Análise dos Custos de Construção. Available: <https://www.parque-escolar.pt/pt/>
- [5] Inspeção Geral das Finanças, "Auditoria à empresa Parque Escolar, EPE - Proc. n.º 2011/31/A3/455 - Relatório n.º 1615/2011 " Inspeção Geral das Finanças 2011.
- [6] R. M. S. F. Almeida and V. P. de Freitas, "Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 127-40, 2014.
- [7] A. Alegre, Liceus, Escolas Técnicas e Secundárias. Lisboa: Parque Escolar, 2010.
- [8] Instituto da Construção (IC) and Laboratório de Física das Construções (LFC), "Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo - Escola EB 2,3 de Paranhos - Câmara Municipal do Porto," Instituto da Construção, Porto 2009.