

# **MITIGAÇÃO DO GÁS RADÃO EM SALAS FECHADAS: MEDIDAS DE CORREÇÃO EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS COM RESTRIÇÕES DE INTERVENÇÃO**

ANTÓNIO CURADO 1,\*, LEONEL J.R. NUNES 1,2,3

**1 proMetheus, Unidade de Investigação em Materiais, Energia e Ambiente para a Sustentabilidade, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Rua da Escola Industrial e Comercial de Nun'Alvares, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal; leonelnunes@esa.ipvvc.pt (L.J.R.N.)**

**2 DEGEIT, Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal**

**3 GOVCOPP, Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal**

**Corresponding author: acurado@estg.ipvvc.pt (A.C.)**

## **RESUMO**

A concentração de gás radão (Rn) em espaços interiores representam um risco significativo para a saúde, uma vez que a Organização Mundial de Saúde (OMS) classifica o Rn como a segunda principal causa de cancro do pulmão. Os métodos tradicionais de mitigação, como a ventilação, reduzem eficazmente os níveis de concentração. No entanto, em edifícios históricos e classificados como património, com restrições de intervenção, são necessárias técnicas alternativas de remediação. Esta investigação examina a implementação de estratégias de mitigação construtivas, incluindo membranas de proteção e argamassas de revestimento adequadas à selagem das superfícies, num edifício de importância arquitetónica onde a aplicação de sistemas de ventilação convencional é uma solução de difícil implementação. O estudo iniciou-se com uma campanha de monitorização do gás Rn de longo prazo, que revelou existir uma concentração extremamente elevada. Posteriormente, foi aplicada uma membrana de proteção contra o gás radão no chão da sala de ensaio, conseguindo-se uma redução de 90% na concentração no seu interior. Apesar desta diminuição substancial, o nível manteve-se acima do limiar recomendado legalmente de 300 Bq.m<sup>-3</sup>. Para reforço do processo de mitigação, foi posteriormente aplicada uma argamassa de revestimento nas paredes da sala de ensaio, seguida de uma campanha adicional de

monitorização da concentração de gás radão de longo prazo, de modo a poder avaliar o efeito combinado das medidas construtivas. A estratégia de atenuação integrada resultou numa redução de 94% da concentração média de Rn no interior. No entanto, o valor medido excedeu ainda assim o limite legal. Embora a redução obtida evidencie a eficácia das medidas de remediação aplicadas, a monitorização contínua associada à implementação de potenciais soluções de mitigação suplementares são medidas essenciais para satisfazer os requisitos legais sem comprometer o valor histórico deste tipo de edifício.

**Palavras-chave:** Concentração de gás radão em recintos fechados; técnicas de mitigação e remediação; edifícios históricos; reabilitação; avaliação da concentração de gás radão.

## 1 INTRODUÇÃO

O gás radão (Rn) é um gás radioativo de ocorrência natural, incolor e inodoro, sendo a sua inalação responsável por mais de 40% da exposição da população à radiação ionizante, constituindo como tal a maior fonte natural (Kreuzer e Mclaughlin, 2010; Damla e Aldemir, 2014; Maya et al., 2020; Shakoor et al., 2022). A exposição prolongada ao Rn em recintos fechados é a segunda principal causa de cancro do pulmão, a seguir ao tabaco, e é a principal causa entre os não fumadores (Neuberger e Gesell, 2002). A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que a exposição ao gás radão causa entre 3 e 14% dos cancros do pulmão a nível mundial e, na Europa, o Rn é responsável por 9% das mortes por cancro do pulmão, o que representa cerca de 2% de todas as mortes por cancro (Gaskin et al., 2018).

Algumas áreas geológicas são mais propensas a elevados níveis de Rn no interior dos edifícios, e estas podem ser identificadas utilizando mapas de suscetibilidade ao gás radão criados a partir de inquéritos abrangentes baseados em campanhas de monitorização extensivas (Cori et al., 2022). O Rn entra nos edifícios através das fissuras do chão e das paredes ou diretamente a partir solo e dos muros de suporte (Ippolito e Remetti, 2019). A exposição ao Rn no interior dos edifícios pode ser reduzida através de medidas preventivas tomadas durante a construção de novos edifícios ou através de medidas corretivas ou de remediação para edifícios existentes (Nunes et al., 2022; Yarmoshenko et al., 2022; Nunes e Curado, 2023).

O estudo em curso avalia a eficácia de um programa de mitigação do Rn num edifício histórico onde funciona uma instituição de ensino superior, através de um processo de adaptação faseado. O programa incluiu três fases progressivas no processo de mitigação: i) aplicação de uma membrana de proteção contra o gás radão no pavimento, ii) revestimento das paredes envolventes com argamassa de proteção e iii) selagem das fendas das portas e janelas para evitar a migração do gás. O objetivo principal é avaliar o impacto destas medidas de mitigação na concentração de Rn no interior de um edifício histórico onde os sistemas

de ventilação mecânica são limitados e como tal pouco efetivos no combate ao problema.

Uma sala de ensaio no rés do chão do edifício foi submetida a uma avaliação completa da concentração de Rn em três fases distintas, utilizando ensaios de medição de longa duração ao longo de três meses por fase. Os resultados foram medidos antes da implementação de quaisquer medidas de mitigação do Rn, após a aplicação de uma barreira de membrana contra o gás radão no pavimento e após a instalação de um revestimento de parede feito de argamassa resistente à migração do Rn. O estudo tem como objetivo analisar o impacto destas medidas de mitigação na concentração de radão no interior de um edifício localizado no Norte de Portugal, região crítica de um ponto geológico a uma elevada concentração interior do gás radão.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Enquadramento**

O edifício utilizado como estudo de caso é uma Escola Superior Agrária no Norte de Portugal. O campus estende-se por cerca de 17 hectares e inclui instalações agrícolas e pecuárias, pomares experimentais, vinhas, olivais, estufas, edifícios académicos e alojamento para estudantes. O edifício académico principal é um impressionante Mosteiro do século XII, património arquitetónico e monumento nacional que sofreu várias alterações e restauros ao longo do tempo.

A obra de renovação do mosteiro foi projetado por arquitectos de elevada qualidade, transformando-o num edifício escolar preparado para ser centro de um campus de uma escola agrária. A estrutura principal do edifício é composta por duas partes: um corpo do século XVI, com uma igreja e um claustro central, e um anexo do século XVIII, rodeado por um pátio para atividades agrícolas. O edifício é composto por alvenaria de granito local, construído em socalcos ao longo da encosta.

De um ponto de vista geológico, a escola agrária está implantada sobre terrenos de diversas litologias e características estruturais, sendo o granito o tipo de rocha predominante na região. O principal tipo de rocha existente no local são granitos de duas micas com megacristais de feldspato, que estão fortemente fraturados por um sistema de falhas com orientação Norte-Sul. Esta fraturação pode contribuir para as elevadas concentrações de gás radão encontradas na área, resultando no aumento dos níveis de Rn no interior dos espaços fechados..

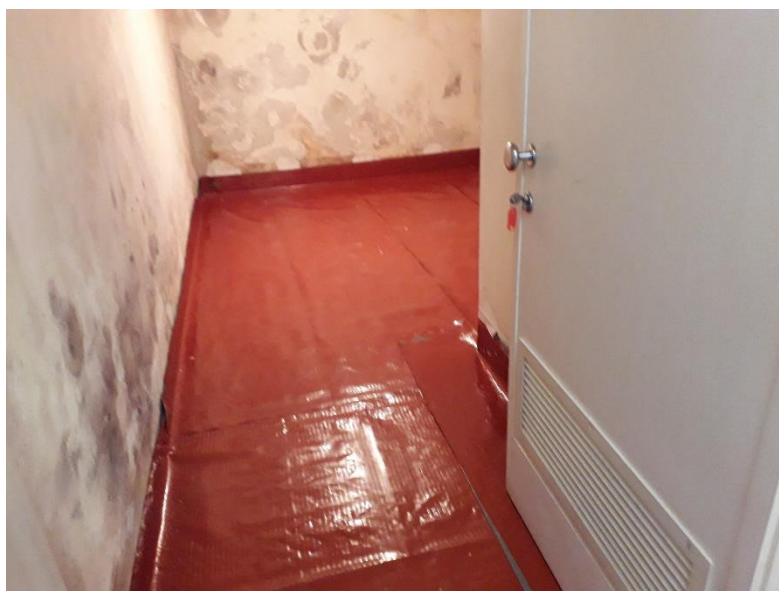
A entrada principal do edifício orientada a Norte, enquanto o lado Sul está aproximadamente 6 metros abaixo, conduzindo a um pátio interior rodeado por salas diversas atualmente utilizadas para fins educativos. A sala de ensaio selecionada para o estudo da concentração de Rn em

ambiente interior está em contacto direto com o substrato geológico (solo e rocha) ao nível do pavimento, e parcialmente ao nível das paredes.

## **2.2 Monitorização e aquisição de dados**

A concentração de gás radão em ambiente interior foi medida numa sala de ensaio com 12,6 m<sup>2</sup>, implantada no rés-do-chão do edifício escolar representado na Figura 1. O período de medição in situ decorreu entre 13 de março de 2019 e 16 de novembro de 2021. Durante um período prévio de monitorização de curto prazo, estendido à totalidade do edifício em 2018, foi identificada uma concentração do gás radão em ambiente interior invulgarmente elevada em áreas específicas do edifício, o que levou à seleção de um conjunto alargado de salas para implementar uma estratégia de remediação do problema. Para dar começo ao processo de remediação, foi implementado um processo de monitorização de longo prazo, ao longo de um período mínimo de três meses, que incluiu três fases distintas mas complementares, reportando com uma delas a uma medida construtiva de mitigação da elevada concentração de gás radão. As sondas utilizadas no processo de medição experimental são da marca AirThings Corentium Plus Radon Monitor, modelo QRI, utilizada para o efeito em todas as fases de monitorização para garantir a consistência das medições.

**Figura 1 - Sala utilizada como estudo de caso**



Para garantir que os erros relacionados com o equipamento não afetassem a monitorização da concentração de Rn no interior dos espaços, foram utilizadas duas sondas e os dados foram comparados com recurso à média e à variância. Os testes estatísticos t-Student e F-

Snedecor foram utilizados para comparação e os resultados e excederam o valor de 0,5, indicando que não havia diferenças significativas. Por conseguinte, os conjuntos de dados foram combinados através do cálculo do valor médio de cada par de medições, resultando num único conjunto de dados para cada fase de monitorização.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das três fases da monitorização da concentração de Rn em recintos fechados, que foram determinados com recurso à combinação dos dados dados monitorizados pelas duas sondas, são apresentados no Quadro 1.

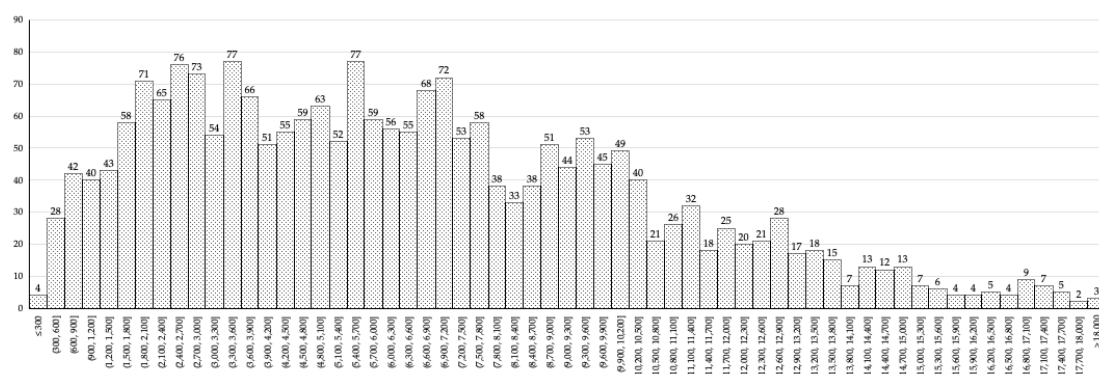
**Tabela 1 - Dados resumidos das fases de monitorização**

	<b>FASE I</b>	<b>FASE II (a)</b>	<b>FASE II (b)</b>	<b>FASE III</b>
Período de monitorização	13/03/2019 to 13/06/2019	03/08/2019 to 03/12/2019	19/02/2021 to 12/05/2021	25/06/2021 to 16/11/2021
N.º de medições	2205	2180	1970	3457
Valor médio	6459 Bq·m <sup>-3</sup>	637 Bq·m <sup>-3</sup>	9052 Bq·m <sup>-3</sup>	373 Bq·m <sup>-3</sup>
Desvio padrão	3883 Bq·m <sup>-3</sup>	475 Bq·m <sup>-3</sup>	2572 Bq·m <sup>-3</sup>	207 Bq·m <sup>-3</sup>
Valor mínimo	134 Bq·m <sup>-3</sup>	22 Bq·m <sup>-3</sup>	59 Bq·m <sup>-3</sup>	4 Bq·m <sup>-3</sup>
Valor máximo	18,738 Bq·m <sup>-3</sup>	3407 Bq·m <sup>-3</sup>	15,312 Bq·m <sup>-3</sup>	1129 Bq·m <sup>-3</sup>

Durante a monitorização da Fase I, realizada entre 13 de março de 2019 e 13 de junho de 2019, foi efectuado um total de 2205 medições em intervalos de uma hora. A concentração média de Rn no interior foi de 6459 Bq.m-3, com um desvio padrão de 3853 Bq.m-3. Este elevado desvio padrão significa uma variação substancial nos valores obtidos, como demonstrado pelo valor mínimo de 134 Bq.m-3 e o valor máximo de 18.738 Bq.m-3, devido ao efeito sazonal da libertação de radão do solo. Essencialmente, houve uma diferença de 18.604 Bq.m-3 entre as concentrações mais baixas e mais altas de Rn no interior do compartimento, indicando flutuações consideráveis nos resultados. Ao analisar a distribuição das medições em intervalos sucessivos de 300 Bq.m-3, verificou-se que apenas quatro valores se situavam no intervalo

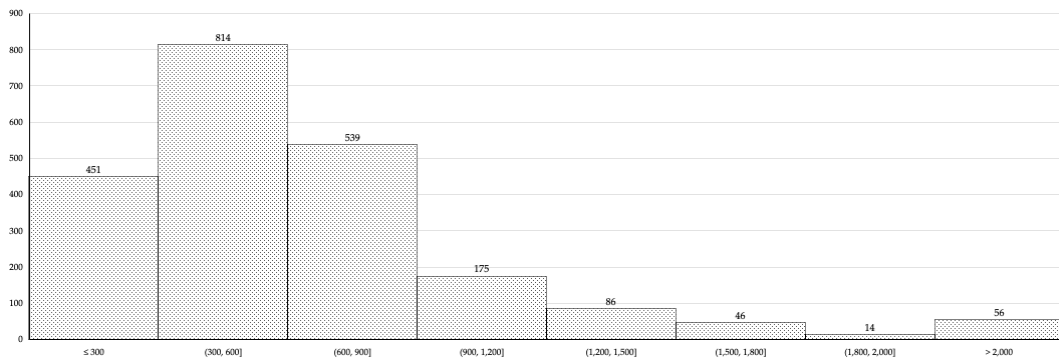
[0; 300] Bq.m-3. Apenas 0,002% estavam abaixo do limite recomendado para a exposição dos ocupantes, enquanto os restantes 99,998% excediam o limite de exposição sugerido. A Figura 2 ilustra a distribuição dos resultados obtidos em categorias com incrementos sucessivos de 300 Bq.m-3.

**Figura 2 - Distribuição das medições na avaliação preliminar (N.º de medições por intervalo de resultados da concentração de gás radão)**



A figura 2 mostra claramente que é necessária uma medida de mitigação para resolver a concentração de Rn no interior. Devido às limitações construtivas da sala de ensaio, a ventilação natural não é possível e a utilização da porta de acesso para ventilação não é aconselhável. Por conseguinte, foi utilizada uma membrana de proteção contra o gás radão para evitar a infiltração e a acumulação de Rn no interior do compartimento. Foi escolhida uma membrana de proteção da marca Monarflex RMB350 para este estudo de caso. Após a aplicação da membrana de proteção contra o gás radão, foi realizada uma nova fase de monitorização da concentração de Rn no interior do espaço em questão, de 3 de agosto a 3 de dezembro de 2019, com 2180 medições efectuadas em intervalos de uma hora. Os resultados mostraram um valor médio de 637 Bq.m-3 e um desvio padrão de 475 Bq.m-3, com um valor mínimo registado de 22 Bq.m-3 e um máximo de 3407 Bq.m-3. A distribuição das medições em intervalos sucessivos com incrementos de 300 Bq.m-3 revelou uma distribuição mais equilibrada e uma redução significativa da concentração de Rn no interior, com uma diminuição de 90,14% no valor médio registado em comparação com a avaliação preliminar da Fase I, conforme registado na Figura 3.

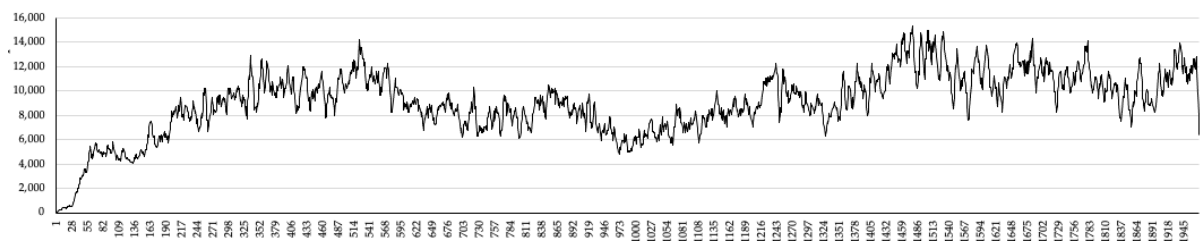
**Figura 3-Distribuição das medições após a membrana de barreira(N.º de medições por intervalo de resultados da concentração de gás radão)**



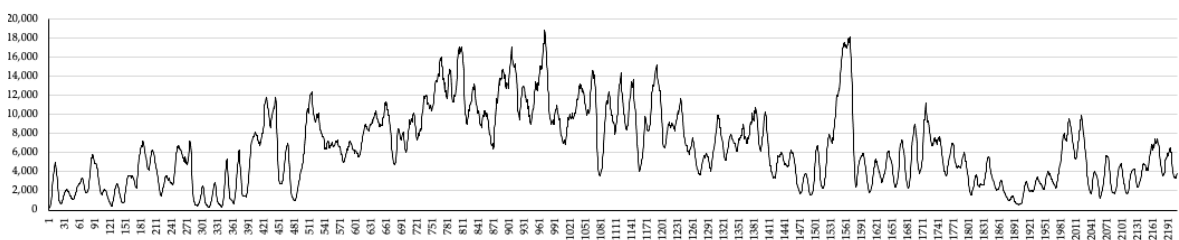
Após a aplicação da membrana de proteção, a maioria das medições da concentração de Rn no interior da sala de ensaio situou-se no intervalo [300; 2000] Bq.m-3, com apenas uma pequena percentagem acima de 2000 Bq.m-3. No entanto, os valores ainda excediam o limite recomendado de 300 Bq.m-3. Para determinar se os compartimentos vizinhos contribuíram para a concentração de Rn interior ao espaço em análise, a porta de acesso foi selada com a membrana de proteção. A monitorização da Fase II(b) registou um valor médio de 9052 Bq.m-3, semelhante ao da Fase I. Os resultados mostraram uma tendência cumulativa, e a distribuição das medições em intervalos de classe confirmou este facto (Figuras 4 e 5).

**Figura 4 - Evolução dos resultados da medição da concentração de Rn no interior. (a) Após a selagem da porta; (b) Resultados da Fase I. (concentração de gás radão em função do número de medições)**

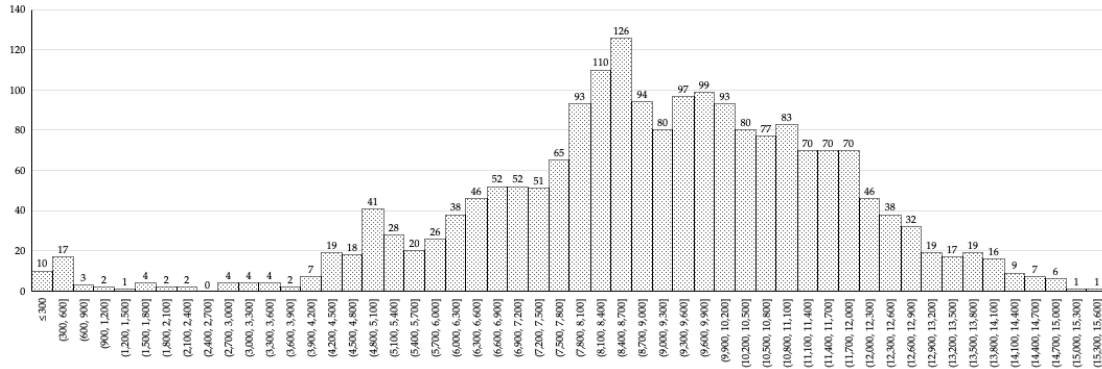
(a)



(b)



**Figura 5 - Medições após a selagem da porta (N.º de medições por intervalo de resultados da concentração de gás radão)**

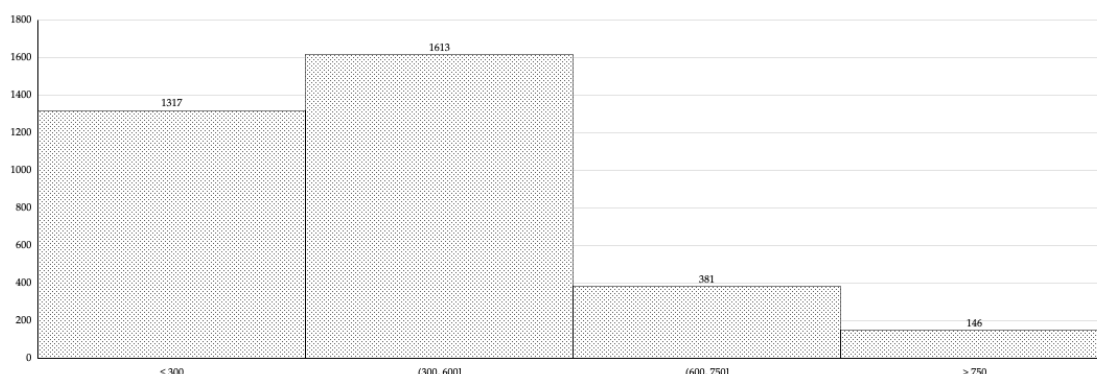


A distribuição de frequência das ocorrências de concentração de Rn no recinto fechado em estudo está concentrada no intervalo de [4200; 14.100] Bq.m-3, indicando uma tendência cumulativa distinta. O compartimento contribui provavelmente para a transferência de Rn para os compartimentos vizinhos através da porta de acesso, especialmente quando existem diferenças de pressão ou movimento de ar. Este facto mostra que a membrana de proteção contra o gás radão, por si só, não consegue impedir completamente a emissão de Rn, sendo necessárias medidas de mitigação adicionais, como a aplicação de uma argamassa de revestimento nas paredes. Para este estudo, a opção selecionada é um revestimento de argamassa anti-radão WATERFIN PV.

Na Fase III, realizada entre 25 de junho de 2021 e 16 de novembro de 2021, com 3457 medições efectuadas a intervalos de uma hora, o valor médio da concentração de Rn no interior foi de 373 Bq.m-3 com um desvio padrão de 207 Bq.m-3. Embora os resultados ainda apresentem uma variação significativa, o intervalo é menor do que nas fases anteriores, com um mínimo de 4 Bq.m-3 e um máximo de 1129 Bq.m-3. A análise de frequência na Figura 5 revela uma redução significativa na concentração de Rn no interior após a aplicação da argamassa de revestimento, com uma diminuição de 41,44% em comparação com a monitorização efectuada após a aplicação da membrana de barreira, como se mostra na Figura 6.

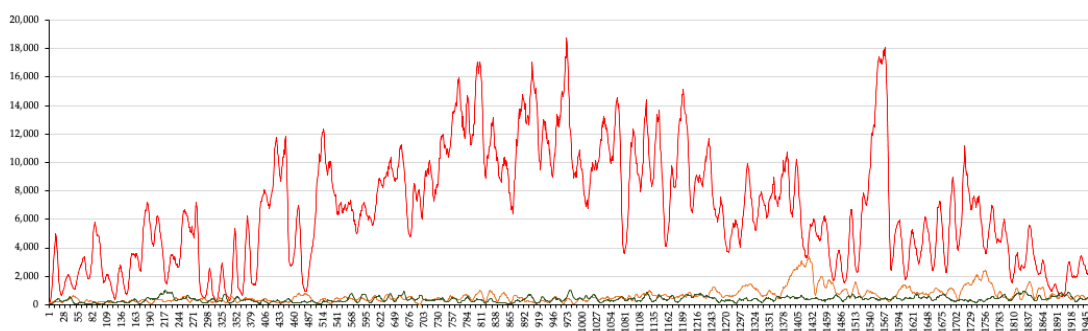


**Figura 6 - Medições após a aplicação da argamassa (N.º de medições por intervalo de resultados da concentração de gás radão)**



Após a aplicação da argamassa de revestimento nas paredes, cerca de 38,90% das medições ficaram dentro do intervalo recomendado, enquanto 4,22% ainda estavam acima do limite (Figura 7). No entanto, a maioria dos resultados (57,68%) ainda excedia o valor recomendado para a exposição humana. A combinação da membrana de barreira e da argamassa de revestimento levou a uma diminuição de 94,23% na concentração de Rn no interior. A evolução dos dados nas diferentes fases de monitorização demonstra uma redução significativa dos níveis de Rn no ar interior.

**Figura 7 - Dados recolhidos nas fases de monitorização (avaliação inicial, após aplicação de da membrana anti-radão e após aplicação da argamassa)**



Embora as medidas de construção implementadas tenham resultado numa redução de 94% na concentração de Rn em recintos fechados, os valores registados continuam a exceder frequentemente o limite recomendado de 300 Bq.m<sup>-3</sup>. No entanto, este facto não indica que as

medidas sejam ineficazes, uma vez que a sua eficácia pode variar em função da gravidade da situação. Além disso, a aplicação destas medidas durante a construção de novos edifícios em zonas com elevado potencial de emissão de Rn, juntamente com outras medidas como caixas de ar e sistemas de ventilação, poderia aumentar a sua eficácia na redução da concentração de Rn em recintos fechados. É também crucial adotar estratégias de monitorização contínua da concentração de Rn em recintos fechados, incluindo sistemas IoT, para identificar situações em que a concentração de Rn ultrapassa os níveis seguros, permitindo aos utilizadores tomar precauções.

#### **4. CONCLUSÕES**

Garantir uma boa qualidade do ar interior nos edifícios é uma preocupação crescente para os ocupantes devido à sua ligação a problemas de saúde. A concentração de gás radão no interior dos edifícios é a segunda principal causa de cancro do pulmão, o que a torna uma preocupação crescente tanto em espaços residenciais como comerciais. A ventilação natural é muitas vezes a solução, mas em alguns casos, como em edifícios arquitetonicamente significativos ou em locais de património, devem ser utilizadas medidas de construção alternativas. A utilização de medidas aplicáveis no interior, como membranas de barreira e argamassas de revestimento de paredes, pode ajudar a mitigar as concentrações de gás radão no interior e reduzir a exposição dos ocupantes à radiação natural. No estudo de caso analisado, foi alcançada uma redução de 94% na concentração de Rn no interior combinando duas medidas de construção. No entanto, a concentração de Rn no interior continua a exceder o valor recomendado, o que exige um conjunto adicional de ensaios e de campanhas de monitorização em vários cenários para validar a eficácia geral destas soluções de construção.

#### **FINANCIAMENTO**

Este trabalho resulta do projeto TECH-Tecnologia, Ambiente, Criatividade e Saúde, Norte-01-0145-FEDER-000043, apoiado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), no âmbito do Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). L.J.R.N. foi apoiado pelo proMetheus-Unidade de Investigação em Energia, Materiais e Ambiente para a Sustentabilidade-UIDP/05975/2020, financiado por fundos nacionais através da FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia. A.C. foi coautor deste trabalho no âmbito do projeto proMetheus, Unidade de Investigação em Materiais, Energia e Ambiente para a Sustentabilidade, FCT Ref. UID/05975/2020, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES.

## REFERENCES

CORI, L. et al. The role of risk communication in radon mapping, risk assessment and mitigation activities in Sardinia (Italy). **Advances in Geosciences**, v. 57, p. 49-61, 2022. ISSN 1680-7359.

DAMLA, N.; ALDEMIR, K. Radon survey and soil gamma doses in primary schools of Batman, Turkey. **Isotopes in environmental and health studies**, v. 50, n. 2, p. 226-234, 2014. ISSN 1025-6016.

GASKIN, J. et al. Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. **Environmental health perspectives**, v. 126, n. 5, p. 057009, 2018. ISSN 0091-6765.

IPPOLITO, R.; REMETTI, R. Radon entry models into buildings versus environmental parameters, building shape and types OF foundation. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 236, p. 309-316, 2019. ISSN 1784663433.

KREUZER, M.; MCLAUGHLIN, J. Radon. In: (Ed.). **WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants**: World Health Organization, 2010.

MAYA, J. et al. Radon risks assessment with the COVID-19 lockdown effects. **Journal of Applied Mathematics and Physics**, v. 8, n. 07, p. 1402, 2020.

NEUBERGER, J. S.; GESELL, T. F. Residential radon exposure and lung cancer: risk in nonsmokers. **Health Physics**, v. 83, n. 1, p. 1-18, 2002. ISSN 0017-9078.

NUNES, L. J.; CURADO, A. Confined Spaces in Buildings with High Indoor Radon Concentration: A Case Study Analysis with the Application of Constructive Remediation Measures. **Buildings**, v. 13, n. 1, p. 49, 2023. ISSN 2075-5309.

NUNES, L. J. et al. Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. **International**

**Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 7, p. 3929, 2022. ISSN 1660-4601.

SHAKOOR, H. et al. Investigation of Radon Sources, Health Hazard and Risks assessment for children using analytical and geospatial techniques in District Bannu (Pakistan). **International Journal of Radiation Biology**, v. 98, n. 6, p. 1176-1184, 2022. ISSN 0955-3002.

YARMOSHENKO, I. V. et al. MODELING and justification of indoor radon prevention and remediation measures in multi-storey apartment buildings. **Results in Engineering**, v. 16, p. 100754, 2022. ISSN 2590-1230.