

## AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PADRÕES CONSTRUTIVOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO NA CONCENTRAÇÃO DE GÁS RADÔNIO EM AMBIENTES INTERNOS

Júlia B. Severo<sup>1</sup>; Isabela N. S. Ferreira<sup>2</sup>; Laura C. Takahashi<sup>3</sup>; Ricardo G. Passos<sup>4</sup>

**Resumo** – O radônio-222 é um gás radioativo de origem natural, proveniente da cadeia de decaimento do urânio-238, que pode se acumular em ambientes internos e representar um risco significativo à saúde humana. A partir dos dados obtidos na Campanha de Monitoração de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte, foi possível correlacionar as concentrações de radônio com os padrões construtivos e os materiais empregados nas edificações. Os resultados mostraram que residências construídas no século XXI apresentaram medianas de concentração mais elevadas em comparação com construções mais antigas. O tipo de piso também influenciou os níveis de radônio, sendo que os pisos de cerâmica apresentaram a maior mediana de concentração. Em relação à fundação, casas apoiadas diretamente no solo registraram concentrações mais altas do que casas suspensas. Edificações não geminadas também apresentaram concentrações superiores às das casas geminadas. A ventilação se mostrou um fator determinante, com casas bem ventiladas apresentando menores concentrações de radônio. Quanto ao tipo de alvenaria, residências com revestimento apresentaram concentrações mais elevadas do que aquelas sem revestimento. Dessa forma, foi possível realizar uma avaliação inicial sobre a influência dos materiais e padrões construtivos na concentração de radônio em ambientes internos, contribuindo para a identificação de fatores de risco.

**Abstract** – Radon-222 is a naturally occurring radioactive gas from the decay chain of uranium-238, which can accumulate indoors and pose a significant risk to human health. From the data obtained in the Indoor Radon Monitoring Campaign in Belo Horizonte, it was possible to correlate radon concentrations with the construction standards and materials used in the buildings. The results showed that homes built in the 21st century had higher median concentrations compared to older buildings. The type of flooring also influenced radon levels, with ceramic floors having the highest median concentration. In relation to the foundation, houses directly supported on the ground registered higher concentrations than suspended houses. Non-twinning buildings also had higher concentrations than twinned houses. Ventilation proved to be a determining factor, with well-ventilated houses having lower radon concentrations. As for the type of masonry, houses with cladding had higher concentrations than those without. In this way, it was possible to carry out an initial assessment of the influence of building materials and standards on radon concentrations indoors, helping to identify risk factors.

**Palavras-Chave** – Radônio; Padrões Construtivos; Materiais de Construção.

---

<sup>1</sup> Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, julia.severo@cdtn.br

<sup>2</sup> Eng., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439- 9623, isabela.ferreira@cdtn.br

<sup>3</sup> Tecn. em Radiol., MSc, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, laura.takahashi@cdtn.br

<sup>4</sup> Eng., PhD, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, (31) 3439-9623, Ricardo.passos@cdtn.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os radionuclídeos naturais estão presentes na crosta terrestre desde a formação do planeta, estando presentes em diversos tipos de rochas e minerais. Entre os principais elementos radioativos de origem natural, destacam-se o urânio (U-235 e U-238) e o tório (Th-232), que originam cadeias de decaimento radioativo. Ao longo dessas séries, diversos radionuclídeos são formados até atingirem um estado estável. Embora a maioria desses elementos seja sólida, um dos produtos intermediários se apresenta no estado gasoso: o radônio, gerado a partir do rádio, também de origem natural (UNSCEAR, 2019).

O Radônio-222, isótopo mais comum encontrado no ambiente, é um radionuclídeo natural gerado na cadeia de decaimento do Urânio-238. Trata-se de um emissor de radiação alfa presente em rochas e no solo da crosta terrestre. Por ser incolor, inodoro e insípido, pode se acumular em ambientes fechados sem ser notado, representando risco à saúde humana. O gás pode emanar dos poros de rochas que contêm minerais de rádio e, posteriormente, exalar para o ambiente (UNEP, 2016)

A presença de radônio em ambientes internos tem sido objeto de crescente atenção devido aos riscos associados à exposição prolongada a esse gás radioativo. Do ponto de vista da saúde pública, a exposição prolongada ao radônio está associada a um aumento significativo no risco de câncer de pulmão. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o radônio é a segunda principal causa dessa doença no mundo, ficando atrás apenas do tabagismo, e é considerado a principal causa entre os não fumantes (WHO, 2009). Dada a sua relevância, entender as fontes e os mecanismos de entrada do radônio em ambientes internos como residências, escolas, locais de trabalho, galpões entre outros é essencial para a prevenção e mitigação de seus efeitos.

Em ambientes construídos, ele pode infiltrar-se por rachaduras em pisos e paredes, juntas de dilatação, tubulações e até mesmo por poros no concreto. A taxa de entrada desse gás depende de fatores como a permeabilidade do solo, características construtivas e a ventilação do local. Além da infiltração a partir do solo, os próprios materiais de construção utilizados em edificações podem contribuir para a concentração de radônio em ambientes internos. Materiais como granito, concreto, tijolos cerâmicos e certos tipos de gesso podem conter radionuclídeos de ocorrência natural, como o Rádio-226. Este, ao decair, forma o Radônio-222, que pode ser liberado para o interior dos edifícios (RAMOS, 2020).

A quantidade de radônio emanada por esses materiais depende de características como a concentração de Rádio-226, a fração de emanção (percentual de radônio gerado que escapa do material) e a porosidade do material. Materiais mais porosos, por exemplo, tendem a liberar maiores quantidades de radônio. Embora a contribuição dos materiais de construção para a concentração total de radônio geralmente seja inferior à do solo, ela pode representar uma parcela significativa em determinadas condições, principalmente em edificações bem vedadas e com baixa renovação de ar (LARA, 2017).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos padrões construtivos e dos materiais de construção na concentração de radônio em ambientes internos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo baseou-se na análise dos dados obtidos no estudo radiométrico da *Campanha de Monitoração de Radônio em Ambientes Internos de Belo Horizonte* (CMRAI-BH), realizada por Takahashi (2023) em dois períodos distintos: um correspondente à estação seca e outro à estação chuvosa. O objetivo da campanha foi avaliar a concentração de radônio em diferentes ambientes internos da cidade de Belo Horizonte, utilizando detectores de traços de decaimento alfa do tipo CR-39, expostos por um período de aproximadamente três meses em cada fase.

Dentre os ambientes monitorados, incluem-se residências, locais de trabalho, estabelecimentos comerciais e instituições de ensino. Em cada etapa da campanha, foram distribuídos aproximadamente 500 kits contendo: uma carta de apresentação do projeto, instruções para instalação do detector, orientações sobre cuidados no manuseio e um panfleto informativo sobre os riscos da exposição ao gás radônio. Também foi entregue um formulário para coleta de informações sobre o local da instalação, como tipo de edificação, número de pavimentos, tipo de piso e ventilação, dados essenciais para a interpretação dos resultados.

Adicionalmente, foi solicitado que o(a) voluntário(a) preenchesse um questionário intitulado "Avaliação de fatores socioambientais que influenciam na saúde" (CAAE: 6744122.8.0000.8787), com perguntas relacionadas a três eixos principais: dados da construção (como idade do imóvel, tipo de material predominante, presença de porão ou subsolo), dados de saúde do indivíduo (como histórico de doenças respiratórias ou câncer na família), e hábitos dos moradores (frequência de ventilação do ambiente, tempo de permanência no local, entre outros).

A partir dos dados coletados por meio do questionário e das concentrações de radônio medidas pelos detectores CR-39 e analisadas no Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LRN/CDTN), foi realizada uma análise estatística com o objetivo de identificar possíveis correlações entre os níveis de radônio e as características construtivas dos ambientes monitorados. Em função da natureza da distribuição dos dados, a análise da tendência central para comparação foi realizada com o uso da mediana.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos na CMRAI-BH foram organizados em diferentes categorias a partir das respostas fornecidas no questionário. No total, 38% dos voluntários que instalaram detectores em suas residências também responderam ao questionário.

As residências avaliadas foram caracterizadas segundo diversos critérios construtivos e estruturais (n =198). Quanto ao tipo de construção, 39,9% das casas eram geminadas, enquanto 60,1% não geminadas. A maior parte das residências foi construída no século XX (62,1%), sendo 37,9% do século XXI. Em relação ao tipo de piso, observou-se uma predominância de piso cerâmico (56,7%), seguido por piso de madeira (23,2%). Os pisos de granito e porcelanato apresentaram a menor representatividade, com 5,1% cada. Outros pisos foram encontrados, porém com uma representatividade amostral muito pequena para a análise.

Quanto ao tipo de parede, 60,1% das casas eram de alvenaria com revestimento, e 39,9% sem revestimento. Já em relação à estrutura em relação ao solo, 73,7% das residências eram apoiadas diretamente ao solo, enquanto 26,3% estavam suspensas.

A ventilação dos ambientes internos foi classificada de 1 (muito ruim) a 5 (muito boa). A maioria das residências foi considerada como tendo ventilação nível 5 (36,2%), seguida por ventilação nível 4 (35,9%) e nível 3 (21,4%). Níveis mais baixos foram menos frequentes: nível 2 representou 5,9% e nível 1 apenas 0,6% das amostras.

Para uma melhor compreensão, os resultados das concentrações de radônio em ambientes internos analisados também foram divididos por campanha (chuvosa e seca), e os resultados estão apresentados na figura 1

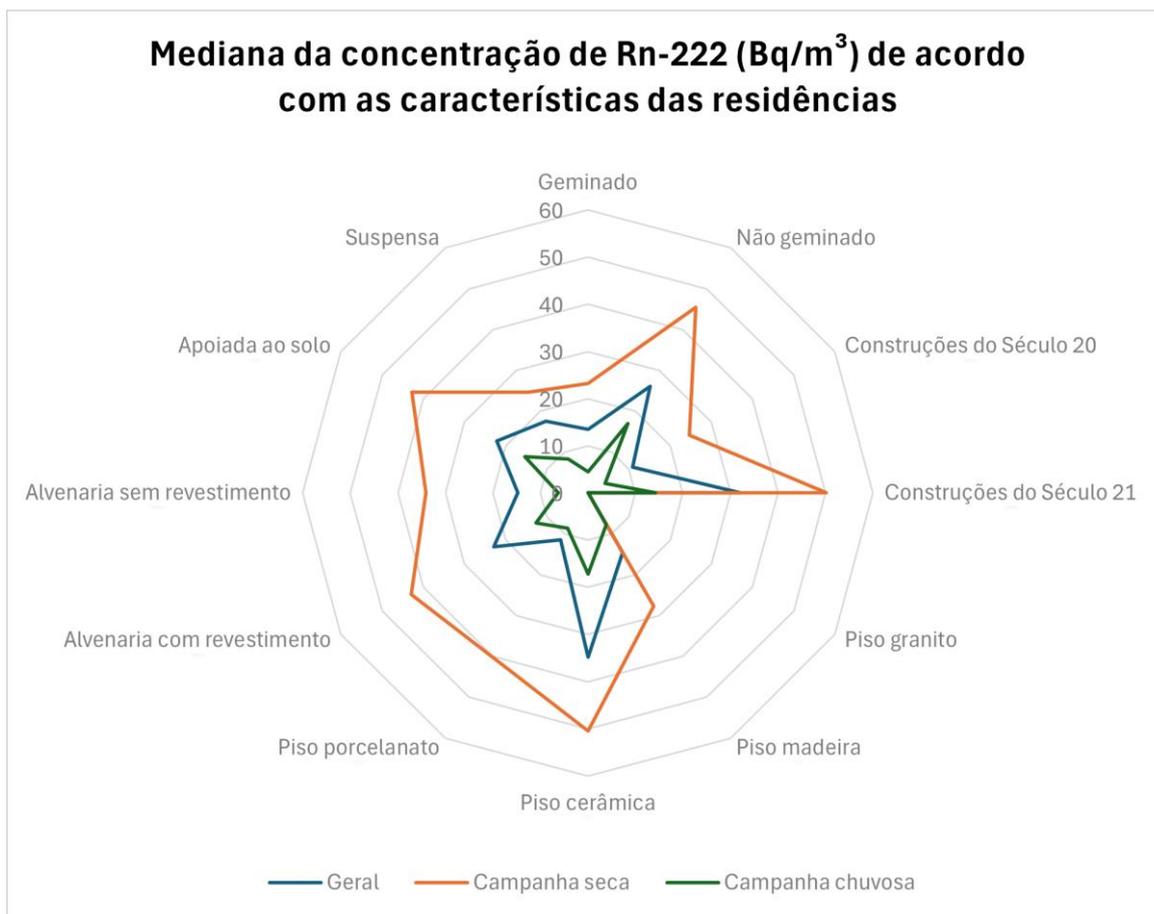


Figura 1 Concentração média de Rn-222 de acordo com as características das residências

### 3.1. Ano de construção

O primeiro aspecto analisado foi o ano de construção das residências, considerado um indicativo importante das práticas construtivas predominantes em diferentes períodos históricos. Essa variável pode influenciar significativamente a concentração de radônio nos ambientes internos, principalmente em razão das mudanças nos materiais empregados, e nos padrões de ventilação natural das construções ao longo do tempo (SIMMS, 2021). Para fins de análise, as casas foram agrupadas em dois períodos: construções do século XX e do século XXI.

As residências construídas no século XX apresentaram uma mediana de concentração de radônio de 10,9 Bq/m<sup>3</sup>, enquanto as construções feitas no século XXI apresentaram uma mediana de 32,1 Bq/m<sup>3</sup>. Esses dados sugerem que as construções mais recentes apresentam concentrações de radônio mais elevadas, em comparação às construções mais antigas.

Esse resultado se alinha com o estudo de Simms et al. (2021), que identificou um padrão semelhante no Canadá. No estudo norte americano, construções do século XXI apresentaram maiores concentrações de radônio, implicando um risco mais elevado de exposição, sobretudo entre os moradores mais jovens. Os autores associam esse aumento à mudanças nas práticas construtivas, que priorizam o isolamento térmico e a vedação, características desejáveis para conforto e economia de energia, mas que também dificultam a dispersão do radônio.

Da mesma forma, Khan (2021) também identificou um aumento nas concentrações de radônio em casas modernas no Canadá, contrastando com a tendência oposta observada na Suécia. De acordo com o autor, casas construídas entre 2010 e 2020 no Canadá apresentaram níveis até 467% maiores de radônio do que construções suecas da mesma década. Apesar da

introdução de medidas voltadas à mitigação do radônio no Código de Construção canadense de 2010, o estudo destaca que essas disposições não tinham como objetivo bloquear a entrada de radônio, mas apenas facilitar intervenções futuras para controle. Esse cenário ajuda a explicar os altos níveis ainda observados nas novas edificações e reforça a necessidade de medidas construtivas mais rigorosas para lidar com o risco de exposição ao gás no país.

Já na Suécia, a redução dos níveis de radônio parece ter ocorrido mesmo sem alterações específicas no código de obras voltadas diretamente ao radônio. Em vez disso, o país conta com normas de ventilação mais rígidas e diretrizes para testes de radônio. Além disso, a substituição gradual dos sistemas de aquecimento e melhorias estruturais também são apontadas como possíveis fatores que influenciaram. Essa combinação de fatores estruturais e normativos pode ter favorecido uma queda sistemática e efetiva nas concentrações de radônio ao longo do tempo no país.

Em Portugal, os resultados foram mais regionais. Segundo Branco (2016), no distrito do Porto, observou-se uma redução nas concentrações de radônio após 2006, ano da implementação da legislação de Qualidade do Ar Interior (IAQ), que estabeleceu limites máximos para o radônio no ar interno. Esse cenário aponta para um possível efeito positivo da legislação na redução do risco. Por outro lado, no distrito de Bragança, os níveis de radônio em construções recentes continuaram elevados, o que foi atribuído à falta de exigência de medições obrigatórias na cidade.

Embora os estudos indiquem uma relação entre construções mais recentes e maiores concentrações de radônio, é importante considerar que muitos desses resultados foram obtidos em países de clima temperado. No contexto brasileiro, caracterizado por clima predominantemente tropical, diferentes fatores podem estar associados a esse mesmo padrão observado. Entre as possíveis hipóteses, destaca-se a tendência crescente de construções menores impulsionada por fatores socioeconômicos. A busca por ambientes mais climatizados, favorecida pela maior acessibilidade ao ar-condicionado, também pode contribuir para a menor ventilação natural. Além disso, as mudanças climáticas têm provocado aumentos nas temperaturas médias e alterações nos padrões de precipitação, o que pode influenciar a exalação de radônio do solo (FERREIRA, 2024). Esses elementos, combinados, sugerem que a elevação dos níveis de radônio em moradias recentes no Brasil pode estar associada a um conjunto de fatores distintos daqueles observados em países de clima frio, demandando análises contextualizadas à realidade local.

### 3.2. Tipo de piso

O piso é um fator que pode influenciar significativamente a concentração de radônio nas residências. Dessa forma, os resultados das medianas da concentração de radônio foram também organizados conforme o tipo de piso, e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Concentração de Radônio por tipo de piso.

Tipo de piso	Mediana da concentração de radônio (Bq/m <sup>3</sup> )
Granito	0
Madeira	14,6
Cerâmica	34,8
Porcelanato	11,4

A maior mediana de concentração foi observada em residências com piso cerâmico (34,8 Bq/m<sup>3</sup>), seguidas por madeira (14,6 Bq/m<sup>3</sup>), porcelanato (11,4 Bq/m<sup>3</sup>) e granito (0 Bq/m<sup>3</sup>). Inicialmente, os dados indicam que a seleção do material de revestimento do piso pode influenciar na concentração de radônio em espaços interiores.

Esses resultados são coerentes com os achados de Lara (2017), que identificou a porosidade como um dos fatores mais determinantes na capacidade de penetração do radônio. Em seu estudo, estimou-se que cerca de 15% a 17% do radônio exalado do solo era capaz de atravessar pisos cerâmicos de maior porosidade, enquanto apenas cerca de 2% penetrava pisos de porcelanato polido, caracterizados por baixa absorção de água e, conseqüentemente, porosidade muito reduzida. Esses resultados estão em concordância com os dados obtidos neste estudo, em que os pisos cerâmicos apresentaram as maiores concentrações de radônio.

Além dessas características, os materiais de construção também podem contribuir significativamente para a concentração de radônio em ambientes internos, especialmente quando apresentam alta taxa de exalação do gás, como pode ser o caso de materiais fabricados a partir de matérias-primas originadas do solo.

Perna (2016) demonstrou que, utilizando uma célula-teste de concreto para simular um ambiente onde a concentração de radônio tivesse como única origem o material construtivo, foi obtida uma concentração indoor de  $112 \pm 9$  Bq/m<sup>3</sup>, quando extrapolada para as dimensões de um ambiente real.

Ramos (2010) também reforça essa abordagem ao relatar que a presença do radônio em ambientes internos está relacionada tanto à composição do substrato geológico quanto aos materiais utilizados na construção. Um exemplo citado são os tijolos vermelhos, identificados como emissores de radônio em algumas residências na cidade de Abreu e Lima. A autora ainda destaca que essa taxa de exalação de radônio varia entre diferentes materiais. Para concreto, pedra e tijolo, a taxa de exalação é considerada uma ordem de grandeza menor do que a do solo. No entanto, no caso do fosfogesso, que contém uma quantidade elevada de impurezas provenientes da rocha fosfatada, conhecida por conter urânio, precursor do radônio, sua taxa de exalação de radônio é semelhante à do solo.

Além disso, as residências que informaram presença de granito apresentaram uma mediana de concentração de radônio igual a 0 Bq/m<sup>3</sup>, não indicando, portanto, nenhuma contribuição significativa desse material para o aumento da concentração do gás nos ambientes monitorados. Em estudo conduzido por Chen (2010), foi evidenciada uma grande variação na taxa de exalação de radônio entre diferentes tipos de granito, com amostras apresentando desde níveis não detectáveis até aproximadamente 300 Bq·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, e uma média de 42 Bq·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> para placas de diversas origens. O autor destaca que, embora o granito seja amplamente utilizado em interiores, principalmente em pisos e bancadas, a variabilidade natural de sua composição torna difícil identificar quais tipos são mais propensos à liberação de radônio.

Ainda segundo Chen (2010), mesmo considerando uma situação extrema em que todo o piso de uma residência estivesse coberto por granito com taxa de exalação de 300 Bq·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, a contribuição para a concentração de radônio no ar interno seria limitada a aproximadamente 18 Bq/m<sup>3</sup>, desde que houvesse um sistema de ventilação adequado em operação. Isso evidencia que a baixa contribuição do granito para o radônio em ambientes internos se deve, principalmente, à diluição e remoção eficaz do gás proporcionadas por uma ventilação apropriada, que mantém os níveis baixos ao renovar constantemente o ar.

Essa variabilidade e a importância dos fatores contextuais ajudam a explicar os resultados observados neste estudo. A ausência de aumento nas concentrações de radônio em residências com granito pode estar relacionada a diversos aspectos, como o tipo específico de rocha utilizada, a procedência do material, o tratamento superficial aplicado, a área efetivamente exposta e, principalmente, as condições de ventilação dos ambientes. Assim, embora existam estudos que demonstram que certos granitos possam emitir radônio, os dados obtidos neste trabalho não indicam associação relevante entre a presença desse material e o aumento da concentração do gás nos ambientes analisados.

### 3.3. Tipo de fundação

A forma como a residência está construída, particularmente no que se refere ao contato direto com o solo, pode exercer influência na concentração de radônio em seu interior. Casas apoiadas diretamente ao solo tendem, de maneira geral, a apresentar concentrações mais elevadas do gás, já que o solo é a principal fonte de emissão de radônio e o contato direto com a base da residência facilita sua entrada por difusão ou por falhas construtivas, como rachaduras ou frestas no piso. Em contrapartida, casas construídas sobre pilotis ou elevadas do solo tendem a limitar esse contato e, por consequência, a entrada direta do gás.

Os dados obtidos neste estudo reforçam essa tendência: as residências apoiadas diretamente sobre o solo apresentaram uma mediana de concentração de radônio de 22,1 Bq/m<sup>3</sup>, enquanto as casas suspensas registraram uma mediana de 17,5 Bq/m<sup>3</sup>. A diferença, embora presente, não foi expressiva, o que sugere que outros fatores construtivos ou ambientais também podem estar influenciando os níveis observados.

Estudos anteriores corroboram essas observações, indicando que construções térreas e edificações com porões tendem a apresentar maiores concentrações de radônio, principalmente devido ao contato direto com solos e rochas emissores (RAMOS, 2010). No entanto, embora residências suspensas sejam, em teoria, menos suscetíveis à infiltração de radônio, essa condição não garante a eliminação do risco. No estudo realizado por Ramos (2010), a autora destaca um caso específico no município de Abreu e Lima (PE), em que uma residência suspensa apresentou concentrações superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>, evidenciando que outros fatores podem influenciar significativamente na concentração de radônio, mesmo em casas não apoiadas diretamente no solo.

### 3.4. Geminadas ou não geminadas

Ao analisar os resultados obtidos neste estudo, observa-se que as residências não geminadas apresentaram medianas de concentrações de radônio significativamente maiores do que as geminadas. A mediana nas casas não geminadas foi de 26,1 Bq/m<sup>3</sup>, enquanto que as casas geminadas foi de 13,4 Bq/m<sup>3</sup>.

Esses achados estão alinhados com os resultados de Khan (2021), no qual as casas não geminadas apresentaram maior média geométrica de radônio quando comparadas às casas geminadas no Canadá e na Suécia. De forma semelhante, Ramos (2020) também evidencia essa influência onde, na cidade de Olinda, casas não geminadas apresentaram concentrações médias quase o dobro das encontradas em casas geminadas nas mesmas condições construtivas (108 Bq/m<sup>3</sup> contra 60 Bq/m<sup>3</sup>).

Em síntese, os resultados deste estudo indicam uma tendência de maiores concentrações de radônio em residências não geminadas, enquanto casas geminadas apresentaram, em geral, níveis mais baixos. Os motivos não são totalmente claros, mas podem estar relacionados a uma combinação de fatores construtivos e ambientais. As casas não geminadas, por estarem isoladas, possuem maior área externa exposta ao solo, o que pode favorecer a infiltração de radônio oriundo do subsolo. Por outro lado, residências geminadas, ao compartilharem paredes laterais com outras construções, tendem a apresentar menor superfície de contato direto com o solo nessas áreas, o que poderia limitar a entrada do gás. Além disso, aspectos relacionados à ventilação também podem desempenhar um papel importante, de forma que casas isoladas podem ter padrões de fluxo de ar distintos em relação às geminadas, influenciando o acúmulo ou dispersão do radônio no interior dos ambientes.

### 3.5. Ventilação

A ventilação dos ambientes internos é um fator determinante na concentração de radônio em residências, uma vez que o acúmulo desse gás está diretamente relacionado à taxa de renovação do ar. Ambientes mal ventilados tendem a concentrar maiores quantidades de radônio, enquanto locais com ventilação eficiente, sobretudo pela abertura frequente de janelas e portas, favorecem sua dispersão.

Nesta pesquisa, os voluntários classificaram a ventilação de seus ambientes em cinco níveis, de 1 (muito ruim) a 5 (muito boa), por meio do formulário aplicado. Os resultados do questionário, cruzados com os dados de concentração de radônio, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Concentração de radônio por nível de ventilação das residências

Nível de ventilação	Mediana da concentração de radônio (Bq/m <sup>3</sup> )
1	70,5
2	20,8
3	36,8
4	23,3
5	13,5

É possível observar uma tendência de redução da concentração de radônio com o aumento da qualidade da ventilação. Residências classificadas com ventilação "muito boa" (nível 5) apresentaram a menor mediana de concentração, com 13,5 Bq/m<sup>3</sup>. À medida que os níveis de ventilação diminuem, nota-se uma tendência de aumento nas medianas: 23,3 Bq/m<sup>3</sup> para "boa" (nível 4), 36,8 Bq/m<sup>3</sup> para "moderada" (nível 3), e 20,8 Bq/m<sup>3</sup> para "ruim" (nível 2). O grupo de ventilação "muito ruim" (nível 1) apresentou a mediana mais elevada, com 70,5 Bq/m<sup>3</sup>.

Esses resultados estão em conformidade com estudos prévios. Pesquisa conduzida por Ramos (2010) na Região Metropolitana do Recife apontou que residências com janelas permanentemente fechadas apresentaram níveis significativamente mais altos de radônio em comparação àquelas com ventilação regular. Da mesma forma, o estudo de Somsunun et al. (2022), realizado na Tailândia, reforça a relevância da ventilação natural como principal fator de mitigação. Os autores verificaram que a proporção entre a área de janelas abertas e a área total de paredes apresentou correlação negativa com os níveis de radônio. Segundo o estudo, um aumento de 10% na taxa de abertura janela-parede resultou em uma redução média de 6,9 Bq/m<sup>3</sup> na concentração de radônio.

Apesar da tendência geral observada de redução das concentrações de radônio com a melhoria da ventilação, destaca-se que a mediana registrada para o nível 3 apresentou valor relativamente elevado (36,8 Bq/m<sup>3</sup>) em comparação aos níveis 2 (20,8 Bq/m<sup>3</sup>) e 4 (23,3 Bq/m<sup>3</sup>), destoando da progressão esperada.

Essa variação pode ser explicada, em parte, pela natureza autodeclaratória e subjetiva do dado de ventilação coletado por meio do questionário aplicado aos voluntários. Diferentemente de outras variáveis analisadas neste estudo, como o tipo de piso, de fundação ou de alvenaria, que são parâmetros objetivos e facilmente verificáveis, a percepção da ventilação do ambiente depende da avaliação individual de cada participante, podendo variar de acordo com interpretações pessoais e diferentes critérios utilizados pelos respondentes para classificar o ambiente.

Além disso, não foram utilizadas medições diretas ou padronizadas da taxa de troca de ar nos ambientes monitorados, o que pode ter contribuído para a inconsistência observada nos resultados desse grupo. Portanto, a discrepância na mediana do nível 3 pode refletir essa imprecisão inerente à coleta autodeclaratória.

### **3.6. Alvenaria com e sem revestimento**

Ao comparar as residências com e sem revestimento nas paredes de alvenaria, observa-se uma diferença entre as medianas de concentração de radônio: 22,81 Bq/m<sup>3</sup> para as construções com revestimento, contra 14,79 Bq/m<sup>3</sup> para aquelas sem revestimento.

Esses resultados sugerem que o revestimento pode exercer alguma influência na concentração de radônio, no entanto, ele não parece ser um fator isoladamente determinante. De forma semelhante, no estudo realizado por Ramos (2010), nos municípios de Abreu e Lima e Paulista, as residências com e sem revestimento apresentaram concentrações médias semelhantes. No entanto, essas construções também diferiam em diversos outros aspectos, como ventilação e tipo de piso. Em Abreu e Lima, por exemplo, a casa sem revestimento apresentou uma média de radônio um pouco superior, mas também possuía piso de terra batida e janelas frequentemente fechadas, fatores que dificultam a comparação isolada da influência do revestimento.

Portanto, embora o tipo de revestimento possa, em certos contextos, influenciar a permeabilidade das paredes ao radônio, os dados indicam que essa variável deve ser analisada em conjunto com outros fatores construtivos e de uso do ambiente. A diferença observada nas medianas sinaliza uma possível tendência, mas não permite, por si só, afirmar uma relação direta e consistente entre a presença de revestimento e o aumento da concentração do gás.

## **CONCLUSÕES**

A partir dos resultados analisados, foi possível realizar uma avaliação inicial da influência dos padrões construtivos e dos materiais de construção na concentração de radônio em ambientes internos. As análises indicaram uma tendência que corrobora com outros estudos realizados em contextos semelhantes, reforçando a consistência dos resultados. No entanto, apesar de os fatores terem sido analisados isoladamente, a concentração final de radônio em cada residência está diretamente relacionada a uma interação complexa entre as características construtivas, a geologia local e os hábitos dos moradores. Essa complexidade destaca a importância de se realizar medições diretas em ambientes internos, além de promover uma análise integrada entre os diversos fatores que influenciam a concentração de radônio.

O monitoramento do radônio e o estudo das variáveis que influenciam sua concentração são ferramentas essenciais para a identificação e mitigação de riscos à saúde em ambientes internos.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de pesquisa. Os agradecimentos se estendem ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) pela infraestrutura e pelos laboratórios disponibilizados, essenciais para a realização deste estudo. Por fim, registramos nossa gratidão aos voluntários que contribuíram com a campanha radiométrica.

## REFERÊNCIAS

- CHEN, Jing; RAHMAN, Naureen M.; ATIYA, Ibrahim Abu. Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of environmental radioactivity*, v. 101, n. 4, p. 317-322, 2010.
- BRANCO, P. T. B. S. et al. Children's exposure to radon in nursery and primary schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 13, n. 4, p. 386, 2016.
- FERREIRA, I. N. S.; SEVERO, J. B.; TAKAHASHI, L. C.; PASSOS, R. G. Influência da variação climática em estudos da concentração de radônio no ar. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE ENGENHARIA NUCLEAR E DE ENERGIA E CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES – VII SENCIR, 2024, Belo Horizonte. *Anais eletrônicos*. Belo Horizonte: VIISENCIR, 2024. Disponível em: <https://sencir.nuclear.ufmg.br/wp-content/uploads/2024/11/956999.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- KHAN, S. M. et al. Rising Canadian and falling Swedish radon gas exposure as a consequence of 20th to 21st century residential build practices. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 17551, 2021.
- LARA, E. G. *Potencial de radônio no ar de ambientes interiores residenciais: aspectos geológicos e construtivos da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- PERNA, A. F. N. et al. *Taxa de exalação de radônio-222 de concreto e argamassa de cimento usados na construção civil*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- RAMOS, M. L. O. S. *Radônio-222 e a ocorrência de câncer de pulmão em municípios da região metropolitana de Recife com afloramentos de fosforito uranífero*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- SIMMS, J. A. et al. Younger North Americans are exposed to more radon gas due to occupancy biases within the residential built environment. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 6724, 2021.
- SOMSUNUN, K. et al. Estimation of lung cancer deaths attributable to indoor radon exposure in upper northern Thailand. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 5169, 2022.
- TAKAHASHI, L. C. et al. Região Metropolitana de Belo Horizonte: potencial de estudo da radioatividade natural. In: SEMANA NACIONAL DE ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA E CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES, 2022, Belo Horizonte. *Anais eletrônicos*. Belo Horizonte: SENCIR, 2022.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Radiation effects and sources: what is radiation*. 2016.
- UNSCEAR – UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *UNSCEAR 2019 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation*. New York: United Nations, 2020.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva: World Health Organization, 2009. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>. Acesso em: 13 abr. 2025.