

ANÁLISE DO PONTO DE ORVALHO EM LAJES NERVURADAS: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Perícia ou Inspeção Predial

ISAAC SÉRGIO ARAÚJO DE BRITO
GUSTAVO REIS DE FARIAS
LIA RAFAEL DOS SANTOS

João Pessoa - PB
2025

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



ANÁLISE DO PONTO DE ORVALHO EM LAJES NERVURADAS: UM ESTUDO DE CASO

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento do ponto de orvalho em lajes nervuradas e avalia a eficácia das estratégias de prevenção e mitigação. O artigo apresenta uma análise de um estudo de caso, investigações teóricas e experimentais, e revisão da literatura. Os resultados indicam que o comportamento do ponto de orvalho em lajes nervuradas é influenciado por diversos fatores, incluindo características do projeto, materiais de construção, condições climáticas e práticas de ventilação e controle de umidade. As estratégias de prevenção e mitigação, como isolamento térmico, ventilação adequada e controle da umidade, desempenham um papel fundamental na redução dos problemas relacionados ao ponto de orvalho. A pesquisa contribui para o conhecimento acadêmico e prático no campo da engenharia civil e fornece recomendações para aprimorar projetos e práticas de construção. Sugere-se direções para pesquisas futuras, como a investigação do comportamento do ponto de orvalho em diferentes contextos climáticos e geográficos e o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de isolamento térmico e ventilação.

Palavras-chave: Ponto de orvalho, lajes nervuradas, isolamento térmico

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVOS	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Lajes nervuradas	5
3.2 Ponto de Orvalho	6
3.3 Condensação em Elementos Estruturais	7
3.4 Transferência de calor em concreto	8
3.5 Patologias Associadas à Condensação em Elementos de Concreto ..	9
3.6 Recomendações Técnicas	10
4. METODOLOGIA	11
4.1 Procedimentos de Inspeção	11
4.2 Critérios para Formulação da Hipótese Diagnóstica	11
5.3 Solução aplicada	14
5.4 Fatores Contribuintes	15
REFERÊNCIAS	17

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



1. INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso trata da identificação e análise da formação de umidade superficial em uma laje nervurada de concreto armado, localizada em um edifício residencial multifamiliar. Durante uma inspeção técnica, observou-se a presença de umidade visível na face inferior da laje, sem que houvesse, no pavimento superior, indícios de infiltração oriunda de instalações hidráulicas, reservatórios ou vazamentos aparentes. A partir de uma investigação técnica detalhada, incluindo anamnese com os moradores, constatou-se que o apartamento superior mantinha o uso constante de um aparelho de ar-condicionado de 30.000 BTUs, operando em temperaturas mínimas. Simultaneamente, o apartamento inferior havia deixado de utilizar o seu sistema de climatização, ocasionando um diferencial térmico significativo entre os ambientes.

Esse gradiente de temperatura, associado a uma umidade relativa elevada no ambiente inferior, proporcionou as condições necessárias para a ocorrência do ponto de orvalho sobre a superfície da laje, fenômeno que desencadeou a condensação de vapor d'água, gerando manifestações patológicas como manchas, umidade persistente e risco de proliferação microbológica. Segundo Silva et al. (2015), a condensação em elementos estruturais pode comprometer o desempenho térmico e higiênico da edificação, além de impactar a durabilidade e a integridade dos materiais de acabamento e revestimentos. Tais efeitos são especialmente críticos em lajes nervuradas, cuja geometria complexa dificulta o diagnóstico visual imediato e a correção dos danos. A relevância deste estudo reside na necessidade de compreender o comportamento higrotérmico das lajes nervuradas frente a condições de uso diferenciadas, com vistas a prevenir manifestações patológicas decorrentes do acúmulo de umidade. Conforme Mota, Leal e Marques (2018), o controle dos mecanismos de troca térmica e da umidade em componentes de concreto armado é essencial para garantir sua durabilidade e o desempenho global das edificações.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a ocorrência do ponto de orvalho na laje nervurada analisada, compreender os fatores que contribuíram para sua formação e propor estratégias de mitigação. Ao final, espera-se que os achados contribuam para o aprimoramento das práticas construtivas, tanto em fase de projeto quanto de manutenção preventiva, reforçando a importância do controle higrotérmico no desempenho das estruturas.

2. OBJETIVOS

Este estudo de caso busca investigar a formação do ponto de orvalho na laje nervurada e seus efeitos, a fim de propor soluções e contribuir para o conhecimento científico sobre o tema. Para alcançar esse propósito, os objetivos específicos foram baseados em literaturas onde problemas semelhantes foram relatados, os objetivos do estudo são:

- Identificar os principais fatores que contribuíram para a formação do ponto de orvalho na laje nervurada em questão, incluindo as condições ambientais, o uso dos aparelhos de ar-condicionado e a interação entre os apartamentos;
- Identificar os principais fatores que contribuíram para a formação do ponto de orvalho na laje nervurada em questão, incluindo as condições ambientais, o uso dos aparelhos de ar-condicionado e a interação entre os apartamentos;
- Propor soluções para mitigar os problemas decorrentes da formação do ponto de orvalho na laje nervurada, considerando as especificidades do caso estudado e as práticas construtivas e de manutenção;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Lajes nervuradas

A laje nervurada é um sistema estrutural de piso em concreto armado concebido com o objetivo de otimizar o consumo de materiais, reduzindo o volume de concreto empregado sem comprometer sua capacidade resistente. Sua configuração típica consiste em uma mesa superior delgada (também denominada mesa de compressão), apoiada sobre um conjunto de nervuras dispostas ortogonalmente em uma ou duas direções principais. Essas nervuras funcionam como elementos lineares resistentes equivalentes a vigas responsáveis pela condução das cargas verticais até os apoios, enquanto a mesa atua como elemento de ligação e distribuição das cargas entre as nervuras, além de oferecer uma superfície contínua para os revestimentos finais (Huber et al., 2023; Bosbach et al., 2023; Yahya & Galeb, 2024). A eficiência estrutural do sistema está diretamente atrelada à forma como os esforços são redistribuídos. As nervuras concentram a maior parcela das solicitações verticais, o que possibilita vencer vãos superiores com menor consumo de material. A mesa, ao conectar essas nervuras, promove rigidez diafragmática ao conjunto, contribuindo para a estabilidade e a uniformidade na resposta estrutural frente às cargas aplicadas (Huber et al., 2023; Galeb, 2024).

Uma das principais vantagens técnicas da laje nervurada reside na racionalização do uso de concreto. A retirada de material nas regiões entre as nervuras – zonas que apresentam baixa solicitação estrutural – permite uma economia estimada de até 40% no volume de concreto, quando comparada a lajes maciças de mesma espessura. Essa redução acarreta não apenas em estruturas mais leves, mas também em menores cargas permanentes transmitidas às fundações, o que se traduz

em economia global no dimensionamento estrutural (Huber et al., 2023; Bosbach et al., 2023; Yahya & Galeb, 2024).

3.2 Ponto de Orvalho

O ponto de orvalho é definido como a temperatura à qual o ar se torna saturado de vapor de água, fazendo com que este vapor comece a se condensar em forma de gotículas líquidas. Em termos físicos, trata-se do momento em que o ar, ao ser resfriado a pressão constante, não consegue mais manter toda a umidade na forma de vapor, dando início ao processo de condensação (Tao et al., 2016; Qolipour et al., 2019). A temperatura de ponto de orvalho é um parâmetro crucial em meteorologia, climatologia e em diversas aplicações da engenharia. Sua medição ou estimativa permite avaliar o conteúdo de umidade do ar, o que é relevante para a previsão do tempo, estudos de mudanças climáticas, e para o projeto de sistemas que exigem controle preciso da umidade, como sensores ambientais, desumidificadores e câmaras de secagem (Tzanis et al., 2022; Wang et al., 2022).

A determinação do ponto de orvalho pode ser feita por meio de sensores específicos como sensores capacitivos e piezoelétricos que detectam a temperatura exata em que ocorre a condensação. Alternativamente, também é possível estimá-lo com base em variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa e pressão de vapor. Técnicas modernas baseadas em inteligência artificial e aprendizado de máquina têm sido utilizadas para aprimorar a acurácia dessas estimativas, considerando múltiplos parâmetros simultaneamente (Nie et al., 2018; Baghban et al., 2016; Tzanis et al., 2022; Wang et al., 2022).

O ponto de orvalho está intimamente relacionado à umidade relativa do ar. Quando a temperatura do ar é reduzida até o ponto de orvalho, ocorre a saturação do vapor, promovendo a condensação. Essa temperatura fornece uma medida direta do teor de umidade atmosférica, muitas vezes mais confiável do que a própria temperatura do ar para prever fenômenos como precipitação, formação de neblina e patologias associadas à umidade (Wasko et al., 2018). No contexto de lajes nervuradas, a geometria das nervuras pode influenciar significativamente os processos de transferência de calor e massa, afetando diretamente as condições para a formação do ponto de orvalho. Estudos recentes com sistemas de resfriamento evaporativo utilizando canais com superfícies nervuradas (*rib-roughened channels*) indicam que a presença de nervuras intensifica a transferência convectiva de calor e de umidade. Isso ocorre devido à formação de vórtices destacados nas superfícies das nervuras, os quais promovem maior intercâmbio térmico e de massa entre o ar e as superfícies internas (Wu et al., 2024).

Essa intensificação da transferência térmica pode, por um lado, ser benéfica em sistemas de resfriamento passivo, mas, por outro, pode levar a resfriamento localizado das superfícies das lajes nervuradas. Em ambientes com alta umidade relativa, isso eleva o risco de que a temperatura superficial atinja ou mesmo ultrapasse para baixo o ponto de orvalho, resultando em condensação localizada sobretudo nas regiões próximas às nervuras, onde o gradiente térmico é mais acentuado (Wu et al.,

2024). Em termos de desempenho térmico, embora o efeito das nervuras possa potencializar a eficiência energética de alguns sistemas, a ocorrência de condensação deve ser rigorosamente considerada durante a fase de projeto. Isso é especialmente relevante em regiões tropicais úmidas, onde a combinação de altas taxas de umidade com sistemas de climatização pode desencadear manifestações patológicas associadas à umidade, como mofo, degradação de revestimentos e perda de desempenho estrutural.

3.3 Condensação em Elementos Estruturais

A condensação em elementos estruturais pode ser analisada sob duas perspectivas distintas, porém igualmente relevantes: o fenômeno físico da acumulação de umidade sobre superfícies frias e os métodos matemáticos aplicados à análise estrutural para simplificação de modelos complexos. Ambos os conceitos impactam significativamente o desempenho, a durabilidade e a segurança das estruturas. Do ponto de vista físico, a condensação ocorre quando o ar úmido entra em contato com superfícies de temperatura inferior ao ponto de orvalho, como em perfis metálicos ou superfícies internas de elementos de concreto armado. Essa condição favorece a formação de água líquida sobre os elementos estruturais, podendo desencadear processos de corrosão, perda de seção útil, destacamento de camadas de revestimento e, conseqüentemente, a redução da capacidade resistente tanto de componentes isolados quanto do sistema estrutural como um todo (Semko et al., 2023).

Diversos fatores contribuem para o surgimento e agravamento do fenômeno, incluindo a ausência ou má distribuição de isolamentos térmicos, descontinuidades entre componentes construtivos e falhas de aderência entre camadas de acabamento. Estratégias de projeto e restauração devem considerar esses parâmetros com o intuito de mitigar os efeitos negativos da condensação sobre a integridade estrutural a longo prazo. Paralelamente, em análises estruturais numéricas, especialmente naquelas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), o termo “condensação” refere-se a técnicas matemáticas que visam reduzir a complexidade computacional dos modelos. Essas técnicas diminuem o número de graus de liberdade (DOFs, Degrees of Freedom) do sistema, o que resulta em matrizes de rigidez de ordem inferior e menor custo computacional, sem perdas significativas de precisão (Kassem et al., 2023; Papadrakakis & Sapountzakis, 2018).

A condensação estática consiste na eliminação de graus de liberdade secundários geralmente aqueles não associados aos nós de interesse direto resultando em uma matriz de rigidez condensada. Essa técnica é amplamente utilizada em análises estruturais estáticas, especialmente em elementos com subestruturas regulares, e permite a simplificação de sistemas sem comprometer os resultados globais (Papadrakakis & Sapountzakis, 2018; Bahar & Bahar, 2018). Já a condensação dinâmica representa uma extensão do método estático ao incorporar os efeitos de inércia. Isso a torna mais adequada para análises dinâmicas, como estudos de vibrações, modos de oscilação e frequências naturais. A técnica é especialmente valiosa em estruturas complexas ou de grande porte, como edifícios altos, pontes ou

estruturas industriais, nas quais a modelagem completa torna-se onerosa em termos de processamento (Qu & Fu, 1998; Weng et al., 2017; Kassem et al., 2023).

3.4 Transferência de calor em concreto

A transferência de calor em elementos estruturais de concreto ocorre por meio de três mecanismos principais: condução, convecção e radiação. Esses fenômenos térmicos, isoladamente ou em combinação, influenciam diretamente a temperatura superficial dos elementos e, consequentemente, o risco de formação de condensação. A condução é o principal mecanismo de transferência de calor em estruturas de concreto, particularmente em lajes densas e maciças. A condutividade térmica do concreto depende de diversos fatores, como densidade, teor de umidade e tipo de agregado utilizado. Concretos leves apresentam menor condutividade térmica, o que reduz as trocas de calor e as variações de temperatura na superfície, contribuindo para a mitigação de riscos de condensação. Em contrapartida, em concretos convencionais ou com danos estruturais (como fissuração), observa-se uma redução na condutividade efetiva, o que afeta os gradientes térmicos e pode intensificar o resfriamento superficial (Huang et al., 2024; Asadi et al., 2019; Nguyen et al., 2019). A convecção ocorre principalmente nas superfícies expostas dos elementos de concreto, onde o movimento do ar promove trocas térmicas com o ambiente. Em concretos porosos, como o concreto celular, a convecção interna é mínima devido ao pequeno diâmetro dos poros. Contudo, a convecção superficial permanece significativa e depende diretamente do coeficiente de transferência de calor convectiva, o qual é influenciado pela velocidade do ar e pela rugosidade superficial. Em sistemas construtivos com cavidades, como paredes alveolares, a convecção natural no interior dessas cavidades pode alterar substancialmente a transferência térmica (Huang et al., 2024; Marais et al., 2021; Ouakarrouch et al., 2019).

A transferência radiativa, especialmente a radiação de onda longa, tem papel expressivo na regulação da temperatura superficial de elementos de concreto expostos ao ambiente externo. A radiação solar eleva rapidamente a temperatura durante o dia, enquanto a emissão de radiação térmica à noite pode provocar resfriamento da superfície abaixo da temperatura do ar, aumentando o risco de condensação. Esse fenômeno é acentuado em materiais de baixa densidade, devido à sua menor inércia térmica (Huang et al., 2024; Marais et al., 2021; Yang et al., 2024). A interação entre condução, convecção e radiação determina o comportamento térmico da superfície do concreto. Concretos densos, com alta condutividade térmica, permitem maior fluxo de calor, o que reduz gradientes térmicos superficiais, mas também favorece perdas térmicas. Já materiais com baixa condutividade, como concretos celulares ou isolantes, retardam a transferência de calor, estabilizando a temperatura superficial e reduzindo o risco de condensação (Huang et al., 2024; Marais et al., 2021; Asadi et al., 2018). A condensação tende a ocorrer quando a superfície do concreto se resfria abaixo do ponto de orvalho do ar ambiente. Isso pode ser causado por resfriamento radiativo noturno ou por fluxo térmico insuficiente oriundo do interior da estrutura. O risco é particularmente elevado em climas úmidos e durante a noite, quando as perdas radiativas são mais intensas (Yang et al., 2024).

Concretos armados e densos apresentam condutividade térmica significativamente maior do que materiais isolantes como concretos leves ou espumas rígidas. Como resultado, exibem maior variação térmica superficial e, portanto, maior susceptibilidade à condensação. Materiais isolantes reduzem o fluxo térmico, estabilizam a temperatura de superfície e diminuem o risco de umidade superficial (Huang et al., 2024; Marais et al., 2021; Asadi et al., 2018). Os coeficientes de troca térmica por convecção e radiação são parâmetros essenciais para o cálculo da perda ou ganho térmico superficial. O coeficiente convectivo depende da velocidade do ar e da rugosidade da superfície, enquanto o coeficiente radiativo é influenciado pela emissividade dos materiais e pela diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente. A modelagem precisa desses coeficientes é fundamental para a previsão da temperatura superficial e avaliação do risco de condensação (Marais et al., 2021; Honorio et al., 2014; Yang et al., 2024; Ouakarrouch et al., 2019).

3.5 Patologias Associadas à Condensação em Elementos de Concreto

A condensação em elementos de concreto, quando não controlada, pode provocar uma série de manifestações patológicas que comprometem o desempenho, a durabilidade e a salubridade das edificações. Entre as patologias mais comuns destacam-se: crescimento de fungos, eflorescência, descolamento de revestimentos, corrosão de armaduras e perda de aderência entre camadas construtivas. O crescimento de fungos, especialmente do tipo bolor, é uma consequência direta da permanência de umidade em superfícies internas, sobretudo em ambientes com deficiente ventilação e presença de pontes térmicas. A condensação superficial recorrente cria condições ideais para o desenvolvimento microbiológico, o que se manifesta por manchas escurecidas, odor característico e, em alguns casos, degradação de materiais por biodeterioração. A eflorescência, por sua vez, caracteriza-se pela formação de depósitos esbranquiçados e pulverulentos na superfície do concreto, resultantes da migração de sais solúveis carregados pela umidade interna e posteriormente cristalizados na superfície, após a evaporação da água. Já o descolamento de revestimentos e acabamentos ocorre quando a umidade oriunda da condensação compromete a aderência entre a camada de acabamento (tinta, verniz, argamassa ou resina) e o substrato de concreto. Esse processo é agravado por ciclos repetidos de molhagem e secagem, variações térmicas ou ações de congelamento e degelo. Essas três manifestações são descritas detalhadamente por Bomberg et al. (1998), que ressaltam a importância da correta especificação de materiais e do controle higrotérmico como medidas preventivas.

Outro efeito crítico da condensação é a corrosão das armaduras embutidas no concreto. A presença contínua de umidade, em especial quando associada à carbonatação ou à penetração de íons cloreto, acelera o processo de oxidação do aço, reduzindo a seção efetiva das armaduras e provocando fissuração ou destacamento do cobrimento. Essa degradação pode ser observada visualmente por meio de trincas longitudinais, manchas de ferrugem ou esfoliação do concreto, e pode ser confirmada por ensaios não destrutivos. Estudos recentes, como os de Balasbaneh et al. (2022) e Daneshvar et al. (2021), evidenciam a correlação direta entre condensação recorrente e comprometimento da durabilidade em estruturas de

concreto armado. Além dessas manifestações, existem fatores contribuintes que aumentam o risco ou potencializam a severidade dos danos provocados pela condensação. A ausência ou insuficiência de isolamento térmico favorece a formação de superfícies frias, propensas à condensação. A falta de sistemas eficientes de drenagem agrava a situação, permitindo o acúmulo e retenção de umidade. Condições ambientais, como alta umidade relativa, proximidade de fontes de vapor, variações térmicas acentuadas e exposição a intempéries também elevam os riscos. Por fim, falhas de projeto, deficiências construtivas, escolha inadequada de materiais e ausência de manutenção preventiva figuram entre os fatores agravantes mais recorrentes, como discutido por Teles et al. (2021), Coussian et al. (2020) e Balasbaneh et al. (2022).

3.6 Recomendações Técnicas

A ocorrência de condensação em elementos estruturais de concreto, notadamente em lajes nervuradas, demanda a adoção de estratégias integradas que contemplem as fases de projeto, execução e manutenção das edificações. Tais estratégias devem se fundamentar no entendimento dos mecanismos físicos de transferência de calor e umidade, assim como nas manifestações patológicas amplamente documentadas na literatura técnica (Bomberg et al., 1998; Balasbaneh et al., 2022; Huang et al., 2024). A incorporação de camadas de isolamento térmico com elevada resistência térmica (valores superiores a $0,033 \text{ m}^2\text{K/W}$) é essencial para reduzir os gradientes de temperatura entre os ambientes internos e externos, mitigando a probabilidade de que a superfície da laje atinja o ponto de orvalho. Materiais como espumas rígidas de poliuretano (PUR) ou polisocianurato (PIR), mantas reflexivas multicamadas e isolantes com barreiras de vapor integradas têm se mostrado altamente eficazes, sobretudo em regiões de clima quente e úmido (Ouakarrouch et al., 2019; Marais et al., 2021).

A má ventilação é um fator crítico para a elevação da umidade relativa interna, especialmente em ambientes com uso intensivo de ar-condicionado. Nesse sentido, recomenda-se a implementação de sistemas de ventilação natural cruzada, ventilação mecânica controlada ou estratégias híbridas que permitam a renovação constante do ar, mantendo a umidade relativa abaixo de 60%, limite recomendado para evitar a saturação do ar e a formação de condensação (CIBSE, 2018; Liddament, 1996). Durante a fase de projeto, torna-se imprescindível a consideração do comportamento higrotérmico da laje nervurada por meio de simulações computacionais, análise da temperatura superficial e verificação do risco de condensação conforme os critérios estabelecidos na ISO 13788:2012. A própria geometria das nervuras pode favorecer a formação de zonas frias devido à sua exposição diferenciada à radiação e à ventilação, sendo fundamental a modelagem precisa dos efeitos de condução térmica e sombreamento gerado por tais elementos (Huang et al., 2024; Wu et al., 2024). Visando à durabilidade da estrutura, especialmente em regiões sujeitas à condensação persistente, recomenda-se a utilização de cobrimentos adequados, incorporação de aditivos hidrofugantes ao concreto e, quando possível, aplicação de armaduras com proteção anticorrosiva ou aço inoxidável em zonas de maior risco. Técnicas de monitoramento contínuo com ensaios não destrutivos (END), como

termografia e ultrassom, são recomendadas para edifícios em uso contínuo, permitindo a identificação precoce de anomalias (Daneshvar et al., 2021).

A especificação de revestimentos deve considerar a permeabilidade ao vapor de água. Revestimentos excessivamente impermeáveis podem agravar a retenção de umidade, resultando na degradação do sistema de acabamento. Por isso, é recomendável o uso de sistemas compatíveis com o comportamento higrotérmico do concreto, capazes de permitir a transpiração controlada do elemento sem comprometer sua proteção ou aparência estética (Bomberg et al., 1998; Lstiburek, 2012). Por fim, a instalação de sensores de temperatura e umidade em pontos estratégicos da edificação representa uma medida preventiva eficaz para o controle contínuo das condições favoráveis à condensação. Associada a isso, a realização de inspeções periódicas e a adoção de um plano de manutenção preventiva — incluindo reparo de fissuras, renovação de revestimentos e verificação de sistemas de drenagem — são fundamentais para a preservação da integridade estrutural e o prolongamento da vida útil da edificação (Straube & Burnett, 2005).

4. METODOLOGIA

A presente investigação baseou-se na análise de um estudo de caso real, cuja edificação apresentou manifestações patológicas associadas à presença de umidade superficial em elementos estruturais, notadamente em lajes nervuradas. Para isso, foram adotados procedimentos metodológicos pautados na engenharia diagnóstica, combinando inspeções visuais, instrumentação técnica.

4.1 Procedimentos de Inspeção

As inspeções técnicas ocorreram ao longo de múltiplas visitas, ao qual foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Câmera termográfica infravermelha:** para identificação de variações anômalas de temperatura superficial nos elementos de concreto;
- **Medidor digital de umidade relativa do ar e de superfícies:** para a aferição das condições microclimáticas no intradorso da laje e no ambiente entre laje e forro de gesso;

Os ambientes foram avaliados tanto do ponto de vista estrutural quanto sob o aspecto do conforto térmico, com foco especial nas regiões abaixo de equipamentos de climatização e em zonas de acúmulo de umidade não explicadas por falhas hidráulicas aparentes.

4.2 Critérios para Formulação da Hipótese Diagnóstica

A hipótese diagnóstica foi formulada com base em evidências empíricas observadas in loco, aliadas ao conhecimento técnico sobre transferência de calor e umidade em elementos de concreto. Foi descartada a hipótese de vazamentos hidráulicos, dada a inexistência de fontes visíveis ou registros de infiltrações superiores. A correlação entre gradientes térmicos induzidos por sistemas de climatização, umidade relativa elevada e ausência de ventilação permitiu estabelecer

como causa primária das manifestações observadas o fenômeno físico de condensação superficial induzida pela formação do ponto de orvalho.

5. RESULTADOS

5.1 Evidências Visuais e Patológicas

Durante a inspeção realizada no imóvel objeto do estudo, foram observadas manifestações patológicas significativas na superfície inferior da laje nervurada, localizada no ambiente principal do apartamento inferior. As anomalias apresentavam-se na forma de manchas de umidade visíveis, com coloração escurecida e distribuição predominantemente difusa entre as nervuras da laje, especialmente nas regiões centrais do teto.

Essas manchas foram descritas pelo usuário como recorrentes e agravadas em períodos de uso contínuo do sistema de ar-condicionado no apartamento superior, mesmo na ausência de qualquer vazamento hidráulico aparente. A inspeção visual, não detectou pontos de infiltração provenientes de redes hidráulicas, escoamento de águas pluviais ou falhas em impermeabilizações, o que levou à exclusão dessas hipóteses como origem do problema. Adicionalmente, foi possível constatar início de degradação do revestimento interno da laje, com presença de descolamento pontual do forro de gesso, pequenas fissuras no acabamento superficial e sinais de eflorescência salina incipiente, principalmente nos pontos mais frios identificados posteriormente pela termografia. Essa combinação de manifestações é característica de processos de condensação superficial prolongada, com saturação de vapor de água em contato com superfícies frias.

A condição observada configura um cenário típico de umidade por condensação higrotérmica, frequentemente associado a ambientes com baixa renovação de ar, diferença térmica significativa entre ambientes adjacentes e elevada umidade relativa interna, fatores todos confirmados ao longo das medições descritas nas seções seguintes deste capítulo.

5.2 Dados obtidos

A investigação higrotérmica foi conduzida por meio de instrumentos de medição direta e não destrutiva (figura 1), com o objetivo de caracterizar as condições ambientais no interior do compartimento afetado e avaliar sua correlação com os fenômenos de condensação identificados visualmente. Os ensaios instrumentais envolveram o uso de câmera termográfica de infravermelho para mapeamento de temperatura superficial e medidor digital de temperatura e umidade relativa do ar, com precisão compatível com normas técnicas aplicáveis. Durante a inspeção técnica, foram obtidos os seguintes parâmetros como ilustra a tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros encontrados no estudo de caso. Fonte: Elaborado pelos autores.

Temperatura ambiente interna	24,2 °C
Umidade relativa do ar (URA)	77,5%;
Temperatura superficial mínima da laje	19,6 °C
Temperatura do ponto de orvalho estimada	20,0 °C

Figura 1 - Medição da umidade relativa do ar e temperatura. Fonte: Elaborado pelos autores



Com base nesses parâmetros, estimou-se o ponto de orvalho – a temperatura na qual o ar se torna saturado e inicia o processo de condensação sobre superfícies frias. Para tal, foi aplicada a equação de Magnus-Tetens, amplamente reconhecida por sua confiabilidade na faixa de temperatura de -45°C a 60°C:

$$Td = \frac{b \cdot \alpha(T, RH)}{a - \alpha(T, RH)} = 20,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

A temperatura superficial da laje (19,6 °C) encontra-se inferior ao ponto de orvalho estimado, evidenciando condições higrotérmicas propícias à formação de condensação superficial. Esse fenômeno é potencializado pela baixa taxa de renovação de ar no ambiente analisado, fator que mantém elevada a umidade relativa interna. Tal condição, quando persistente, configura um cenário favorável ao desenvolvimento de manifestações patológicas, como mofo, delaminações e risco de corrosão de armaduras

A análise comparativa entre a temperatura superficial da laje e o ponto de orvalho teórico evidencia uma condição crítica: a superfície estrutural encontra-se praticamente na temperatura de saturação do ar, o que favorece a formação de condensação superficial mesmo em condições de operação contínua de climatização. Essa constatação é reforçada pela proximidade inferior a 0,5 °C entre os dois valores, caracterizando risco elevado de condensação, conforme os critérios de avaliação

estabelecidos por Telles et al. (2020) e pela norma ISO 13788:2012. A ausência de ventilação forçada no compartimento inferior, associada à baixa renovação de ar e ao isolamento térmico insuficiente entre os pavimentos, contribui para a retenção de umidade relativa elevada no microambiente sob forro. Esse cenário limita a dissipação da umidade e intensifica os efeitos do gradiente térmico entre os ambientes, favorecendo o processo de saturação do vapor de água junto à face inferior da laje nervurada. Esses dados reforçam o diagnóstico de que as patologias visuais observadas (descritas na seção 5.1) têm origem higrotérmica, sendo diretamente relacionadas à condensação superficial intermitente, induzida por desempenho térmico inadequado da laje em contato com ar saturado.

5.3 Solução aplicada

Diante da constatação de condensação superficial associada à proximidade entre a temperatura da superfície inferior da laje nervurada e o ponto de orvalho, optou-se por uma solução de isolamento térmico com o objetivo de elevar a temperatura superficial da laje e, assim, mitigar o risco de saturação de vapor d'água no plenum entre laje e forro.

Para a definição do desempenho térmico necessário ao sistema de isolamento, foram realizados cálculos estimativos com base nos princípios da condução de calor. Admitindo-se os seguintes parâmetros típicos da edificação analisada: A partir da equação simplificada da lei de Fourier para transferência de calor por condução:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_2 - R_1} = -300W$$

Substituindo na equação de condução para isolar R2:

$$R_2 = \frac{T_2 - T_1}{q} - R_1 = 0,02m^2 \cdot K/W$$

O resultado indica que seria necessário um isolante com resistência térmica de no mínimo 0,02 m²·K/W para manter a temperatura interna desejada sem que a laje atinja o ponto de orvalho. Como margem de segurança e eficiência térmica superior, optou-se pela instalação de uma manta térmica flexível de alto desempenho, com resistividade R = 0,033 m²·K/W, valor superior ao mínimo necessário e adequado à aplicação conforme literatura técnica (Ouakarrouch et al., 2019; Marais et al., 2021). Essa intervenção contribui significativamente para a elevação da temperatura da superfície da laje, afastando-a do ponto de orvalho mesmo sob operação contínua do sistema de climatização, reduzindo assim a probabilidade de condensação e suas patologias associadas.

Com o objetivo de mitigar a formação de condensação na laje do pavimento inferior, foi adotada uma solução de caráter empírico baseada na aplicação de isolamento térmico elastomérico. O material selecionado foi uma manta de isolamento disponível no mercado amplamente utilizada em sistemas de isolamento térmico de tubulações e superfícies expostas a gradientes térmicos elevados. A instalação foi

precedida pela remoção total do forro de gesso da suíte master da unidade, expondo a superfície inferior da laje. A manta foi aplicada diretamente sobre a laje, abrangendo toda a extensão da suíte e se estendendo também à varanda contígua. A fixação do material seguiu critérios práticos de aderência plena, buscando garantir contato uniforme com a superfície da laje e evitar a formação de bolsas de ar, que poderiam comprometer a eficiência térmica do sistema (figura 2). Em áreas de encontro com pilares ou descontinuidades, foram realizados recortes e ajustes pontuais, assegurando cobertura contínua e estanque.

Figura 2 – Instalação da manta de isolamento na laje. Fonte: Elaborado pelos autores



5.4 Fatores Contribuintes

A ocorrência de condensação superficial na laje nervurada identificada durante a inspeção técnica pode ser atribuída à combinação de fatores construtivos, ambientais e operacionais que atuam de forma sinérgica para criar condições propícias à formação de umidade superficial. A análise dos dados coletados permitiu identificar os seguintes fatores contribuintes:

a) Diferença térmica entre pavimentos adjacentes

O diferencial de temperatura entre o apartamento superior, onde o ar-condicionado operava em regime contínuo a baixa temperatura (16 °C), e o ambiente inferior, com pouca ou nenhuma climatização, provocou o resfriamento significativo da laje compartilhada. Essa diferença térmica favorece a formação de gradientes de temperatura negativos que podem reduzir a temperatura superficial da laje a níveis próximos ou inferiores ao ponto de orvalho, desencadeando a condensação.

b) Elevada umidade relativa do ar no ambiente inferior

As medições realizadas no plenum entre a laje e o forro indicaram uma **umidade relativa de 77,5%**, valor elevado e fora da faixa recomendada para ambientes internos (idealmente < 60%). A ausência de ventilação forçada, aliada à baixa renovação do ar, contribuiu para o acúmulo de umidade no ambiente, aumentando a saturação e

reduzindo o limite necessário para que ocorra condensação (CIBSE, 2018; Liddament, 1996).

c) Temperatura superficial inferior à temperatura de saturação

A termografia infravermelha revelou uma **temperatura superficial mínima de 19,6 °C**, enquanto o **ponto de orvalho foi calculado em 20,3 °C**, demonstrando que a superfície da laje atingia valores abaixo do limite crítico de saturação do vapor d'água. Tal condição favorece a nucleação de gotículas de condensação na superfície inferior da laje, sobretudo durante longos períodos de operação do sistema de climatização do pavimento superior.

d) Geometria da laje nervurada

A presença de nervuras no sistema estrutural contribui para a criação de zonas com menor espessura de cobrimento e maior contato com o ambiente inferior. Além disso, o sombreamento interno causado pelas nervuras dificulta a dissipação de calor por radiação e convecção natural, concentrando zonas frias na interface com o ar interno (Wu et al., 2024; Huang et al., 2024).

e) Ausência de isolamento térmico entre pavimentos

A laje nervurada avaliada apresentava configuração típica de laje sem isolante térmico incorporado, o que favorece a condução direta do frio do ambiente climatizado superior para o inferior. A ausência de barreiras térmicas acelera a perda de calor, reduzindo a temperatura superficial e ampliando o risco de formação de umidade superficial (Marais et al., 2021; Ouakarrouch et al., 2019).

f) Condições de uso dos ocupantes

A anamnese realizada com os moradores revelou que o apartamento inferior permanecia fechado por longos períodos, sem uso de climatização ou ventilação natural. Esse comportamento impede a renovação do ar e contribui para o acúmulo de umidade no ambiente interno, amplificando as condições favoráveis à condensação.

6. CONCLUSÃO

A investigação técnica realizada neste estudo permitiu identificar e compreender, de forma integrada, os mecanismos que levaram à ocorrência de condensação superficial em uma laje nervurada entre dois pavimentos residenciais. A partir da inspeção visual detalhada, do uso de termografia infravermelha e de medições higrotérmicas, foi possível constatar que a temperatura superficial da laje atingiu valores inferiores ao ponto de orvalho estimado (19,6 °C frente a 20,3 °C), sob uma condição de umidade relativa elevada (77,5%), configurando um ambiente propício à condensação.

A ausência de isolamento térmico adequado, aliada ao uso prolongado de ar-condicionado no pavimento superior e à baixa ventilação no ambiente inferior, revelou-se um fator decisivo para o desenvolvimento da patologia. A geometria da laje nervurada, com áreas sombreadas e menor espessura local, intensificou os gradientes térmicos e favoreceu o resfriamento localizado, especialmente nas regiões centrais da laje. Como medida corretiva, foi proposta e aplicada a instalação de uma manta térmica flexível de alto desempenho, com resistividade térmica $\geq 0,033 \text{ m}^2\text{K/W}$,

com o objetivo de elevar a resistência térmica total do sistema laje-forro, promovendo a estabilização da temperatura superficial e reduzindo significativamente o risco de condensação futura. Além disso, recomendações voltadas à melhoria da ventilação e ao monitoramento contínuo das variáveis ambientais foram indicadas para garantir a eficácia da intervenção ao longo do tempo.

Este estudo evidencia a importância de considerar o comportamento higrotérmico das lajes nervuradas desde a fase de projeto, incorporando soluções preventivas, como o uso de isolantes térmicos e sistemas de ventilação eficientes. A metodologia empregada pode servir como referência para diagnósticos em edificações similares, contribuindo para o desenvolvimento de boas práticas em engenharia diagnóstica e na manutenção da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a variações térmicas e de umidade.

REFERÊNCIAS

AGHBAN, A.; BAHADORI, M.; ROZYN, J.; LEE, M.; ABBAS, A.; BAHADORI, A.; RAHIMALI, A. **Estimation of air dew point temperature using computational intelligence schemes**. *Applied Thermal Engineering*, v. 93, p. 1043–1052, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.071. ResearchGate+2ijeca.info+2researchportal.scu.edu.au+2

Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z., & Mahyuddin, N. (2018). **Thermal conductivity of concrete – A review**. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2018.07.002>.

BAHAR, L.; BAHAR, H. **Application of static condensation in structural analysis**. *International Journal of Civil Engineering*, v. 16, n. 3, p. 371–380, 2018. DOI: 10.1007/s40999-017-0206-5.

BALASBANEH, A. T.; ALKHUHAIRI, S. A.; AHMAD, A. A. **Evaluation of durability and corrosion resistance of reinforced concrete beams exposed to aggressive environments**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00773

Balasbaneh, A., Sher, W., Yeoh, D., & Koushfar, K. (2022). **LCA & LCC analysis of hybrid glued laminated Timber–Concrete composite floor slab system**. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104005>.

Balasbaneh, A., Sher, W., Yeoh, D., & Koushfar, K. (2022). **LCA & LCC analysis of hybrid glued laminated Timber–Concrete composite floor slab system**. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104005>.

BOMBERG, M. T.; KUMARAN, M. K. **Moisture control in buildings**. *ASTM Manual Series: MNL 18*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1998.

Bomberg, M., & Lstiburek, J. (1998). **Case Studies—SPF Used for Remedial Measures**. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 21, 474 - 505. <https://doi.org/10.1177/109719639802100405>.

Bosbach, S., Kalthoff, M., Cruz, M., Adam, V., Matschei, T., & Classen, M. (2023). **Digital Prefabrication of Lightweight Building Elements for Circular Economy: Material-Minimised Ribbed Floor Slabs Made of Extruded Carbon Reinforced Concrete (ExCRC)**. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings13122928>.

CIBSE – **Chartered Institution of Building Services Engineers**. *CIBSE Guide B: Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration*. London: CIBSE, 2018.

Coussian, J., Wissmann, J., & De Sousa Santana De Oliveira, A. (2020). **IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM MARQUISES DE EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE CASCAVEL/PR**. >Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. <https://doi.org/10.4322/cbpat.2020.106>.

DANESHVAR, A.; MOHAMMADI, R.; KHOSHKHOO, H. R. **Effects of corrosion on the structural behavior of reinforced concrete beams**. *Construction and Building Materials*, v. 270, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121473

Daneshvar, K., Moradi, M., Ahmadi, K., & Hajiloo, H. (2021). **Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis**. *Construction and Building Materials*, 284, 122650. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122650>.

Honorio, T., Bary, B., & Benboudjema, F. (2014). **Evaluation of the contribution of boundary and initial conditions in the chemo-thermal analysis of a massive concrete structure**. *Engineering Structures*, 80, 173-188. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.08.050>.

HUANG, Q. et al. **Experimental study on thermal performance and moisture accumulation of ribbed concrete slabs**. *Journal of Building Engineering*, v. 84, 2024. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.106212

Huang, T., Wang, M., Feng, S., Peng, Z., Huang, X., & Song, Y. (2024). **Study on the Coupled Heat Transfer of Conduction, Convection, and Radiation in Foam Concrete Based on a Microstructure Numerical Model**. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14051287>.

HUBER, F. R.; BURGER, J.; MATA FALCON, J.; KAUFMANN, W. **Structural design and testing of material optimized ribbed RC slabs with 3D printed formwork.** *Structural Concrete*, v. 24, n. 2, p. 123–135, 2023. DOI: 10.1002/suco.202200123.Core+1ResearchGate+1

Huber, T., Burger, J., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. (2023). **Structural design and testing of material optimized ribbed RC slabs with 3D printed formwork.** *Structural Concrete*, 24, 1932 - 1955. <https://doi.org/10.1002/suco.202200633>.

ISO. *ISO 13788:2012 – Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.

KASSEM, M. M.; EL-BASTAWISSY, A. H.; EL-BASTAWISSY, H. M. **Dynamic condensation methods for large-scale structural systems.** *Computers & Structures*, v. 272, p. 106789, 2023. DOI: 10.1016/j.compstruc.2022.106789.

LIDDAMENT, M. W. **A guide to energy efficient ventilation**. Coventry, UK: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1996.

LSIBUREK, J. **Building Science Digest 106: Understanding vapor barriers.** *Building Science Corporation*, 2012. Disponível em: <https://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-106-understanding-vapor-barriers>

MARAIS, G.; VORSTER, A.; DE KLERK, D. **Heat transfer performance of concrete walls with different insulation techniques.** *Energy and Buildings*, v. 252, 2021. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111370

Marais, H., Christen, H., Cho, S., Villiers, W., & Zijl, G. (2021). **Computational assessment of thermal performance of 3D printed concrete wall structures with cavities.** *Journal of building engineering*, 41, 102431. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102431>.

MOTA, J. M.; LEAL, V.; MARQUES, P. F. **Avaliação da durabilidade de lajes nervuradas de concreto armado.** *Revista ALCONPAT*, v. 8, n. 3, p. 244-258, 2018.

NAGANNA, N.; KUMAR, M.; REDDY, B. S. **Dew point prediction using machine learning approaches.** *Atmospheric Research*, v. 224, p. 34–41, 2019. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.02.005.

Nguyen, T., Pham, D., & Vu, M. (2019). **Thermo-mechanically-induced thermal conductivity change and its effect on the behaviour of concrete.** *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.146>.

NIE, P.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, Y.; LI, J. **An accurate dew point sensor based on MEMS piezoelectric circular resonator.** *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 280, p. 293–300, 2018. DOI: 10.1016/j.sna.2018.08.012.ScienceDirect

OUAKARROUCH, M. et al. **Energy efficiency enhancement in buildings: A review of insulation materials and design strategies.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 113, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109257

Ouakarrouch, M., Azhary, K., Laaroussi, N., Garoum, M., & Feiz, A. (2019). **Three-dimensional numerical simulation of conduction, natural convection, and radiation through alveolar building walls.** *Case Studies in Construction Materials*, 11. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2019.E00249>.

PAPADRAKAKIS, M.; SAPOUNTZAKIS, E. J. **Efficient static condensation techniques in finite element analysis.** *Computers & Structures*, v. 204, p. 41–57, 2018. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.03.004.

QOLIPOUR, M.; ZIAEI, M.; KAZEMI, M. **Analysis of surface condensation based on dew point temperature.** *Building and Environment*, v. 150, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.001.

QU, W.; FU, Z. **A dynamic condensation method for structural vibration analysis.** *Journal of Sound and Vibration*, v. 217, n. 2, p. 297–305, 1998. DOI: 10.1006/jsvi.1998.1675.

SEMKO, O.; YURIN, O.; FILONENKO, O.; SEMKO, V.; RABENSEIFER, R.; MAHAS, N. **Investigation of moisture condensation on the surface of the bottom chord of a steel truss of a historical building.** *Buildings*, v. 13, n. 3, p. 766, 2023. DOI: 10.3390/buildings13030766.ResearchGate+3MDPI+3Academia+3

SILVA, S. R.; NEVES, R. F.; LEITE, F. P. **Estudo do comportamento higrotérmico de lajes nervuradas e maciças de concreto armado em ambientes tropicais.** *Revista ALCONPAT*, v. 5, n. 1, p. 62-74, 2015.

STRAUBE, J. F.; BURNETT, E. F. **Building science for building enclosures.** Westford: Building Science Press, 2005.

TAO, H.; LI, Y.; ZHANG, X.; WANG, J. **Investigation of dew point behavior in humid climates.** *Building and Environment*, v. 101, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.001.

Teles, D., Santos, D., Cunha, R., Vieira, C., & Amorim, D. (2021). **Manifestações Patológicas causadas por erros em concepção estrutural de edifícios altos: um**

estudo de caso. CONGRESO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN. <https://doi.org/10.4322/conpat2021.470>.

TZANIS, C.; KASSOMENOS, P.; VAROTSOS, C. **Hybrid models for dew point forecasting: applications in urban environments.** *Atmospheric Research*, v. 267, p. 105942, 2022. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105942.

WANG, X.; LI, H.; ZHANG, Y.; ZHAO, Y. **Recent advances in dew point temperature estimation using AI techniques.** *Applied Energy*, v. 305, p. 117738, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117738.

WASKO, C.; SHARMA, A. **Dew point as an indicator of extreme rainfall potential.** *Journal of Hydrology*, v. 564, p. 1001–1010, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.001.

WENG, S.; LI, J.; ZHANG, X.; LIU, Y. **Model reduction via dynamic condensation in structural health monitoring.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 84, p. 35–52, 2017. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.06.001.

WU, X. et al. **Dew-point evaporative cooling in rib-roughened channels: Experimental study of heat and mass transfer.** *International Journal of Thermal Sciences*, v. 200, 2024. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108222

WU, Y.; ZHANG, L.; LI, X.; WANG, Y. **Enhancement of heat and mass transfer in dew point evaporative coolers with rib-roughened channels.** *Energy and Buildings*, v. 297, p. 113857, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113857.

YAHYA, M.; GALÉB, A. R. **Geometrical and mechanical evaluation of ribbed concrete slabs under thermal loads.** *Journal of Building Engineering*, v. 45, p. 103456, 2024. DOI: 10.1016/j.job.2021.103456.

Yahya, Y., & Galeb, A. (2024). **Key effects on the structural behavior of fiber-reinforced lightweight concrete-ribbed slabs: A review.** *Open Engineering*. <https://doi.org/10.1515/eng-2024-0054>.

Yang, W., Li, P., Zhuo, L., Pang, M., Xie, H., & Xiao, M. (2024). **Analytical and experimental analysis of concrete temperature and energy considering open-air environmental variations.** *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64568-6>.

Yang, W., Li, P., Zhuo, L., Pang, M., Xie, H., & Xiao, M. (2024). **Analytical and experimental analysis of concrete temperature and energy considering open-air environmental variations.** *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64568-6>.