

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

CRISTÓVÃO JONAS DE FARIAS MACIEL
JOSÉ MATIAS NETO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA RESISTÊNCIA
DO CONCRETO DURANTE O PERÍODO DE CURA UTILIZANDO UM SISTEMA
DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO**

Cajazeiras-PB
2026

CRISTÓVÃO JONAS DE FARIAS MACIEL
JOSÉ MATIAS NETO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA
RESISTÊNCIA DO CONCRETO DURANTE O PERÍODO DE CURA
UTILIZANDO UM SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro Civil, sob Orientação do Prof. Daniel Torres Filho e Coorientação do Prof. Dr. Fábio Araújo de Lima.

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

- M152a Maciel, Cristóvão Jonas de Farias.
Análise da influência das condições ambientais na resistência do concreto durante o período de cura utilizando um sistema de monitoramento automatizado / Cristóvão Jonas de Farias Maciel, José Matias Neto.– 2026.

20f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

Orientador(a): Prof. Daniel Torres Filho.
Coorientador(a): Prof. Dr. Fábio Araújo de Lima.

1. Construção civil. 2. Estrutura de concreto. 3. Cura de concreto. 4. Condições ambientais. I. Matias Neto, José. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

CRISTÓVÃO JONAS DE FARIAS MACIEL
JOSÉ MATIAS NETO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA RESISTÊNCIA
DO CONCRETO DURANTE O PERÍODO DE CURA UTILIZANDO UM SISTEMA
DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Engenheiro Civil.

Aprovado em 20 de janeiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Daniel Torres Filho – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Prof. Dr. Fábio Araújo de Lima – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Prof. Cicero Joelson Vieira Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Dedicamos este trabalho à nossa parceria,
construída com esforço, confiança e amizade ao
longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, fonte de toda sabedoria e conhecimento, por ser a fonte de toda força nessa jornada, sem o seu auxílio nenhuma conquista seria possível.

Agradeço também aos meus pais, Cláudio José de Souza Maciel e Janiscléa Saraiva Maciel, por serem os primeiros a acreditarem nos meus sonhos e não mediram esforços para auxiliar durante todo o processo. Estendo também esse agradecimento ao meu irmão Dr. Jônatas Cláudio de Farias Maciel.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – *Campus* Cajazeiras, que por meio dos gestores, professores, técnicos e colaboradores, foi o grande propulsor do conhecimento em minha vida acadêmica. De modo especial ao meu orientador o Professor Daniel Torres Filho e ao meu coorientador o Professor Dr. Fábio Araújo de Lima, por acreditarem no projeto desenvolvido, pela dedicação e pelo exemplo de bons professores que me transmitiram durante todo o curso.

Agradeço de modo especial ao meu parceiro de TCC, José Matias Neto, por sua amizade, companheirismo, paciência e colaboração. Sem o seu apoio, nada disso seria realizado com a mesma excelência e qualidade que alcançamos.

Por fim, estendo os agradecimentos a todos que de alguma maneira colaboraram para essa conquista.

Cristóvão Jonas de Farias Maciel

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria e força para perseverar diante dos desafios, iluminando meu caminho até a conclusão desta etapa tão importante.

Aos meus pais, Maria Santana Duarte Matias e Cícero Matias Gonçalves, expresso minha profunda gratidão pelo amor incondicional, pelos conselhos e pelo apoio constante em todos os momentos da minha vida acadêmica e pessoal. À minha irmã, Maria Isadora Duarte Matias, agradeço o carinho e por sempre trazer leveza aos meus dias.

Ao meu professor orientador, Professor Daniel Torres Filho, e ao coorientador, Professor Fábio Araújo de Lima, agradeço a orientação, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao meu parceiro de TCC, Cristóvão Jonas de Farias Maciel, pela parceria, compreensão e esforço compartilhado ao longo desta jornada, tornando o caminho mais leve e significativo.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista.

José Matias Neto

RESUMO

A cura do concreto é uma etapa crítica que define suas propriedades mecânicas finais, sendo diretamente influenciada pelas condições ambientais de temperatura e umidade. Em canteiros de obras, a falta de controle dessas variáveis pode comprometer a resistência e a durabilidade das estruturas. Este trabalho teve como objetivo principal analisar a influência das condições ambientais na resistência à compressão do concreto durante o período de cura, utilizando um sistema automatizado de monitoramento em tempo real. A metodologia consistiu na dosagem de dois traços de concreto (1:2:3 e 1:2:2), moldagem de corpos de prova e sua submissão a dois ambientes distintos: um externo (sem controle) e outro em estufa com umidade controlada (>95%). Um sistema baseado no microcontrolador ESP-32 e sensores digitais (HDC1080 e DHT22) monitorou continuamente a temperatura e a umidade relativa. Aos 7, 14 e 28 dias, foi realizado o ensaio de compressão. Os resultados demonstraram que o ambiente externo, caracterizado por temperaturas elevadas (28-38°C) e baixa umidade relativa (40-70%), levou a resistências inferiores e a uma maior variabilidade entre corpos de prova. Em contraste, a cura em estufa, que manteve umidade estável próxima a 100% e variação térmica inferior a 2°C, proporcionou ganhos de resistência superiores a 20% aos 28 dias e um comportamento mecânico mais uniforme. A análise descritiva dos dados do monitoramento revelou correlações negativas significativas entre a temperatura externa e a resistência, validando a hipótese de que a instabilidade ambiental é um fator decisivo.

Palavras-chave: cura do concreto; condições ambientais; monitoramento automatizado; resistência à compressão; ESP-32.

ABSTRACT

Concrete curing is a critical stage that defines its final mechanical properties, being directly influenced by environmental conditions of temperature and humidity. On construction sites, the lack of control of these variables can compromise the strength and durability of structures. This work aimed to analyze the influence of environmental conditions on the compressive strength of concrete during the curing period, using an automated real-time monitoring system. The methodology consisted of dosing two concrete mixes (1:2:3 and 1:2:2), molding specimens, and submitting them to two distinct environments: an external one (uncontrolled) and another in a controlled humidity chamber (>95%). A system based on the ESP-32 microcontroller and digital sensors (HDC1080 and DHT22) continuously monitored temperature and relative humidity. At 7, 14, and 28 days, the axial compression test was performed. The results showed that the external environment, characterized by high temperatures (28-38°C) and low relative humidity (40-70%), led to lower strengths and greater variability among specimens. In contrast, curing in the chamber, which maintained stable humidity close to 100% and thermal variation below 2°C, provided strength gains greater than 20% at 28 days and more uniform mechanical behavior. Descriptive analysis of the monitoring data revealed significant negative correlations between external temperature and strength, validating the hypothesis that environmental instability is a decisive factor.

Keywords: concrete curing; environmental conditions; automated monitoring; compressive strength; ESP-32.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1	O CONCRETO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	13
3.1.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	14
3.1.2	INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO	15
3.2	CURA DO CONCRETO	16
3.2.1	TIPOS DE CURA	16
3.2.1.1	Cura Úmida	16
3.2.1.2	Cura Térmica	17
3.2.1.3	Cura Química	17
3.2.2	IMPACTOS DA CURA INADEQUADA	18
3.3	TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO, AUTOMAÇÃO E AVANÇOS NACIONAIS NO CONTROLE DA CURA DO CONCRETO	18
4	METODOLOGIA	22
5	RESULTADOS E ANÁLISES	25
5.1	ANÁLISES DAS TEMPERATURAS AMBIENTES INTERNAS E EXTERNAS	25
5.2	ANÁLISES DAS UMIDADE RELATIVAS DO AR NO AMBIENTE INTERNO E EXTERNO	27
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	32
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido à sua versatilidade, durabilidade e elevado desempenho estrutural. Entretanto, suas propriedades finais não estão condicionadas apenas à qualidade dos materiais, composição dos materiais ou ao traço empregado, mas principalmente às condições pelas quais o material é submetido durante o processo de cura. Essa etapa é determinante para o desenvolvimento da sua microestrutura e, conseqüentemente, para a resistência à compressão, propriedade essencial para a segurança e desempenho das estruturas ao longo de sua vida útil.

De acordo com Neville (2016), a eficiência da cura está diretamente associada ao avanço contínuo das reações de hidratação, reforçando a necessidade de controle ambiental adequado. Entretanto, em muitos canteiros de obras, sobretudo aqueles expostos às intempéries, a falta de controle rigoroso das variáveis ambientais compromete significativamente o desempenho final das estruturas, uma vez que fatores como altas temperaturas, ventos fortes e baixa umidade relativa podem acelerar a perda de água, prejudicando a hidratação do cimento e ocasionando reduções significativas na resistência final do concreto, já que o controle dessas variáveis ambientais nem sempre é realizado de maneira satisfatória, conforme apontam Mehta e Monteiro (2014).

Nos últimos anos, a construção civil tem passado por transformações associadas à digitalização e automação de processos, fenômeno característico da Indústria 4.0. Apesar disso, Freitas (2015) aponta que o setor ainda apresenta dificuldades para incorporar plenamente tecnologias emergentes, permanecendo dependente de procedimentos manuais e inspeções visuais que, muitas vezes, não fornecem informações precisas ou contínuas. Nesse cenário, torna-se urgente a adoção de práticas que promovam o controle efetivo do ambiente de cura do concreto, a fim de assegurar a qualidade e a segurança das construções. Dessa forma, a automação surge como uma ferramenta capaz de contribuir para a precisão e confiabilidade dos dados obtidos, a fim de assegurar a qualidade e a segurança das construções. Sistemas simples baseados em plataformas como a ESP32, associados a sensores digitais de temperatura e umidade, permitem monitoramento contínuo e fornecem informações mais detalhadas sobre as condições ambientais durante a cura, fortalecendo as análises e reduzindo o risco de erros operacionais.

Recentes estudos de Maciel *et al.* (2024a), evidenciaram que o uso de sensores automatizados durante a cura do concreto possibilita compreender de forma mais precisa a influência das condições ambientais no ganho de resistência do concreto, revelando

comportamentos que não seriam evidenciados com medições isoladas ou esporádicas. Além disso, a coleta contínua de dados possibilita criar um histórico completo das condições do ambiente de cura, permitindo interpretar oscilações nas variáveis ambientais, identificar riscos potenciais como secagem precoce ou gradientes térmicos e relacionar essas variáveis diretamente com os resultados de resistência à compressão.

Compreender a influência das condições ambientais sobre a resistência final do concreto é, portanto, de extrema relevância para a engenharia civil, uma vez que orienta a adoção de melhores práticas de execução, mesmo em cenários adversos. Além disso, fortalece a necessidade de integrar tecnologias inovadoras ao setor, contribuindo não apenas para a qualidade das obras, mas também para a evolução acadêmico-científica, ao promover estudos experimentais e o desenvolvimento de novas soluções práticas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a influência das condições ambientais na resistência do concreto, a partir de um estudo experimental que incorpora um sistema automatizado de monitoramento, desenvolvido a partir de uma placa ESP e sensores de temperatura e umidade, para acompanhar em tempo real as condições ambientais de cura do concreto. Foram produzidos dois traços distintos, submetidos a regimes de cura em ambiente externo e em uma estufa, com o objetivo de analisar a influência direta das condições ambientais no desenvolvimento da resistência à compressão ao longo desse período. Dessa forma, busca-se reforçar a importância do controle ambiental durante a cura, mesmo em obras de pequeno e médio porte, e fomentar a aplicação de tecnologias automatizadas no setor da construção civil.

2 OBJETIVOS

Nesta seção, são apresentados os objetivos que nortearão o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão do Curso (TCC).

2.1 OBJETIVO GERAL

Compreender como diferentes condições ambientais impactam o desenvolvimento da resistência mecânica do concreto ao longo do período de cura, monitorando essas condições de forma automatizada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

No sentido de atingir o objetivo geral da proposta, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar durante o período de cura dos corpos de prova de concreto em diferentes condições ambientais;
- comparar os efeitos da cura em ambiente externo e em ambiente controlado (estufa) no processo de endurecimento do concreto;
- verificar a influência das diferentes condições de cura na resistência à compressão dos corpos de prova de concreto;
- analisar a relação entre as variações de temperatura e umidade e os resultados de resistência à compressão obtidos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados os principais aspectos teóricos relacionados ao concreto e ao processo de cura, com ênfase na influência das condições ambientais sobre o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas. Inicialmente, discute-se a importância do concreto como material estrutural amplamente utilizado na construção civil, destacando suas propriedades mecânicas, suas limitações e a influência da composição dos seus constituintes no desempenho final.

Em seguida, apresenta-se o conceito de cura do concreto, ressaltando sua relevância para o adequado desenvolvimento das reações de hidratação do cimento, responsáveis pela obtenção da resistência e da durabilidade do material. São descritos os diferentes métodos de cura utilizados na prática, assim como os prejuízos ocasionados pela execução inadequada desse processo, que pode comprometer significativamente a integridade e a vida útil das estruturas.

Por fim, são apresentados os avanços tecnológicos aplicados ao monitoramento e à automação do processo de cura, com destaque para o uso de sensores digitais, sistemas automatizados e soluções baseadas nos princípios da Indústria 4.0. Também são discutidos estudos e experimentos realizados no Brasil que investigam a influência das condições ambientais na resistência do concreto e a aplicação de tecnologias de monitoramento, reforçando a relevância científica e prática do tema para a construção civil.

3.1 O CONCRETO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O concreto ocupa uma posição de destaque entre os materiais estruturais utilizados na construção civil, principalmente por sua elevada resistência à compressão, versatilidade de moldagem e durabilidade quando corretamente dosado e executado (Helene *et al.* 2019). Resultante da mistura de cimento, agregados (miúdos e graúdos) e água, esse compósito apresenta propriedades que o tornam especialmente adequado para a execução de elementos estruturais como pilares, vigas, lajes e fundações. Sua capacidade de suportar grandes cargas de compressão é essencial para garantir a estabilidade e a integridade das estruturas.

Além disso, o concreto pode ser projetado com diferentes resistências e características específicas, permitindo sua adequação a distintas demandas estruturais e ambientais. Essa versatilidade é um dos fatores que mais contribuem para sua ampla utilização. O material pode ser moldado *in loco* em diversas formas ou produzido em elementos pré-fabricados de alta precisão, sendo amplamente empregado tanto em edificações convencionais quanto em obras

de infraestrutura complexa, como pontes, túneis e barragens. O avanço de tecnologias, como o concreto de alto desempenho (CAD), o concreto autoadensável e o concreto reforçado com fibras, tem ampliado significativamente as possibilidades de aplicação desse material (Neville, 2016).

Do ponto de vista econômico, o concreto representa uma solução eficiente e acessível. A disponibilidade local das matérias-primas e a possibilidade de produção próxima aos canteiros reduzem custos logísticos e tornam o material sustentável sob o ponto de vista produtivo. Estruturas bem projetadas e executadas, conforme destaca Rossignolo (2009), exigem baixa manutenção ao longo da vida útil, o que reforça sua viabilidade técnica e econômica.

Contudo, o desempenho final do concreto não depende apenas da sua composição ou do processo de execução, mas também das condições ambientais às quais é submetido, especialmente durante a etapa de cura. A fase de cura é determinante para o ganho de resistência, visto que é nela que ocorrem as reações de hidratação do cimento, responsáveis pela formação da matriz que confere rigidez e coesão ao compósito. Assim, variáveis como temperatura e umidade relativa do ar influenciam diretamente a evolução dessas reações e, consequentemente, o comportamento mecânico do concreto ao longo do tempo.

Dessa forma, compreender as propriedades do concreto e os fatores que as afetam é essencial para se obter um material de qualidade. O controle inadequado dessas variáveis pode resultar em fissuração prematura, retração excessiva e perda de desempenho mecânico, comprometendo a integridade estrutural e a durabilidade da obra.

3.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

O comportamento mecânico do concreto está diretamente relacionado à sua capacidade de resistir a diferentes tipos de esforços, especialmente os de compressão e tração. Isaia (2005) destaca que a resistência à compressão é a propriedade mais relevante, sendo o parâmetro fundamental no controle da qualidade e no dimensionamento estrutural. Essa resistência depende fortemente da eficiência do processo de hidratação do cimento, o qual é sensível às condições de temperatura e umidade durante a cura.

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), os concretos são classificados de acordo com sua resistência característica à compressão à idade de 28 dias. A norma define duas classes principais: os concretos normais, cujas resistências variam de 20 MPa a 50 MPa, e os concretos de alta resistência, que apresentam valores superiores a 50 MPa. Essa classificação orienta a

escolha do concreto conforme as exigências estruturais e o desempenho requerido na obra. No entanto, esses valores podem variar significativamente de acordo com o ambiente de cura, uma vez que temperaturas elevadas aceleram a hidratação, mas podem provocar fissuras por retração térmica, enquanto ambientes muito secos intensificam a evaporação da água, reduzindo o ganho de resistência.

A resistência à tração, por sua vez, é cerca de 8% a 12% da resistência à compressão e reflete a fragilidade do concreto frente a esforços de tração. Ensaio normalizados, como o de compressão axial, NBR 5739 (ABNT, 2018), o de tração por compressão diametral, NBR 7222 (ABNT, 2011) e o de tração na flexão, NBR 12142 (ABNT, 2010), são utilizados para mensurar essas propriedades. Contudo, é importante ressaltar que os resultados desses ensaios também estão diretamente relacionados ao processo de cura e às condições ambientais de exposição, reforçando a necessidade de monitorar e controlar essas variáveis para garantir resultados consistentes.

Assim, o estudo da resistência à compressão e à tração não deve ser dissociado da análise do ambiente onde a cura do concreto se desenvolve, pois essas condições exercem papel decisivo na formação de sua microestrutura e, conseqüentemente, em seu desempenho mecânico e durabilidade.

3.1.2 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO

A composição do concreto é um fator determinante para suas propriedades mecânicas e para seu desempenho estrutural ao longo do tempo, mas também influencia a sensibilidade do material às variações ambientais durante a cura. O concreto é formado basicamente por cimento, agregados, água e, frequentemente, aditivos químicos e adições minerais. Cada componente contribui de forma específica para a resistência e o comportamento do compósito ao longo do tempo.

Neville (2016) resalta que a relação água/cimento (a/c) é o parâmetro mais importante para determinar a resistência e a durabilidade do concreto. Relações a/c elevadas aumentam a porosidade e diminuem a resistência, enquanto relações muito baixas reduzem a hidratação, especialmente em condições de baixa umidade. Assim, a interação entre a composição do concreto e as variáveis ambientais torna-se essencial para o controle da qualidade.

As adições minerais, como sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, promovem reações pozolânicas que densificam a microestrutura e aumentam a resistência (Mehta; Monteiro, 2014). Contudo, concretos com essas adições podem apresentar maior sensibilidade

à temperatura e à umidade durante a cura, exigindo um controle ambiental mais rigoroso para que atinjam o desempenho esperado.

Dessa maneira, a análise da composição e do comportamento do concreto deve estar integrada ao estudo das condições ambientais durante o processo de cura, uma vez que temperatura, umidade e evaporação exercem influência determinante na resistência final e na durabilidade das estruturas.

3.2 CURA DO CONCRETO

A cura do concreto é uma das etapas mais importantes do processo construtivo, pois garante que a hidratação do cimento ocorra de forma adequada e contínua. Esse procedimento consiste em manter condições adequadas para a hidratação do cimento. De acordo com Neville (2016), a eficiência da cura está diretamente relacionada ao ganho de resistência e à durabilidade do material, sendo responsável por assegurar o desenvolvimento pleno das propriedades mecânicas e de impermeabilidade.

A NBR 5738 (ABNT, 2016) estabelece os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova, ressaltando que a falta de controle adequado das variáveis ambientais pode comprometer significativamente o desempenho final do concreto. Para Mehta e Monteiro (2014), a cura é essencial não apenas para o ganho de resistência, mas também para evitar a formação de microfissuras e o aumento da permeabilidade, fatores que reduzem a vida útil das estruturas.

3.2.1 TIPOS DE CURA

Existem diferentes métodos de cura que podem ser adotados conforme as condições climáticas, o tipo de obra e a disponibilidade de recursos. Entre os métodos mais comuns estão: cura úmida, cura térmica e cura química.

3.2.1.1 Cura Úmida

Consiste na manutenção da superfície do concreto constantemente molhada por meio de aspersão, submersão ou cobertura com mantas úmidas. É o método mais tradicional e eficiente, pois mantém o teor de umidade necessário à hidratação (Neville, 2016).

De acordo com Helene (2013), nas grandes obras de engenharia civil, as formas mais comuns de cura úmida do concreto incluem métodos que visam manter a superfície constantemente hidratada ou isolada da perda de água. Entre os principais procedimentos,

destacam-se o represamento ou imersão, quando o elemento de concreto é mantido submerso ou cercado por água; o borrifamento contínuo ou aplicação de neblina de água, que garante um suprimento constante de umidade e o uso de revestimentos saturados, como mantas e cobertores úmidos, que atuam como barreiras físicas à evaporação.

3.2.1.2 Cura Térmica

Aplicada principalmente em elementos pré-moldados, consiste no uso de calor (vapor ou resistência elétrica) para acelerar o processo de hidratação. Embora aumente o ganho de resistência inicial, requer controle rigoroso de temperatura para evitar fissuração térmica (Mehta; Monteiro, 2014).

A cura térmica tem como objetivo principal acelerar o processo de hidratação do cimento, possibilitando que o concreto atinja a resistência mecânica mínima desejada em um intervalo de tempo reduzido. Esse método consiste em submeter os elementos de concreto a temperaturas elevadas e controladas, de forma programada, promovendo o ganho rápido de resistência inicial e otimizando o tempo de desforma e produção, especialmente em elementos pré-moldados (Bardella *et al.*, 2005).

3.2.1.3 Cura Química

A cura química consiste em um processo de cura do concreto realizado por meio da aplicação, geralmente por borrifamento, de substâncias específicas sobre a superfície recém-concretada, com o objetivo de formar uma película impermeável que sela o concreto e impede a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento. Entre os produtos utilizados nesse método, destacam-se ceras, acrílicos, parafinas, resinas e o PVA (poliacetato de vinila), que atuam criando uma barreira protetora temporária.

Conforme Helene (2013), esse tipo de cura é especialmente eficaz nas primeiras idades do concreto ou argamassa, pois mantém a umidade interna do material, assegurando a continuidade das reações de hidratação. Além de reduzir os efeitos de retração por secagem, que podem ocasionar o surgimento de fissuras, a cura química contribui significativamente para o desenvolvimento adequado das resistências mecânicas e para o aumento da durabilidade do concreto.

A escolha do método adequado depende do tipo de estrutura, do ambiente de exposição e dos requisitos de desempenho. Independentemente do método adotado, o período de cura deve ser suficiente para que o concreto atinja as propriedades desejadas, sendo recomendados,

conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), no mínimo sete dias de cura para concretos comuns e maior tempo para concretos de alto desempenho.

3.2.2 IMPACTOS DA CURA INADEQUADA

A execução inadequada ou a ausência de cura provoca efeitos severos no desempenho do concreto, tanto a curto quanto a longo prazo. Quando o concreto perde água rapidamente, o processo de hidratação é interrompido, o que resulta em redução da resistência à compressão, formação de microfissuras e aumento da porosidade (Isaia, 2005). Esses fatores não apenas diminuem a resistência mecânica, mas também comprometem a durabilidade da estrutura, tornando-a mais vulnerável à carbonatação, penetração de íons cloreto e corrosão das armaduras.

Estudos realizados por Mehta e Monteiro (2014) mostram que concretos submetidos a curas inadequadas podem apresentar até 50% de redução na resistência à compressão em comparação com concretos curados em condições ideais. Além disso, o aumento da permeabilidade decorrente da má cura contribui para a degradação precoce da estrutura, elevando custos de manutenção e reduzindo a vida útil das construções.

A NBR 12655 (ABNT, 2022) reforça que o controle da cura deve ser incorporado ao planejamento executivo das obras, como parte do processo de garantia da qualidade do concreto. Dessa forma, a cura inadequada não deve ser vista apenas como uma falha operacional, mas como um problema técnico que pode comprometer a segurança estrutural e o desempenho global da edificação.

3.3 TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO, AUTOMAÇÃO E AVANÇOS NACIONAIS NO CONTROLE DA CURA DO CONCRETO

O avanço tecnológico observado nas últimas décadas tem promovido transformações significativas no setor da construção civil, impulsionando a adoção de sistemas de automação e monitoramento voltados à otimização de processos, à redução de falhas e ao aprimoramento do controle de qualidade (Maciel *et al.*, 2024b). No âmbito da engenharia do concreto, tais inovações têm se mostrado particularmente relevantes no acompanhamento do processo de cura, uma vez que fatores ambientais, como temperatura e umidade relativa, influenciam diretamente o desenvolvimento da resistência e da durabilidade do material. Dessa forma, o monitoramento contínuo e automatizado desses parâmetros torna-se uma ferramenta essencial para assegurar o desempenho esperado das estruturas de concreto (Macioski; Medeiros, 2018).

As tecnologias aplicadas ao monitoramento da cura do concreto baseiam-se, em grande parte, na utilização de sensores capazes de registrar, em tempo real, variáveis críticas. Esses dispositivos podem ser inseridos na massa do concreto ou posicionados externamente, de modo a avaliar as condições do ambiente de exposição, transmitindo as informações coletadas para sistemas integrados de controle. Conforme exposto por Maciel *et al.* (2024b), o emprego de sensores conectados por meio da Internet das Coisas (IoT) tem possibilitado a coleta e a análise instantânea de dados, favorecendo a tomada de decisões durante a execução da obra e permitindo intervenções imediatas em caso de variações que possam comprometer o processo de cura.

Entre as tecnologias mais utilizadas, destacam-se os sensores de temperatura e umidade, os sensores de maturidade e os sensores de resistência elétrica. Os sensores de maturidade, por exemplo, são amplamente empregados para estimar a evolução da resistência do concreto, com base na relação entre temperatura e tempo, conforme descrito na norma americana ASTM C1074:2019. Já os sensores de umidade e temperatura auxiliam na identificação de ambientes de cura inadequados, possibilitando ajustes no processo, como a intensificação da umidificação ou o uso de coberturas protetoras. O uso combinado desses dispositivos, associado a sistemas automatizados, contribui significativamente para a redução de fissuras e perdas de resistência decorrentes de curas mal executadas (Maciel *et al.*, 2024b).

Os sistemas automatizados de monitoramento representam outro avanço relevante no controle da cura do concreto. Tais sistemas são compostos por unidades de controle eletrônico que processam os dados obtidos pelos sensores e, por meio de algoritmos predefinidos, acionam mecanismos de correção, como irrigadores automáticos, ventiladores ou coberturas térmicas. Desse modo, o processo de cura deixa de depender exclusivamente da intervenção humana, tornando-se mais preciso, eficiente e confiável. A automação aplicada ao controle da cura reduz as variações térmicas internas e minimiza as perdas de umidade, favorecendo um ganho de resistência mais uniforme e previsível (Maciel *et al.*, 2024b).

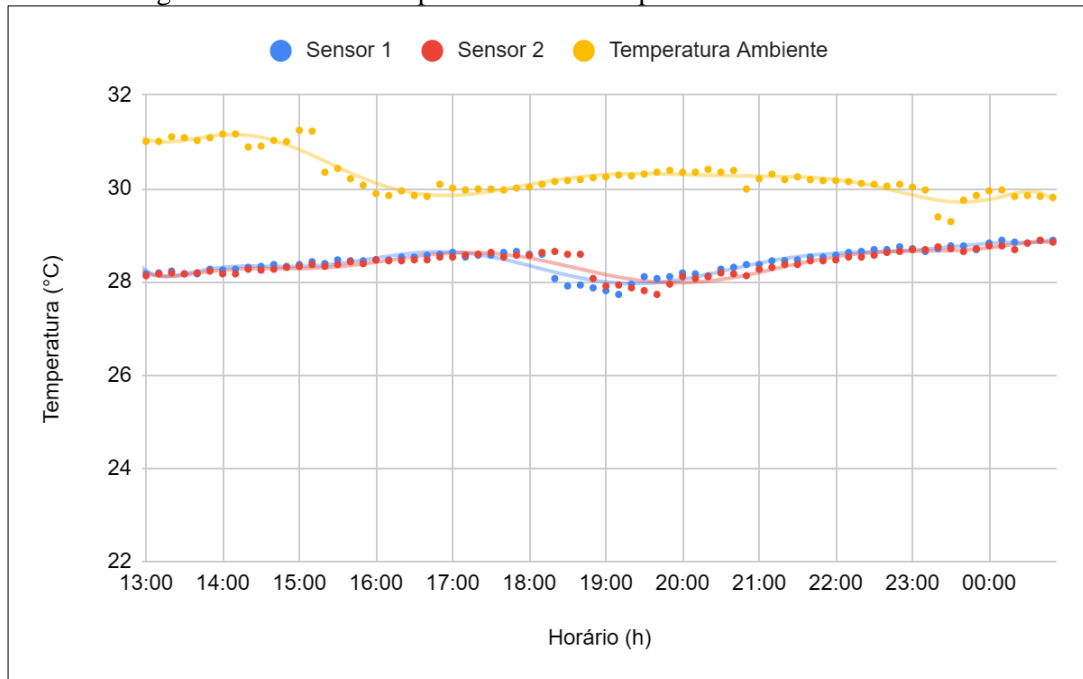
No contexto nacional, observa-se um aumento das pesquisas voltadas à incorporação dos conceitos da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas (IoT) na engenharia civil, especialmente no monitoramento e na automação da cura do concreto. Um exemplo é o estudo desenvolvido por Maciel *et al.* (2024b) no Instituto Federal da Paraíba (IFPB), que propôs um sistema automatizado para aquisição de dados da cura de vigas de concreto. O sistema foi estruturado a partir da plataforma microcontrolada ESP-32 acoplada a sensores de temperatura e umidade (modelos IR MLX90614 e HDC1080 de alta precisão). O conjunto realizava leituras

automáticas a cada dez minutos, armazenando-as em um cartão SD no formato .txt, posteriormente organizadas em planilhas digitais.

Os sensores foram dispostos tanto no centro quanto nas extremidades das vigas, permitindo a análise detalhada da variação térmica e higrométrica ao longo de toda a estrutura. Essa configuração possibilitou uma avaliação mais abrangente das condições de cura e contribuiu para a homogeneização do processo. Segundo os resultados obtidos por Maciel *et al.* (2024b), constatou-se que os valores obtidos pelos sensores 2 localizado na extremidade da viga e o sensor 1 localizado no centro foram consistentes entre si, indicando uma boa concordância entre os sensores. Em relação à temperatura ambiente, os dados mostraram uma variação relativamente estável ao longo do período de observação, sugerindo uma faixa de temperatura consistente, dado que a coleta foi realizada em ambiente laboratorial parcialmente controlado. Ao considerar o horário das medições em um período de 12 h, foi possível identificar padrões temporais ao longo do dia, o que pode ser útil para entender melhor as variações nos dados e consequentemente sua interferência na cura do concreto e em sua resistência mecânica. A temperatura mínima do concreto, registrada, foi de 29,29°C enquanto a máxima não passou de 31,25°C, com a maior variação ficando em 1,96°C. Os dados da coleta podem ser observados na Figura 1. Os autores destacam que a automação reduziu significativamente as oscilações térmicas e eliminou a necessidade de acompanhamento manual constante, além de proporcionar maior confiabilidade na análise dos resultados e melhor desempenho mecânico do concreto após a cura.

A solução proposta por Maciel *et al.* (2024b) também se destaca pelo baixo custo de implementação, pela simplicidade operacional e pela viabilidade de replicação em diferentes contextos construtivos, demonstrando o potencial das tecnologias embarcadas e da automação na modernização dos processos de controle tecnológico na construção civil. Além disso, o uso de plataformas programáveis como a ESP-32, aliadas a sensores de alta precisão, representa um avanço importante rumo à digitalização e à integração de sistemas inteligentes no ambiente construtivo.

Figura 1: Dados de Temperatura durante o período de cura do concreto



Fonte: Autoria Própria

Outros estudos brasileiros corroboram essa tendência. Cavalcanti *et al.* (2018) ressaltam que a aplicação de sensores inteligentes e sistemas automatizados tem promovido transformações profundas na construção civil, ao passo que Freitas (2015) reforça que a automação é um caminho essencial para o aumento da produtividade e da precisão das atividades executivas, reduzindo falhas humanas e otimizando o controle de qualidade em obras de médio e grande porte.

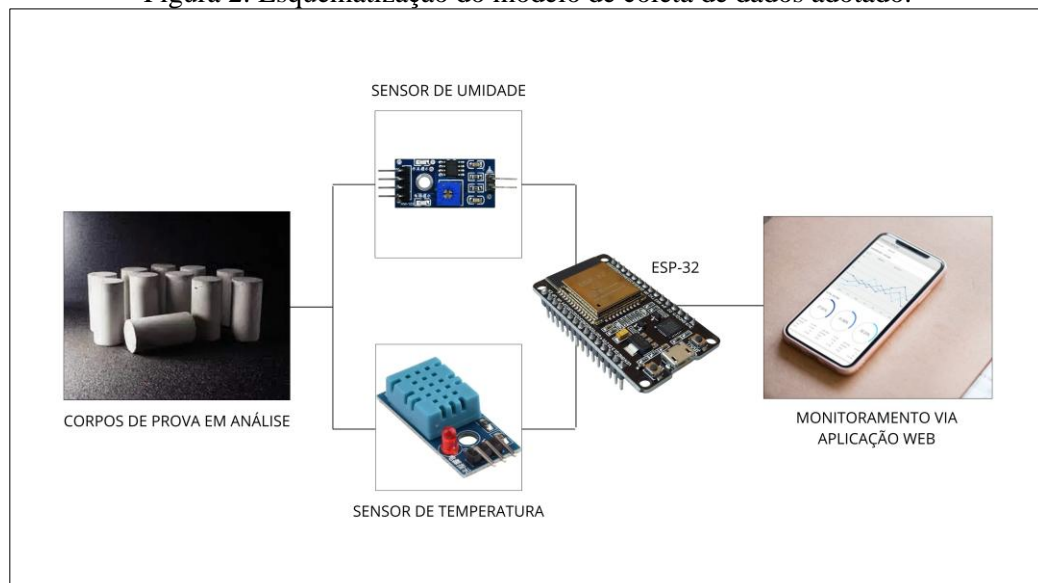
4 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida com base na continuidade de projetos anteriores do grupo de pesquisa. Esses projetos tiveram como foco o desenvolvimento de um sistema automatizado capaz de monitorar, em tempo real, as condições de temperatura e umidade relativa do ar durante o período de cura do concreto, parâmetros fundamentais para monitorar a evaporação superficial e o bom desenvolvimento das propriedades mecânicas do material.

O sistema automatizado utilizado para a coleta de dados foi composto por um microcontrolador ESP-32, responsável, respectivamente pela leitura, armazenamento e transmissão dos dados, e pelos sensores digitais HDC1080 e DHT22, que medem a temperatura e umidade. O DHT22 combina internamente um termistor digital e um sensor capacitivo de umidade, que converte as variações térmicas e a quantidade de vapor d'água presente no ar em sinais elétricos. Esses dados são processados pelo ESP-32, que, por meio de programação dedicada, registra automaticamente as medições em intervalos regulares, permitindo o acompanhamento contínuo das condições ambientais sem necessidade de medições manuais.

Os dados são transmitidos diretamente para site ThingSpeak que é usado para projetos de IoT, onde ficam armazenados e disponíveis para download em formato .csv (*comma-separated values*), um formato de arquivo de texto simples para armazenar dados tabulares, garantindo assim, o registro e a rastreabilidade das informações para posterior análise. O modelo de coleta está representado na Figura 2.

Figura 2: Esquemática do modelo de coleta de dados adotado.



Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, os ensaios do estudo em questão tiveram início com a mistura do concreto, sendo realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus* Cajazeiras, para isso foram adotados dois traços de concreto, sendo eles (1:2:3) com relação água/cimento de 0,50, e (1:2:2) com relação água/cimento de 0,60, porém utilizando os mesmos materiais constituintes (cimento Portland, areia média, brita 19 e água potável). Essa escolha visou observar não apenas os efeitos das condições de cura, mas também como diferentes composições de concreto respondem a essas variações ambientais.

A partir disso foram moldados corpos dois corpos de prova para determinação da resistência para cada período de cura de 7, 14 e 28 dias para ambos os traços. Em seguida, cada traço foi submetido às seguintes condições ambientais:

- Situação 1 – sem controle das condições ambiental: os corpos de prova foram curados em ambiente natural, sem qualquer controle de temperatura ou umidade. Este grupo serviu de referência para observar as variações naturais que ocorrem em campo. A Figura 3 e mostra o ambiente em questão.

Figura 3: Corpos de Prova em ambiente externo.



Fonte: Autoria Própria.

- Situação 2 – estufa: os corpos de prova foram mantidos em uma estufa com umidade controlada acima de 95% mediante a utilização de uma bandeja com água, que promoveu a evaporação e aumento da concentração de vapor d'água no ambiente e com a temperatura ambiente da sala onde a estrutura foi montada. Essa condição buscou se aproximar da cura ideal de acordo com a norma técnica NBR 5738 (ABNT, 2016). A estufa foi desenvolvida utilizando uma estrutura de PVC e lona, a fim de manter a umidade. As Figuras 4 e 5 mostram o ambiente em questão.

Figura 4: Estufa que abriga os corpos de prova em ambiente controlado.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5: Corpos de prova em ambiente controlado.



Fonte: Autoria Própria.

A resistência do concreto foi avaliada por meio do ensaio de compressão axial, seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018) aos 7, 14 e 28 dias de idade. Os resultados foram analisados e comparados com as variáveis ambientais registradas, buscando-se identificar correlações entre o regime de cura e o desenvolvimento da resistência do concreto ao longo do tempo. A partir dessa análise foi possível identificar de forma quantitativa e qualitativa a influência das condições ambientais no desenvolvimento da resistência do concreto ao longo do tempo.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

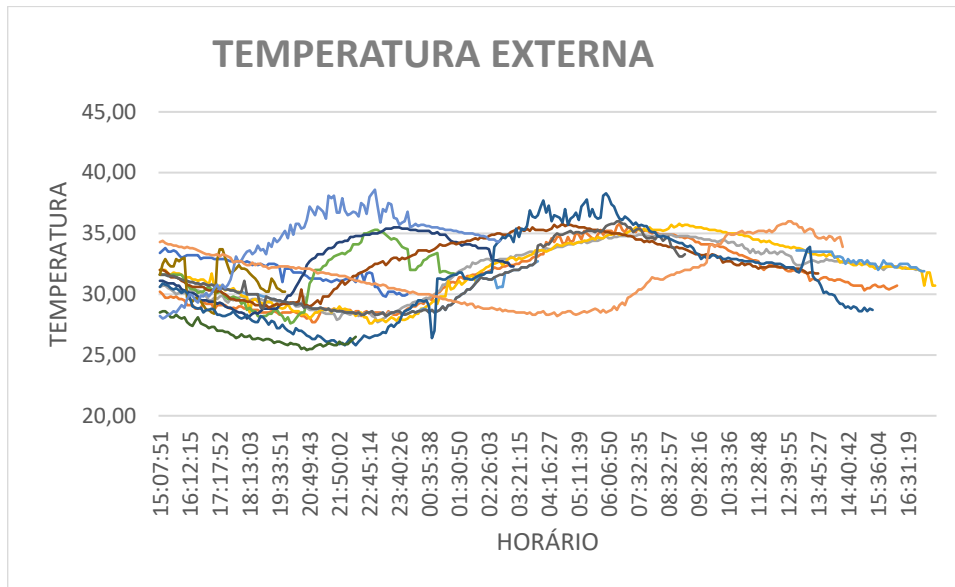
A análise dos dados obtidos ao longo do período de monitoramento permitiu avaliar de forma geral a influência das condições ambientais no desenvolvimento da resistência mecânica do concreto durante a fase de cura. Os resultados apresentados nesta seção foram organizados de forma a relacionar diretamente as variáveis ambientais com o comportamento estrutural dos corpos de prova, possibilitando uma compreensão clara da importância do controle das variáveis analisadas durante o processo de hidratação do cimento.

5.1 ANÁLISES DAS TEMPERATURAS AMBIENTES INTERNAS E EXTERNAS

A análise dos dados de temperatura externa, composta por 2.651 pontos coletados pelo sistema de monitoramento durante um período de 28 dias a cada 5 minutos, revelou que o ambiente natural apresentou temperaturas mais elevadas, característica da região. As temperaturas variaram aproximadamente entre 26°C e 38°C durante o período observado, conforme ilustrado no Gráfico 1, com oscilações diárias de até 12,5°C. Embora tais temperaturas possam acelerar as reações iniciais de hidratação do cimento, elas também intensificam significativamente a evaporação da água de amassamento, sobretudo quando combinadas com a baixa umidade relativa do ar registrada no estudo. Esse cenário favorece o surgimento de microfissuras e a interrupção parcial das reações químicas responsáveis pela formação dos compostos hidratados, essenciais para o desenvolvimento adequado da resistência do concreto.

Assim, torna-se evidente que a temperatura externa, apesar das oscilações moderadas, exerceu um impacto negativo sobre o ganho de resistência do concreto. Cabe destacar, ainda, que após o 14º dia de monitoramento, o sistema apresentou falhas operacionais que impediram a continuidade da coleta de dados até os 28 dias previstos, limitando a análise durante os dias propostos.

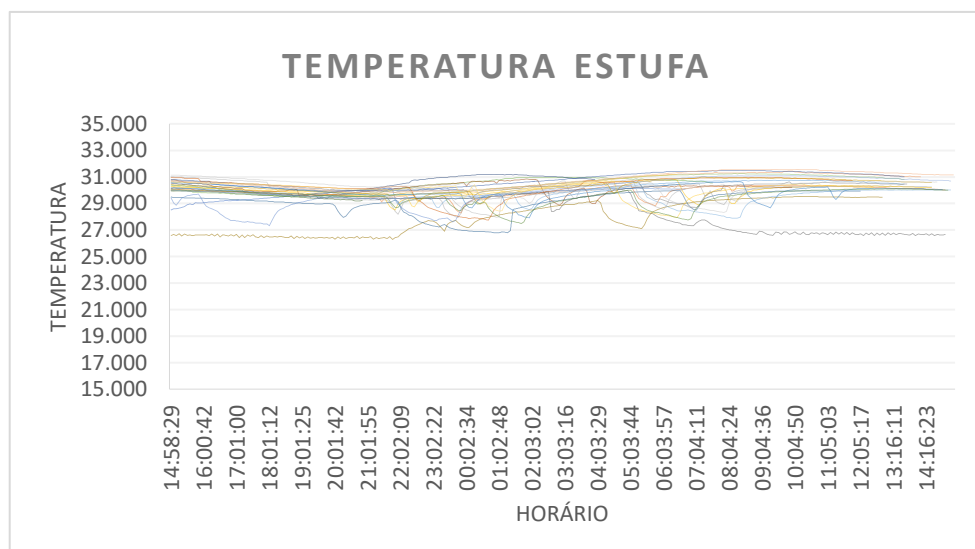
Gráfico 1: Temperatura Ambiente Externa.



Fonte: Autoria Própria.

Em contraste, os dados registrados no interior da câmara, totalizando 6.881 pontos, evidenciaram elevada estabilidade. A análise dos valores indicou que a temperatura interna permaneceu dentro de uma faixa consideravelmente estreita, variando tipicamente entre 26°C e 31°C, conforme ilustrado no Gráfico 2, com oscilações diárias inferiores a 3,6°C. Essa estabilidade está em consonância com as recomendações da literatura especializada, que reforçam a importância de evitar gradientes térmicos acentuados e variações bruscas de temperatura durante as primeiras idades do concreto, uma vez que tais fenômenos podem gerar tensões internas e comprometer a microestrutura em formação.

Gráfico 2: Temperatura na Estufa.

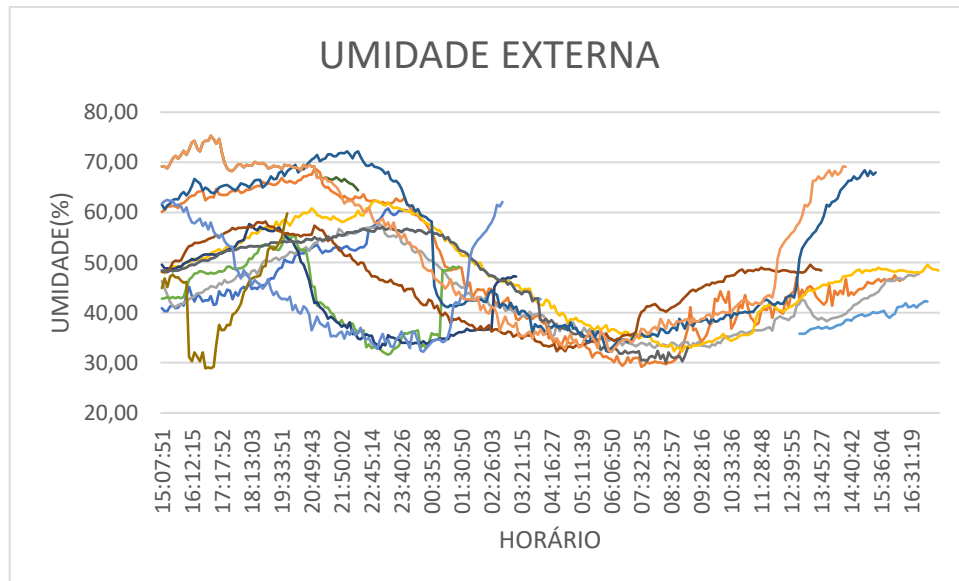


Fonte: Autoria Própria.

5.2 ANÁLISES DAS UMIDADE RELATIVAS DO AR NO AMBIENTE INTERNO E EXTERNO

A umidade relativa externa apresentou valores bastante baixos, variando entre 29% e 75% durante o período de observação. Esses índices se encontram muito abaixo do mínimo recomendado para uma cura adequada, uma vez que, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), a umidade deve ser mantida acima de 95% para garantir a hidratação plena do cimento. A baixa umidade relativa do ar no ambiente externo pode promover uma intensa evaporação de água do concreto, contribuindo para a interrupção da hidratação, perda de massa por secagem superficial e aumento da suscetibilidade à fissuração por retração plástica. Cabe destacar que, no Gráfico 3 apresentado, algumas quebras nas linhas de tendência resultam de falhas momentâneas no sistema de monitoramento, ocasionadas por instabilidades na conexão e interrupções de comunicação entre o sensor e a plataforma de registro, e não de ausência real de umidade.

Gráfico 3: Umidade Externa.

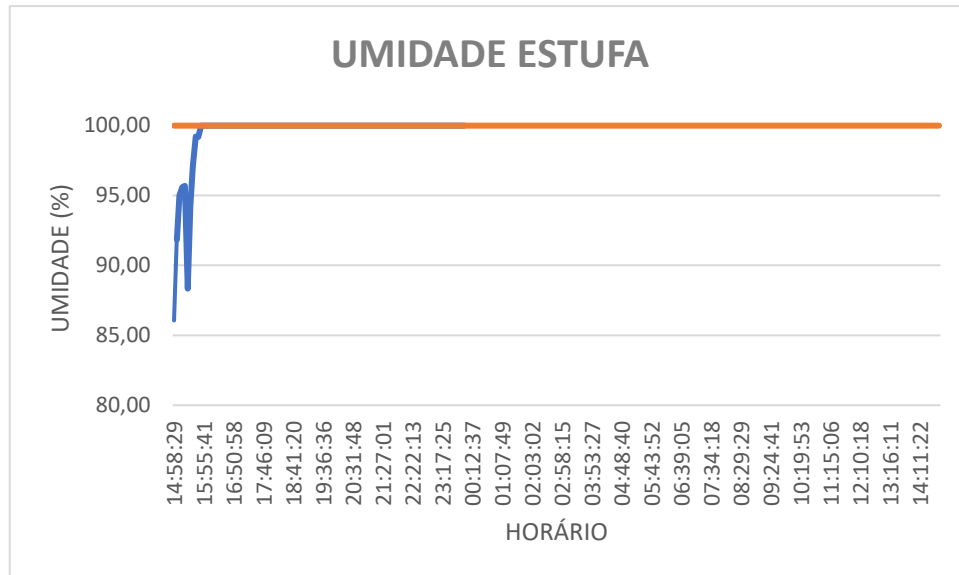


Fonte: Autoria Própria.

Por outro lado, a umidade relativa interna da câmara, manteve-se em níveis ideais ao longo de todo o processo, mantendo-se estável em 99,99%, conforme Gráfico 4. Essa constância indica a eficiência do sistema de vedação utilizado, que conseguiu impedir perdas significativas de vapor de água e criar um ambiente de cura semelhante ao recomendado pelas

normas técnicas. A alta umidade relativa é fundamental para evitar a evaporação da água necessária às reações de hidratação, assegurando que o concreto se mantenha em condições favoráveis para o desenvolvimento de uma microestrutura densa e homogênea.

Gráfico 4: Umidade na Estufa.

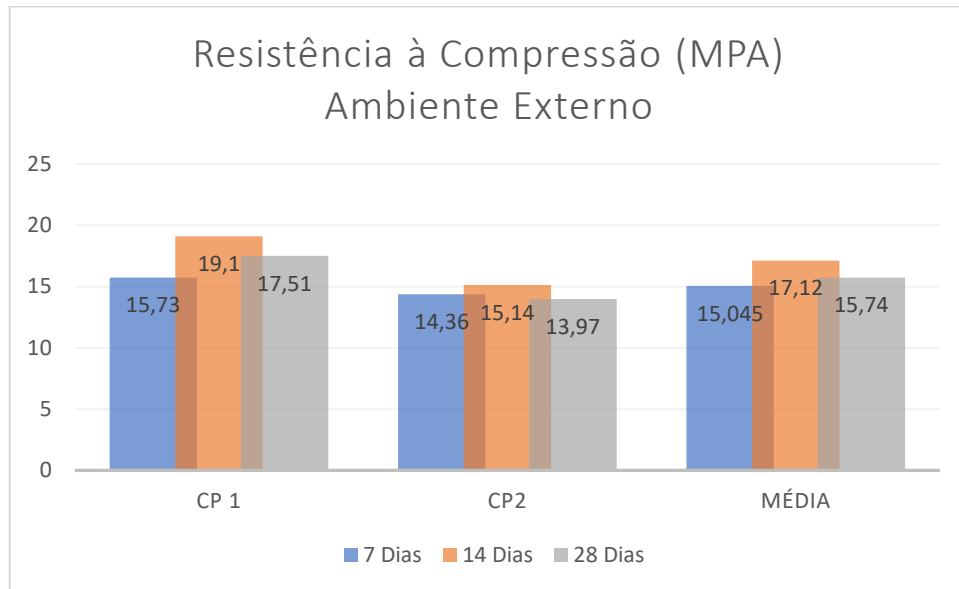


Fonte: Autoria Própria.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

A análise dos resultados de resistência à compressão evidência de forma clara a influência das condições ambientais no desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos estudados, bem como diferenças entre os ambientes de cura (externo e estufa), entre os traços e até mesmo entre os corpos de prova (CP1 e CP2). No Traço 1, observa-se inicialmente que as resistências obtidas no ambiente externo apresentaram desempenho inferior e comportamento menos uniforme quando comparadas com aquelas desenvolvidas pelo concreto em estufa. Aos 7 dias, o CP1 registrou 15,73 MPa enquanto o CP2 apresentou 14,36 MPa, resultando em média de 15,045 MPa. Aos 14 dias, porém, as discrepâncias aumentam consideravelmente: o CP1 atingiu 19,1 MPa enquanto o CP2 alcançou apenas 15,14 MPa. Aos 28 dias, esse comportamento se repetiu, com valores de 17,51 MPa para o CP1 e 13,97 MPa para o CP2, esses valores podem ser observados no Gráfico 5.

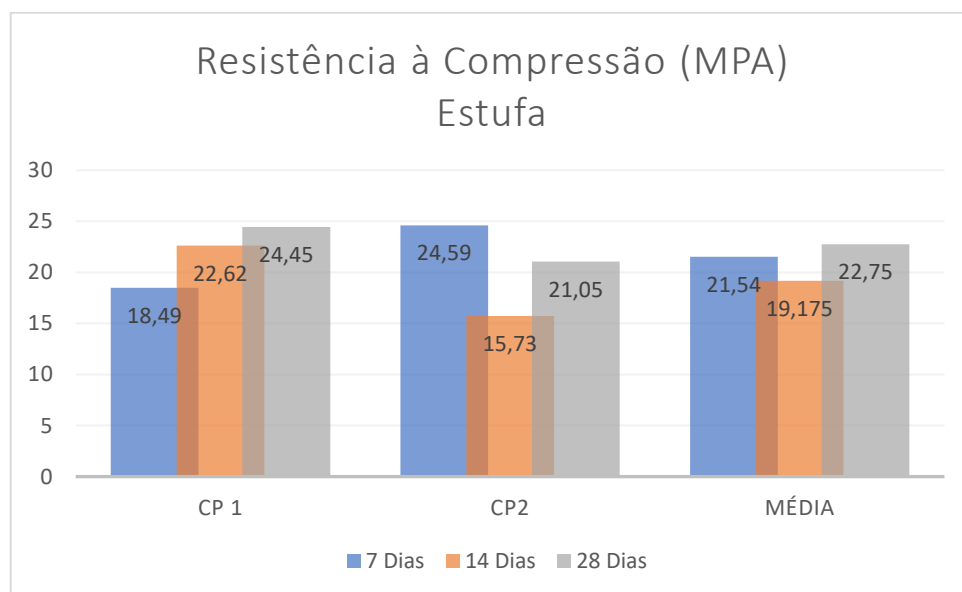
Gráfico 5: Resistências à compressão traço 1 no ambiente externo (CP1, CP2 e Média).



Fonte: Autoria Própria.

Já no caso do traço 1, cujo concreto passou o período de cura em estufa aos 7 dias, o CP1 apresentou 18,49 MPa enquanto o CP2 atingiu 24,59 MPa, indicando que ambos se beneficiaram da elevada umidade e temperatura estável, mas com desempenho particular elevado do CP2. Aos 14 dias, a discrepância mais marcante entre CP1 e CP2 ocorreu no estudo: o CP1 atingiu 22,62 MPa enquanto o CP2 apresentou apenas 15,73 MPa. Aos 28 dias, os valores voltam a convergir, com 24,45 MPa no CP1 e 21,05 MPa no CP2, reforçando que o ambiente de estufa promoveu hidratação contínua.

Gráfico 6: Resistências à compressão traço 1 na estufa (CP1, CP2 e Média).



Fonte: Autoria Própria.

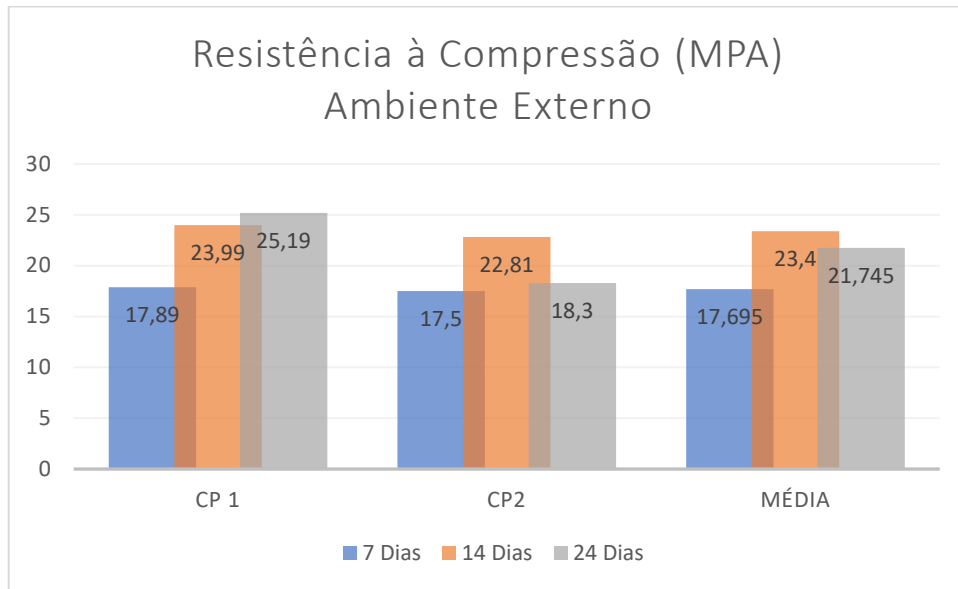
Por ser um traço mais rico em cimento, o traço 2, conforme Gráfico 7, apresentou comportamento aproximadamente 20% superior ao Traço 1. No ambiente externo, aos 7 dias, CP1 e CP2 apresentaram valores muito próximos, 17,89 MPa e 17,5 MPa, respectivamente. Aos 14 dias, ambos os corpos de prova se destacaram: 23,99 MPa no CP1 e 22,81 MPa no CP2, configurando o melhor desempenho no ambiente natural entre todos os ensaios. Contudo, aos 28 dias, ocorre novamente uma assimetria significativa, com o CP1 atingindo 25,19 Mpa, enquanto o CP2 atingiu para 18,3 Mpa de resistência.

Sob cura em estufa, conforme Gráfico 8, o Traço 2 apresentou o conjunto mais consistente de resultados. Aos 7 dias, CP1 e CP2 registraram valores praticamente idênticos, 22,8 MPa e 22,62 MPa, indicando ambiente altamente favorável à hidratação inicial. Aos 14 dias, o alcance foi de 25,55 MPa no CP1 e 26,15 MPa no CP2. Aos 28 dias, o CP1 sofre leve redução para 22,82 MPa enquanto o CP2 atingiu 25,38 Mpa de resistência.

A análise integrada dos resultados mostrou que o Traço 2 apresentou desempenho superior ao Traço 1 em todas as idades e em ambos os ambientes de cura, comportamento associado à sua menor relação água/cimento. De modo geral, verificou-se que a estufa proporcionou os melhores desempenhos mecânicos, promovendo ganhos de resistência mais contínuos e uniformes ao longo do tempo, enquanto a cura em ambiente externo limitou a evolução das reações de hidratação, especialmente após os 14 dias, em função da elevada evaporação e da ausência de controle das condições ambientais. Observou-se ainda que, em ambos os traços, as diferenças entre os corpos de prova (CP1 e CP2) foram mais acentuadas no ambiente externo, evidenciando que a falta de controle ambiental intensifica irregularidades internas e amplia a variabilidade dos resultados.

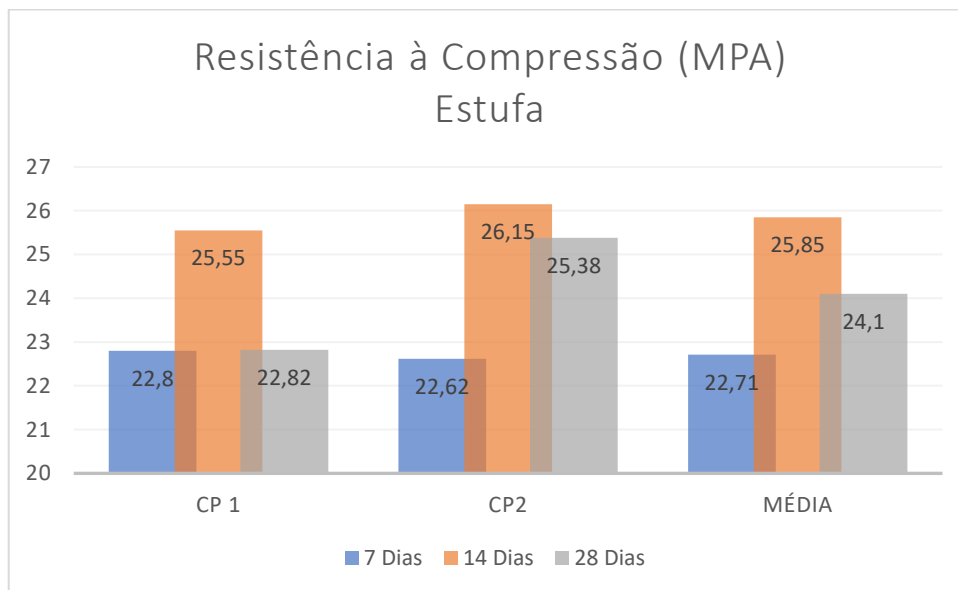
A estufa, por sua vez, contribuiu para a redução dessas diferenças. Ressalta-se, por fim, que todos os corpos de prova foram rompidos na condição seca, situação em que a resistência à compressão tende a apresentar valores ligeiramente superiores quando comparada à condição saturada. Ainda assim, os resultados obtidos confirmam a importância da cura adequada, uma vez que a estufa proporcionou incrementos superiores a 20% nas resistências aos 28 dias, reforçando o papel decisivo do controle ambiental no desempenho final do concreto.

Gráfico 7: Resistências à compressão traço 2 no ambiente externo (CP1, CP2 e Média).



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 8: Resistências à compressão traço 2 na estufa (CP1, CP2 e Média).



Fonte: Autoria Própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência das condições ambientais na resistência à compressão do concreto durante o período de cura, utilizando dois traços distintos, onde os concretos foram curados em diferentes ambientes. Os resultados obtidos demonstraram que a cura desempenha papel determinante no desenvolvimento da microestrutura cimentícia e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas do concreto.

As análises mostraram que o ambiente externo, caracterizado por elevadas temperaturas, baixa umidade relativa, apresentando oscilações acentuadas, conduziu a uma perda de eficiência da hidratação, refletida em menores resistências em todas as idades estudadas. Além disso, observou-se maior variabilidade entre os corpos de prova, evidenciando que condições ambientais instáveis resultam em maiores diferenças para uma mesma idade e mesmo traço.

Em contraste, a cura realizada na estufa proporcionou condições mais estáveis, com controle da umidade, favorecendo a continuidade das reações de hidratação e resultando em resistências superiores para ambos os traços. A uniformidade observada entre os corpos de prova em ambiente controlado reforça que a manutenção de umidade adequada e a redução de gradientes térmicos são essenciais para a formação de uma microestrutura mais densa e menos suscetível a defeitos internos.

A utilização de um sistema automatizado de monitoramento, contribuiu para a qualidade das análises ao permitir a coleta contínua dos parâmetros ambientais ao longo do processo de cura. Esse acompanhamento em tempo real trouxe maior confiabilidade aos dados obtidos e evidenciou a potencialidade de integrar tecnologias simples e de baixo custo ao monitoramento da cura em obras reais.

De modo geral, os resultados confirmam a importância do controle das condições ambientais durante a cura do concreto e destacam que mesmo pequenas variações de umidade e temperatura podem impactar de forma expressiva o desempenho mecânico do material. Assim, a adoção de práticas mais rigorosas de cura, mesmo em obras de pequeno porte, é fundamental para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de pesquisas que ampliem o período de monitoramento para idades superiores a 28 dias, de modo a avaliar o comportamento do concreto em fases mais avançadas de hidratação e identificar eventuais variações tardias de resistência. Sugere-se também a comparação entre diferentes métodos de cura, como a cura úmida contínua, a aplicação de membranas de cura e a cura submersa,

permitindo analisar alternativas práticas e economicamente viáveis para distintos contextos de obra.

Além disso, a incorporação de novos sensores pode enriquecer o processo de monitoramento, incluindo sensores distribuídos em diferentes profundidades do elemento, sensores específicos de umidade interna do concreto e dispositivos de medição de deformações, ampliando a compreensão das interações entre variáveis ambientais e comportamento mecânico. Outra possibilidade de aprofundamento consiste na avaliação de diferentes composições de concreto, explorando aditivos, adições minerais e variadas relações água/cimento, a fim de identificar como cada formulação responde às condições ambientais durante a cura.

Por fim, destaca-se a relevância de aplicar o sistema de monitoramento automatizado em elementos estruturais reais, como vigas, pilares e lajes moldadas em obra, o que possibilitaria validar os resultados obtidos em laboratório e aproximar o estudo das condições reais encontradas no canteiro de obras.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C1074-19**: standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142**: concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- BARDELLA, P. S. 1º Encontro nacional de pesquisa projeto produção em concreto pré-moldado. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto Forno com Utilização de Sílica Ativa**. São Carlos – SP, nov. 2005. Disponível em: https://set.eesc.usp.br/1enppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/115.pdf. Acesso em: 12 Out. 2025
- CAVALCANTI, Vladyr Yuri Soares de Lima; SOUZA, George Henriques de; SODRÉ, Marcelle Afonso Chaves; ABREU, Márcia Suzana Dutra de; MACIEL, Tuanny da Silva; SILVA, José Martinho de Albuquerque. Indústria 4.0: desafios e perspectivas na construção civil. **Revista Campo do Saber**, Cabedelo/PB, v. 4, n. 4, p. 146–158, 2018.
- FREITAS, J. T. **Automação na construção civil**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2015. Disponível em: https://repositorio.ueg.br/jspui/bitstream/riueg/4793/2/JEAN%20THARLEY%20DE%20FREITAS_TCC_EC.pdf. Acesso em: 12 Out. 2025.
- HELENE, P.; LEVY, S. M. Qual é a cura recomendada para a estrutura de concreto? **Boletín Técnico n.º 8**. Mérida: ALCONPAT – Asociación Latinoamericana de Control de Calidad,

Patología y Recuperación de la Construcción, 2013.

HELENE, Paulo R. L.; BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernado Fonseca. Patologia de estruturas. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. ISBN 978-85-7975-340-4.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO-IBRACON. **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2020.

ISAIA, G. C. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

MACIEL, C. J. de F.; SILVA, J. D.; MATIAS NETO, J.; RODRIGUES, J. C. P.; TORRES FILHO, D.; LIMA, F. A. de. Automatização para aquisição de dados da cura de vigas de concreto. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 12., 2024, Natal. **Anais** [...]. Natal: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2024a. Disponível e: 0.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0402. Acesso em: 12 Out. 2025.

MACIEL, C. J. F. *et al.* Automatização para aquisição de dados da cura de vigas de concreto. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, XII (CONEM 2024), Natal-RN, 2024b. Disponível em: <https://abcm.org.br/pb/aceso-livre> . Acesso em 15. Out. 2025.

MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Monitoramento de estruturas de concreto com rede de Bragg em fibra óptica. *In*: ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, 3. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339054278>. Acesso em: 8 out. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto leve estrutural**: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. São Paulo: PINI, 2009.