



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES TÉRMICAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

ALEBRANTE, Victor Eduardo da Silva¹
PERES, Maria Vânia Nogueira do Nascimento²

RESUMO: O concreto autoadensável destaca-se pela elevada trabalhabilidade e qualidade, porém sua resistência à compressão depende das condições de cura submetido. Este trabalho avaliou a influência de variações térmicas no desempenho mecânico do material, onde foram moldados corpos de prova cilíndricos submetidos a três regimes: cura aquecida a 55 °C, resfriada a -18 °C e convencional a 22 °C. Os ensaios de compressão axial foram realizados aos 3, 7 e 28 dias, conforme normas da ABNT. A análise estatística realizou um comparativo entre as médias e complementou-se utilizando o método ANOVA, com nível de significância de 5%. De forma geral, ambas as condições influenciaram significativamente nos primeiros dias de cura, mas somente a cura em temperatura reduzida manteve diferença significativa aos 28 dias.

Palavras-chave: concreto, temperatura, cura, resistência, compressão.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é atualmente o segundo material mais empregado no mundo, ficando atrás apenas da água. Trata-se da junção de aglomerante (cimento), agregados graúdos (britas graduadas), agregados miúdos (areia natural e/ou artificial) e água, que, por meio do processo exotérmico de liberação de energia, tem o seu endurecimento e posterior aquisição de resistência mecânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Atualmente, há um número crescente de estudos sobre o concreto. Isso se deve à elevada disponibilidade de seus insumos, facilitando a confecção e propiciando um custo relativamente baixo na produção.

Esses estudos abrangem as mais diversas aplicações, tais como: concreto resfriado com gelo (para concretagens de grandes volumes), concreto colorido (usado para fins arquitetônicos), concreto projetado (para a construção de túneis e outros casos críticos) e o concreto autoadensável, sendo esse o objetivo de estudo deste trabalho.

¹ Victor Eduardo da Silva Alebrante, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: vesalebrante@minha.fag.edu.br.

² Maria Vânia Nogueira do Nascimento Peres, Mestre, Engenheira civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR.



De acordo com Tutikian (2021), o concreto autoadensável apresenta diversos benefícios, dentre eles: a aceleração da construção, devido ao seu rápido lançamento e a não necessidade de adensamento, a redução da mão de obra, a melhoria no acabamento superficial e a diminuição de falhas patológicas no concreto.

Apesar de todos os benefícios apontados no uso do CAA, este também demanda cuidados no processo de hidratação do cimento — processo este conhecido como cura —, assim como o concreto convencional. Alguns procedimentos para a correta aplicação e posterior cura incluem: controle tecnológico mapeado com rompimentos de corpos de prova; controle do processo de aplicação, respeitando as alturas de lançamento e adensamento; e o controle da temperatura do concreto e do ambiente (CARVALHO *et al.*, 2020).

O procedimento de cura adequado é um dos principais quesitos no processo de pega/endurecimento e ganho de resistência mecânica do concreto. Fatores como a temperatura ambiente e a hidratação são fundamentais para esse controle.

Infelizmente, de acordo com Waskow e Gerholdt (2021), as mudanças climáticas têm se mostrado cada vez mais alarmantes, um exemplo evidente é a região noroeste dos Estados Unidos, historicamente conhecida por seu clima ameno e frio, que recentemente registrou temperaturas extremas, atingindo 38,8°C por vários dias consecutivos — um fenômeno atípico e preocupante para a região.

Frente a essa questão, evidencia-se a necessidade de insumos que sejam compatíveis com variações climáticas extremas. Nesse sentido, este trabalho busca responder ao seguinte questionamento: Como as diferentes temperaturas de cura afetam o desempenho e as propriedades do concreto autoadensável?

Acredita-se que temperaturas mais elevadas durante o processo de cura acelerem as reações de hidratação do cimento, resultando em maiores resistências nas idades iniciais. No entanto, conforme estabelece a NBR 14931 (ABNT, 2023), em concretagens realizadas sob temperatura ambiente superior a 35 °C, devem ser adotadas medidas preventivas para evitar a perda excessiva de água do concreto. Por outro lado, temperaturas mais baixas tendem a retardar essas reações, o que pode resultar em resistências mecânicas reduzidas nos primeiros dias de cura.



Dessa forma, o objetivo geral desse trabalho é analisar o comportamento mecânico do concreto autoadensável submetido a diferentes variações térmicas de cura. Para que este trabalho científico alcance o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a influência da temperatura de aquecimento na resistência à compressão axial do concreto;
- Determinar a influência da temperatura de resfriamento na resistência à compressão axial do concreto;
- Comparar o desempenho do concreto mantido em temperatura ambiente com as amostras submetidas a variações térmicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável surgiu da necessidade de um insumo que fosse independente da qualidade da mão de obra aplicada, ou seja, que preenchesse as formas de maneira homogênea e completa, mesmo em estruturas densamente armadas, sem a necessidade de vibração mecânica. Esse tipo de concreto foi desenvolvido para garantir maior qualidade, durabilidade e produtividade na construção civil, reduzindo falhas de compactação e melhorando o acabamento superficial (CALADO *et al.*, 2015).

Segundo a NBR 15823 (ABNT, 2017), o conceito de concreto autoadensável seria o concreto que pudesse fluir, tendo seu adensamento pelo próprio peso do concreto, sendo capaz de preencher todos os vazios da forma e passando por todos os obstáculos, sendo esses, as armaduras, insertos e demais dispositivos acoplados. Tudo isso, enquanto mantém toda sua estrutura e homogeneidade.

Esse produto é relativamente novo quando comparado com o concreto convencional, no entanto, vem ganhando espaço no mercado. Tal avanço se justifica pelos diversos benefícios associados à sua aplicação em campo, os quais vêm sendo comprovados por estudos e experiências práticas na construção civil.

De acordo com um estudo nacional realizado em uma obra de edificação vertical, no estado do Ceará, os benefícios do concreto autoadensável foram notáveis. Segundo Costa



(2019), ao ser analisado os dados de ruídos, custos, tempo de execução, quantificação e qualificação de mão de obra, constatou-se que o uso do concreto autoadensável propiciou uma melhora de 60,7% na produtividade, com uma taxa de concretagem 46,1% superior. Outros aspectos verificados foram a redução dos ruídos gerados, em torno de 10,6%, a redução da mão de obra em 42,5% e a diminuição de 50% dos equipamentos, quando comparados às obras com o uso do concreto convencional.

2.2 Aditivos químicos

Para a confecção do concreto autoadensável, utiliza-se os mesmos materiais que o concreto convencional, no entanto, para se ter o efeito desejado de plasticidade e trabalhabilidade, utilizam-se aditivos químicos na composição do traço. Será esse material que fornecerá as principais características do concreto autoadensável (PRE-FABRICAR, s. d.)

Para a produção do aditivo superplastificante, sendo esse o mais utilizado para a confecção do concreto autoadensável, utilizam-se principalmente polímeros policarboxilatos, materiais esses obtidos a partir do ácido acrílico e ácido maleico (HARTMANN, 2002).

O aditivo superplastificante é utilizado para aumentar a fluidez do concreto, facilitando seu manejo e aplicação, especialmente em situações que exigem alta trabalhabilidade. Ele é adicionado na etapa de produção do concreto, pouco antes do início da concretagem. Seus efeitos são visíveis após poucos segundos de aplicação, onde o concreto irá iniciar o processo de mistura do aditivo na argamassa, mudando as propriedades físico-químicas do concreto (ALMEIDA e EVARISTO, 2017).

Segundo a empresa PG Química (s.d.), a ativação do aditivo superplastificante atua através de dois mecanismos distintos: repulsão eletrostática do cimento e estrutura molecular ramificada. Essas duas características fazem com que as partículas dos cimentos sejam dispersadas, reduzindo a quantidade de água e por consequência, gerando o aumento da resistência.



2.3 Agregados

Segundo o dicionário brasileiro da língua portuguesa, a palavra agregado vem do latim *aggregatus*, que tem a partir da sua etimologia a definição de ser adjunto, parte de algo. Para a construção civil, seu significado é o mesmo, sendo os agregados, uma das partes fundamentais para esse mercado.

De acordo com dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA (2018), o consumo anual de agregados como areia e brita ultrapassa 40 bilhões de toneladas em escala global. Esse volume expressivo demonstra a relevância dos agregados para o setor da construção civil, uma vez que eles constituem a maioria do volume do concreto e desempenham um papel fundamental na resistência, durabilidade e viabilidade econômica das estruturas.

Quanto à origem, a NBR 7211 (ABNT, 2022), faz a classificação dos agregados da seguinte maneira:

Naturais: aqueles que podem ser usados em seu estado natural, como exemplo a areia de rio e seixos rolados.

Artificiais: aqueles obtidos a partir de processos físicos, como exemplo a areia artificial, gerada através do processo de britagem e peneiramento de minerais;

Industriais: obtidos por processos industriais, como exemplo a escória de alto forno, resíduo gerado a partir da produção do aço.

2.3.1 Agregado miúdo

A NBR 7211 (ABNT, 2022), define os agregados miúdos como materiais granulares de pequena dimensão, cuja maior parte dos grãos possui diâmetro inferior a 4,75 mm.

Para a construção civil, a areia natural proveniente de leitos de rios é o principal tipo de agregado miúdo utilizado. Isso se deve à sua versatilidade, sendo amplamente empregada tanto em elementos estruturais — como pilares e vigas — quanto em argamassas de assentamento e revestimento, além de outros acabamentos estéticos (CÍCERO, s. d.).

Dentre as vantagens da areia natural, Almeida (2021), destaca que, por se tratar de um material inerte — que não reage fisicamente ou quimicamente com o cimento e a água —, ela



contribui para a estabilidade da mistura, atuando para a melhoria da coesão e redução da fissuração por retração.

Em função da crescente escassez e dos impactos ambientais associados à extração de areia natural, a areia artificial — proveniente da britagem e peneiramento de rochas — tem sido cada vez mais adotada como alternativa na produção de concretos. No entanto, seu uso exige controle rigoroso da curva granulométrica e do teor de finos, a fim de evitar problemas de empacotamento e garantir a trabalhabilidade adequada (GUIMARÃES e GOMES, 2020).

Segundo estudos como os de Barbosa *et al.* (2008), quando corretamente dosada, a areia artificial pode substituir parcial ou totalmente a areia natural sem comprometer significativamente as propriedades do concreto. Esse avanço contribui para a sustentabilidade da construção civil, permitindo o aproveitamento de materiais reciclados e reduzindo a pressão sobre os recursos naturais.

2.3.1 Agregado graúdo

A NBR 7211 (ABNT, 2022), define os agregados graúdos como materiais granulares de maior dimensão, cuja maior parte dos grãos possui diâmetro superior a 4,75 mm e inferior a 76,2 mm.

Segundo Silva (2019), o tipo mais utilizado de agregado graúdo na construção civil é a brita graduada, obtida por meio do processo de britagem de rochas de grande porte, como granito, basalto e calcário. A extração dessas rochas geralmente envolve operações com o uso de explosivos, o que exige rigorosos protocolos de segurança e planejamento logístico.

Segundo Furlanetto (2021), a brita graduada é um importante aliado na economia, pois aumenta o volume do concreto sem impactar na resistência. Infelizmente, por sua rigidez, pode acabar impactando na trabalhabilidade do concreto, desse modo, se torna necessário a análise de aplicação do concreto e qual a melhor faixa granulométrica de agregado graúdo a utilizar.

Felizmente, com o avanço da industrialização no setor de mineração, é possível obter agregados com uma ampla variedade de faixas granulométricas, o que amplia sua aplicabilidade nas diferentes demandas da construção civil. No segmento de pré-fabricados, por exemplo, é comum a utilização da brita 0 do tipo VSI, que passa por um processo de britagem com impacto vertical, resultando em grãos com formas mais arredondadas e menor angulosidade. Essa



característica favorece o acabamento superficial das peças e melhora a coesão da mistura, facilitando a aplicação (BOARETTO, 2017).

2.4 Aglomerante

Aglomerante, segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990) são produtos constituídos majoritariamente por material pulverulento e que, quando na presença de água, tem alterações físico-químicas, ativando propriedades aglutinantes.

Para a produção do concreto, o aglomerante utilizado é o cimento Portland, sendo esse material datado de cerca de 4500 anos atrás, onde indícios apontam para o uso já na velha Roma (ABCP, s.d.).

Segundo dados do Resumo de Mercadorias Minerais de Cimento do U.S. Geological Survey (2023), a produção de cimento Portland nos Estados Unidos no ano de 2022 foi de aproximadamente 95 milhões de toneladas, representando um aumento de 9,95% em relação ao ano de 2018.

Atualmente, o cimento é produzido por meio de processos industriais que envolvem a extração de diversos minerais, como calcário, argila e gesso. Após a extração, esses materiais passam por um processo de moagem, originando a chamada farinha bruta. Em seguida, essa mistura é levada a fornos que atingem temperaturas de até 1450 °C, onde ocorre a formação do clínquer — material granulado com dimensões de até 25 mm. Por fim, o clínquer passa por uma nova etapa de moagem, na qual são adicionadas outras substâncias, como a escória de alto forno e a pozolana, resultando na obtenção do cimento Portland (COCHRANE, 2024).

2.5 Cura do concreto

O processo de hidratação do cimento, popularmente conhecido como cura, é uma das etapas cruciais para o ganho de resistência mecânica do concreto. Esse processo destina-se a retardar a evaporação da água de amassamento do concreto, permitindo desse modo o ganho efetivo da resistência mecânica e a minimização das manifestações patológicas. Esse processo de hidratação pode ser realizado de diversas maneiras, como a saturação da superfície do concreto com água ou o uso de aditivos químicos (VELASCO, 2018).



A cura do concreto inicia-se poucas horas após o lançamento, logo após o fim da pega do cimento – período de manutenção do concreto, onde o concreto ainda apresenta maleabilidade. Para a hidratação correta do cimento, é necessário atender alguns requisitos fundamentais, como a manutenção da umidade, o controle da temperatura e a prevenção contra ações externas, como vento forte, insolação direta e variações térmicas bruscas (NBR 14931 – ABNT, 2004).

De acordo com Aoki (2013), temperaturas elevadas no momento da produção e lançamento do concreto influenciam de forma expressiva as características do material no estado fresco e comprometem o processo de cura, sobretudo no que se refere à hidratação inicial do cimento. O principal efeito que a temperatura elevada apresenta é a perda de água de amassamento, gerando retração hidráulica, que por sua vez, causa trincas e fissuras. Para combater esses efeitos, são necessários alguns cuidados para o processo de concretagem, como: programar o intervalo entre envio dos caminhões betoneiras, cronometrar o horário de mistura dos insumos, dimensionar adequadamente a equipe de concretagem, umedecer as formas previamente para não absorver a água do concreto e estudar o melhor procedimento de cura.

Em contrapartida, nos dias frios, Capuruçu (2020), aponta que as baixas temperaturas podem retardar o processo de pega, podendo em casos extremos, até parar o processo, impactando significativamente para o ganho de resistência e por consequência no cronograma geral da obra. Nesses casos, para que a concretagem possa ser efetuada, é necessário tomar alguns cuidados, como: uso de aditivos acelerados de pega, equipamentos pré-aquecedores, realização da mistura do concreto em ambiente aquecido, transporte e lançamento rápido e a proteção do concreto durante a cura, podendo utilizar de lonas isolantes.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de um estudo experimental, voltado à investigação do comportamento do concreto autoadensável nos ensaios de compressão axial de corpos de prova, submetidos a diferentes regimes de cura térmica. O objetivo foi avaliar como as variações de temperatura influenciam no desenvolvimento da resistência mecânica do material.



As amostras foram confeccionadas no laboratório de materiais da construção civil do Centro Universitário Assis Gurgacz – FAG.

A investigação foi dividida em 03 etapas essenciais, sendo amostragem, coleta de dados e análise.

Para a amostragem, foram confeccionadas amostras de corpos de prova cilíndricos, onde foi realizado todo o processamento e preparação do regime de cura. A coleta dos dados foi feita por meio de ensaios de compressão axial, as quais as amostras foram submetidas.

3.2 Caracterização da amostra

Para a confecção das amostras, o concreto foi preparado conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 15823 (ABNT, 2017). O traço de concreto utilizado foi disponibilizado por uma empresa especializada na produção de elementos pré-fabricados em concreto armado, da cidade de Cascavel/PR.

As amostras foram confeccionadas no laboratório de Materiais da Construção Civil da FAG. Para o processo de cura aquecida — termo referente às amostras mantidas em temperaturas elevadas — foi utilizado uma estufa industrial, que manteve a temperatura constante de 55°C durante todo o período de hidratação do cimento. No procedimento de cura resfriada — termo referente às amostras mantidas em temperaturas baixas — foi utilizado um congelador industrial, mantendo a temperatura em -18°C.

Para validação dos resultados e comparativo, também foram confeccionadas amostras de referência, mantidas em cura na câmara úmida, com temperatura controlada de 22°C, conforme requisitos da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Ao todo, foram confeccionadas 27 amostras, sendo 9 amostras para cada regime de cura – aquecida, resfriada e ambiente.

O tempo de cura das amostras foi preconizado em 3, 7 e 28 dias. Para cada idade, foram preparados três lotes com nove amostras no total, as quais foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial.



3.3 Instrumentos e procedimentos para coleta de dados

Após 24 horas da moldagem, procedeu-se a desforma dos corpos de prova, seguida do capeamento em retificadora, modelo MBR12767, garantindo a uniformidade das superfícies de contato com os pratos da prensa hidráulica. Esse procedimento foi realizado visando assegurar melhor controle dimensional das amostras. Em seguida, as dimensões foram verificadas com paquímetro, registrando-se diâmetro no topo e altura de cada corpo de prova.

Essa inspeção permitiu monitorar possíveis variações decorrentes de dilatação térmica durante os processos de cura. Em seguida, os corpos de prova foram divididos em grupos para seguir com o regime de cura.

Para o processo de cura aquecida, as amostras foram submetidas a temperatura constante de 55°C, na estufa industrial, modelo TE-393/1, marca Tecnal. No processo de cura convencional, foi utilizada a câmara úmida, com temperatura controlada de 22°C e umidade acima de 90%.

Ambos os equipamentos anteriormente citados – estufa industrial e câmara úmida – foram disponibilizados pelo laboratório de materiais de construção civil da FAG.

Para a cura resfriada, foi utilizado um congelador industrial, da marca Consul, disponibilizado pelo autor.

Quando atingidas as idades previstas, os corpos de prova foram retirados da cura e conduzidos ao laboratório de materiais de construção civil da FAG, onde foram realizadas inspeções de diâmetro no topo e de altura. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial em máquina universal de ensaios, com capacidade de 100 toneladas. O carregamento foi aplicado até a ruptura ou até a redução superior a 10% da carga máxima registrada, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.4 Análise dos dados

Para avaliar a influência da temperatura sobre a resistência à compressão do concreto autoadensável, foi realizada uma análise das médias obtidas. Para isso, os dados foram organizados e analisados separadamente considerando a idade de cura e as combinações do ambiente de cura, conforme apresentado abaixo:



- I. Temperatura convencional e aquecida com 3 dias de cura;
- II. Temperatura convencional e resfriada com 3 dias de cura;
- III. Temperatura convencional, resfriada e aquecida com 3 dias de cura;
- IV. Temperatura convencional e aquecida com 7 dias de cura;
- V. Temperatura convencional e resfriada com 7 dias de cura;
- VI. Temperatura convencional, resfriada e aquecida com 7 dias de cura;
- VII. Temperatura convencional e aquecida com 28 dias de cura;
- VIII. Temperatura convencional e resfriada com 28 dias de cura; e
- IX. Temperatura convencional, resfriada e aquecida com 28 dias de cura.

Como metologia para reforçar os resultados das análises, foi utilizado a análise de variância (ANOVA), onde foram estabelecidas duas hipóteses estatísticas. A hipótese nula (H_0), onde considera que não existe diferença significativa entre as médias dos grupos analisados, sendo as variações observadas decorrente da variabilidade do experimento. Já a hipótese alternativa (H_1), por sua vez, propõe que pelo menos uma das médias difira significativamente das demais, indicando que a condição de temperatura exerce influência sobre o desenvolvimento da resistência do concreto.

As análises foram conduzidas individualmente para cada um dos grupos apresentados anteriormente, utilizando a ferramenta de análise de variância (ANOVA) disponível no software *Excel*. Para cada cenário, foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), sendo obtidos os respectivos resultados de *p*-valor.

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES

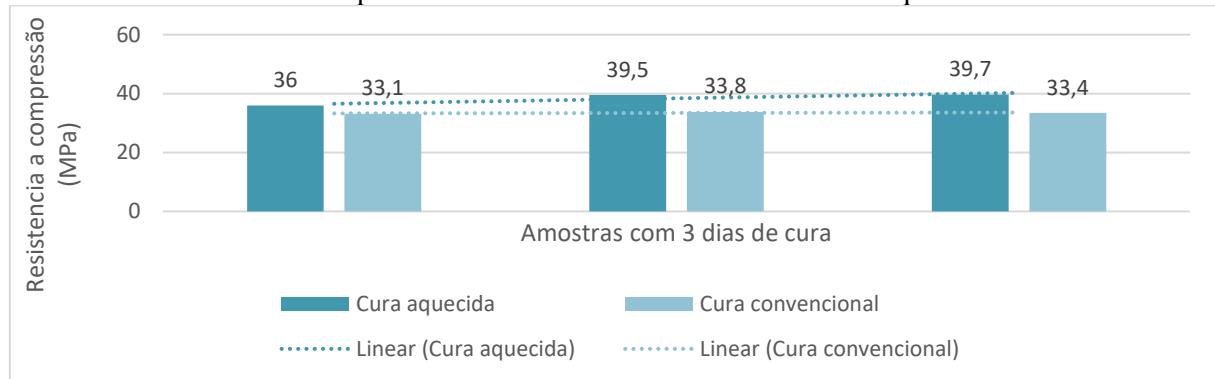
Os resultados obtidos a partir das médias foram organizados conforme os grupos apresentados no capítulo anterior, para permitir a avaliação comparativa entre as diferentes condições de temperatura de cura e idades de ensaio.



4.1 Cura aquecida x convencional

O Gráfico 1 evidencia o comportamento das amostras aos 3 dias de cura, comparando o concreto curado em ambiente convencional com o aquecido.

Gráfico 1: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e aquecida com 3 dias.

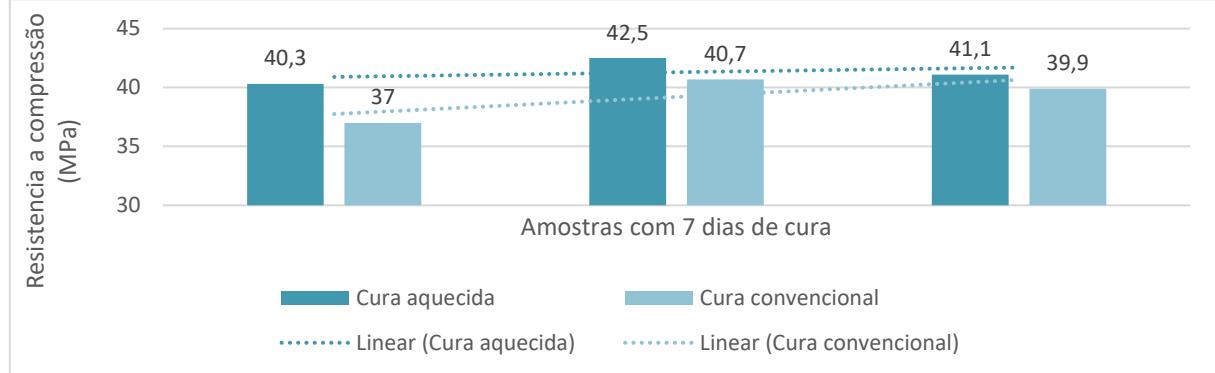


Fonte: Autor (2025).

É possível visualizar que o concreto submetido a estufa obteve uma maior resistência a compressão quando comparado as amostras mantidas em câmara úmida convencional, sendo a média do grupo aquecido em 38,4MPa e o grupo convencional em 33,43MPa, sendo essa uma diferença de 14,86%.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o aumento da temperatura de cura intensifica a taxa de hidratação nas idades iniciais, promovendo um ganho rápido de resistência devido à formação acelerada dos produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado, que confere resistência mecânica.

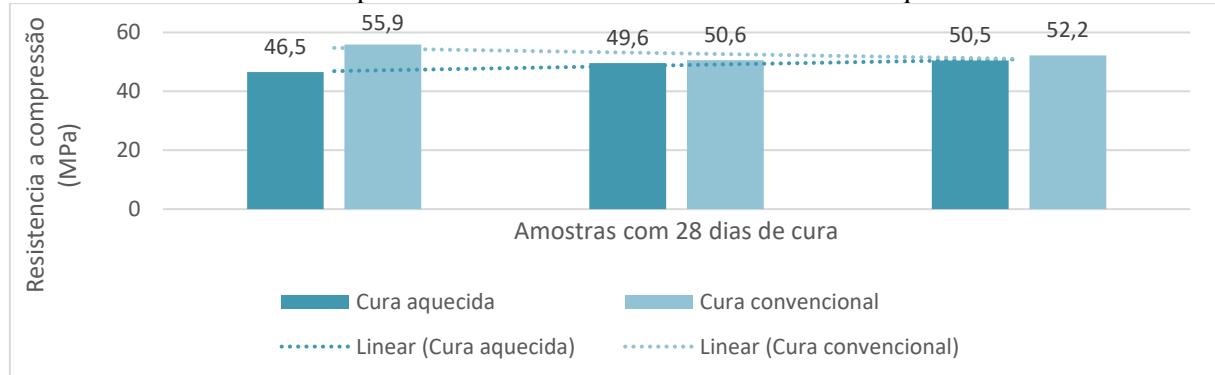
O Gráfico 2 representa o comportamento das amostras aos 7 dias de cura, comparando também o concreto curado em ambiente convencional com o aquecido.


Gráfico 2: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e aquecida com 7 dias.


Fonte: Autor (2025).

Considerando os dados obtidos, observa-se que as amostras mantidas em ambiente aquecido apresentaram média de resistência à compressão de 41,3 MPa, enquanto a cura convencional resultou em média de 39,2 MPa, correspondendo a uma diferença de 5,36%. Esse resultado indica que, embora a elevação da temperatura continue favorecendo o ganho de resistência, esse efeito se torna menos significativo em idades intermediárias. Conforme destaca Neville (2016), o concreto curado a quente tende a se estabilizar mais rapidamente, o que explica a redução da diferença de resistência com o avanço da idade.

Aos 28 dias de cura, os dados apresentaram uma inversão na escala de resistência, conforme ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e aquecida com 28 dias.


Fonte: Autor (2025).

Considerando as médias das amostras, verifica-se que a cura convencional apresentou vantagem aos 28 dias, com resistência média de 52,9 MPa, enquanto o concreto submetido à cura aquecida obteve 48,86 MPa, representando uma diferença de 7,62%.

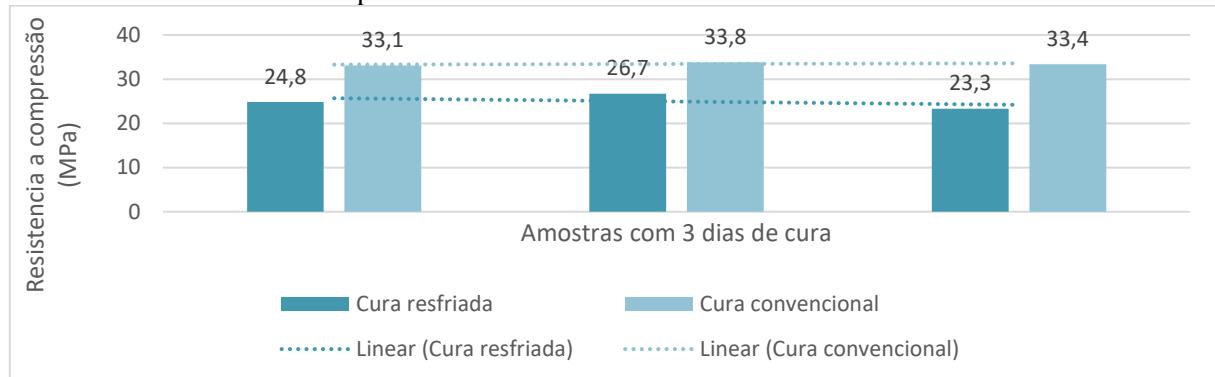


De acordo com Helene (1993), embora o aquecimento beneficie o ganho inicial de resistência, ele pode afetar a microestrutura do concreto a longo prazo, gerando uma matriz mais porosa e, consequentemente, menor durabilidade. Isso ocorre porque a elevação da temperatura acelera as reações de hidratação do cimento, fazendo com que os produtos formados se desenvolvam de maneira menos uniforme e mais desordenada, resultando em uma estrutura interna com maior quantidade de vazios capilares e menor densificação da matriz cimentícia.

4.2 Cura resfriada x cura convencional

O Gráfico 4 ilustra o comportamento das amostras aos 3 dias de cura, comparando o concreto curado em ambiente convencional com o resfriado.

Gráfico 4: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e resfriada com 3 dias.



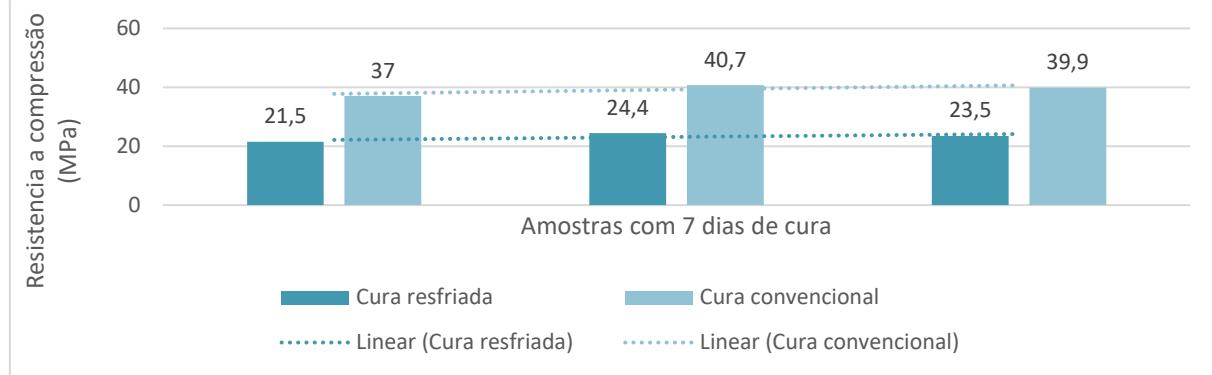
Fonte: Autor (2025).

Observa-se que o concreto submetido à cura resfriada apresentou resistência média de 24,93 MPa, enquanto o grupo convencional atingiu 33,43 MPa, representando uma diferença de aproximadamente 25,5%. Segundo Almeida (2017), a redução da temperatura diminui a taxa de hidratação do cimento nas idades iniciais, retardando a formação dos produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado.

O Gráfico 5 representa o comportamento das amostras aos 7 dias de cura, ainda sendo comparado entre cura convencional e resfriada.



Gráfico 5: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e resfriada com 7 dias.



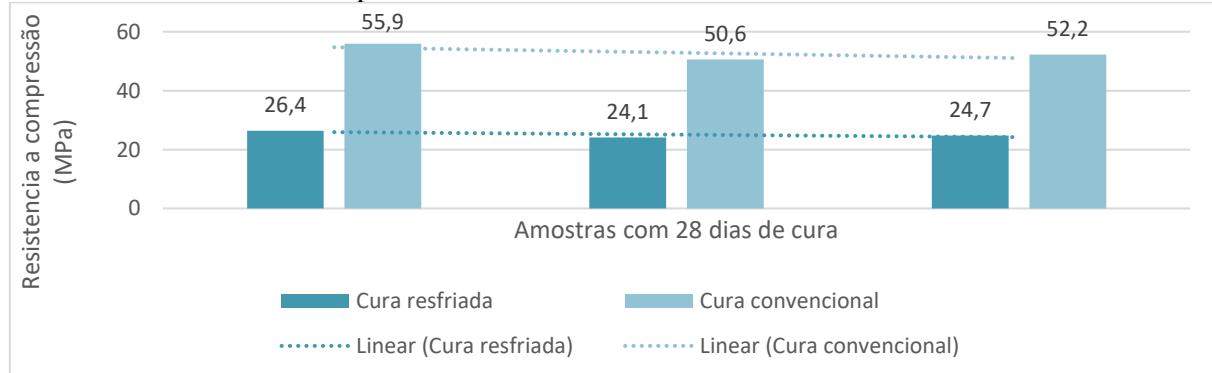
Fonte: Autor (2025).

Nesse período, o concreto resfriado apresentou média de 23,13 MPa, enquanto a cura convencional atingiu 39,2 MPa, correspondendo a uma diferença de aproximadamente 41,0%.

Esse resultado indica que o efeito da temperatura reduzida se torna ainda mais significativo em idades intermediárias, retardando o desenvolvimento da microestrutura do concreto e limitando o ganho de resistência, conforme destacado por Emmanuel, *et al.* (2022).

Aos 28 dias de cura, os dados evidenciaram que a cura convencional manteve vantagem sobre a resfriada, conforme apresentado no Gráfico 6.

Gráfico 6: Resistência a compressão do concreto em cura convencional e resfriada com 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

Ao verificar os dados obtidos, observa-se que o concreto submetido à cura resfriada apresentou desempenho significativamente inferior, com média de 25,07 MPa em comparação aos 52,9 MPa do concreto convencional, o que representa uma diferença de 52,7%.

Segundo Philippsen (2014), a redução da temperatura durante a cura retarda a hidratação do cimento, pois se trata de uma reação exotérmica que depende de energia para ocorrer. Em

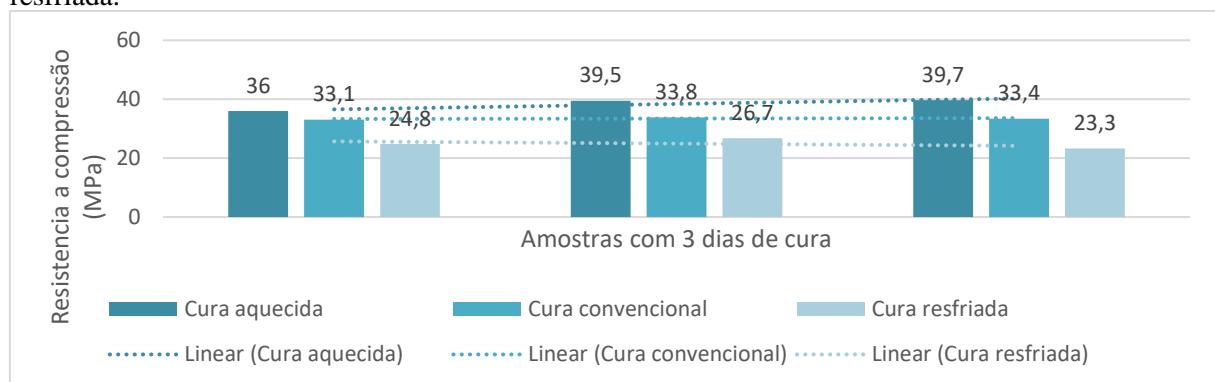


temperaturas próximas ou inferiores a 0 °C, como nas condições do ensaio, a hidratação pode ser fortemente retardada e, em casos extremos, até totalmente interrompida, comprometendo o desenvolvimento de resistência.

4.3 Cura resfriada x aquecida x convencional

O Gráfico 7 apresenta a evolução da resistência à compressão dos concretos submetidos à cura aquecida, convencional e resfriada, analisado aos 3 dias.

Gráfico 7: Resistência a compressão das amostras de concreto aos 3 dias – convencional, aquecida e resfriada.



Fonte: Autor (2025).

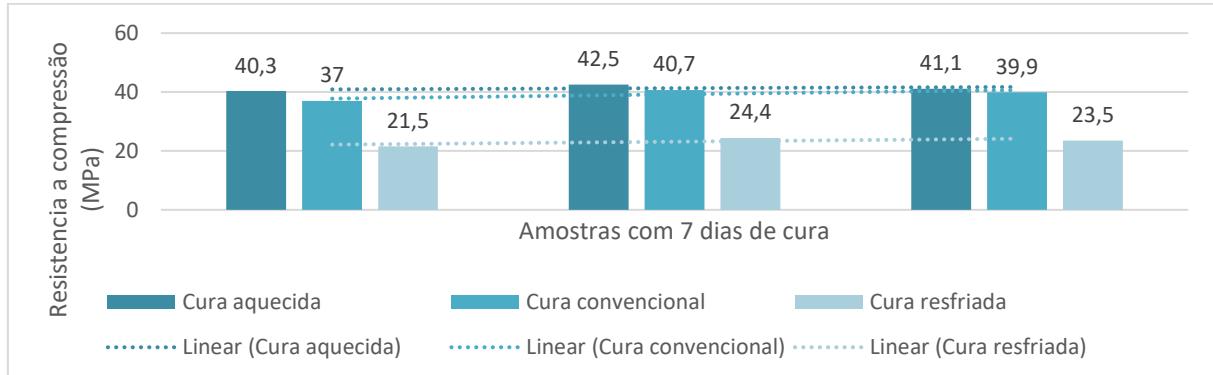
Nos 3 primeiros dias, observa-se comportamento distinto entre os regimes. O concreto mantido em estufa alcançou resistência média de 38,4 MPa, superando o concreto curado em câmara úmida convencional e o concreto resfriado, com 33,43 e 24,93MPa, respectivamente.

Esse ganho inicial está relacionado ao efeito da temperatura sobre a velocidade de hidratação. Ressaltando o apontamento de Helene (1993), o aumento da temperatura acelera a formação do silicato de cálcio hidratado, sendo o principal produto responsável pela resistência mecânica do concreto. Assim, o ambiente aquecido promoveu um endurecimento mais rápido, enquanto o resfriamento extremo retardou significativamente a hidratação do cimento.

Abaixo é apresentado o Gráfico 8, contendo os valores obtidos em 7 dias.



Gráfico 8: Resistência a compressão das amostras de concreto aos 7 dias – convencional, aquecida e resfriada.

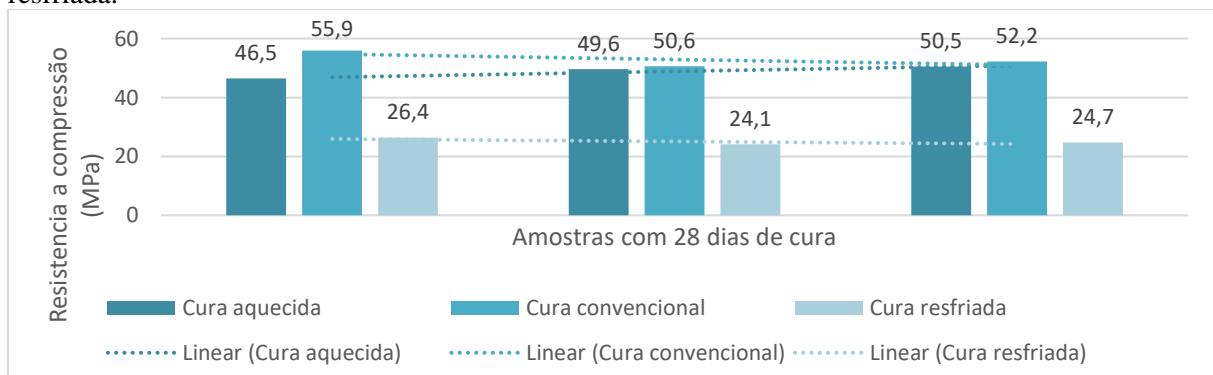


Fonte: Autor (2025).

Nessa data, o concreto aquecido manteve o melhor desempenho, atingindo média de 41,3 MPa, seguido pelo convencional (39,2 MPa) e pelo resfriado (23,13 MPa). Ainda que o efeito da temperatura elevada continue favorecendo a resistência, nota-se que a diferença entre o concreto aquecido e o convencional começa a se reduzir. Essa tendência é explicada por Munchen, *et al.* (2019), que observaram que o calor acelera as reações iniciais, mas leva a uma estrutura interna que se estabiliza precocemente, limitando o crescimento posterior da resistência. Já o concreto submetido à cura fria apresentou evolução discreta, pois o ambiente com temperatura reduzida impediu a reação da amostra.

Aos 28 dias, a relação entre os regimes se inverte parcialmente, onde o concreto sob cura convencional apresentou a maior resistência média (52,9 MPa), seguido do aquecido (48,86 MPa) e do resfriado (25,06 MPa). Os dados podem ser observados no Gráfico 9.

Gráfico 9: Resistência a compressão das amostras de concreto aos 28 dias – convencional, aquecida e resfriada.



Fonte: Autor (2025).



Essa mudança de comportamento indica que o ganho inicial promovido pela temperatura elevada não se mantém a longo prazo. Conforme Lancini (2016), a cura aquecida tende a gerar uma microestrutura menos uniforme, com zonas de porosidade interconectada, reduzindo a resistência final e a durabilidade do material. Já a cura convencional, por ocorrer em condições de umidade e temperatura estáveis, favorece uma hidratação mais equilibrada e uma matriz mais densa. Por outro lado, o concreto submetido à cura resfriada manteve o pior desempenho, registrando uma resistência aproximadamente 53% inferior à da cura convencional aos 28 dias.

De modo geral, os resultados demonstram que o regime de cura exerce influência direta sobre o desenvolvimento da resistência mecânica. Enquanto o aquecimento acelera os ganhos iniciais, a cura convencional assegura um equilíbrio entre desenvolvimento e durabilidade, e a cura resfriada compromete o desempenho global do material.

4.4 Análise complementar

Com o objetivo de aprofundar e fortalecer a análise dos resultados obtidos, foi empregada a metodologia ANOVA. A partir desses cálculos, obtém-se o valor de p , indicador que expressa a probabilidade de as diferenças verificadas ocorrerem devido à variabilidade do experimento.

Com o uso do software *Excel*, foi executado a verificação ANOVA, sendo os resultados expressos nos Apêndices 1, 2 e 3. A Tabela 1 apresenta um resumo das informações obtidas.


Tabela 1: Análise estatística ANOVA.

Grupo	Idade (dias)	Condições de temperatura	p valor	% Significância	Conclusão
I	3	Convencional × Aquecida	0,015142	0,05	Rejeita-se H_0
II	3	Convencional × Resfriada	0,001069	0,05	Rejeita-se H_0
III	3	Convencional × Resfriada × Aquecida	0,000127	0,05	Rejeita-se H_0
IV	7	Convencional × Aquecida	0,180166	0,05	Aceita-se H_0
V	7	Convencional × Resfriada	0,000342	0,05	Rejeita-se H_0
VI	7	Convencional × Resfriada × Aquecida	0,0000135	0,05	Rejeita-se H_0
VII	28	Convencional × Aquecida	0,11167	0,05	Aceita-se H_0
VIII	28	Convencional × Resfriada	0,000084	0,05	Rejeita-se H_0
IX	28	Convencional × Resfriada × Aquecida	0,00000697	0,05	Rejeita-se H_0

Fonte: Autor (2025).

De forma geral, a análise estatística evidenciou que a temperatura de cura exerce influência significativa no ganho de resistência do concreto, especialmente nas idades iniciais.

Aos 3 dias, tanto o aquecimento quanto o resfriamento apresentaram diferenças estatisticamente relevantes em relação à cura convencional, indicando forte impacto térmico sobre o processo de hidratação.

Aos 7 dias, apenas o grupo resfriado manteve diferença significativa, mostrando que o concreto curado a quente tende a estabilizar seu comportamento mais rapidamente.

Já aos 28 dias, observou-se novamente diferença marcante somente para a cura resfriada, que manteve valores inferiores de resistência. Enquanto a cura aquecida não apresentou grau de significância superior ou inferior à cura convencional.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, foi possível comprovar que a temperatura de cura exerce influência direta e significativa sobre o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto autoadensável. As variações térmicas alteraram o comportamento do material ao longo do tempo de cura, confirmando a importância do controle das condições térmicas no desenvolvimento de ganho de resistência.

A cura aquecida demonstrou ganho acelerado de resistência nas idades iniciais com 3 e 7 dias, resultado atribuído à intensificação das reações de hidratação. No entanto, aos 28 dias observou-se uma redução no desempenho, indicando que o calor excessivo pode provocar uma formação microestrutural menos densa e com maior porosidade, e consequentemente, gerando uma menor resistência final.

Por outro lado, a cura resfriada apresentou os menores valores de resistência em todas as idades analisadas, evidenciando o efeito negativo das baixas temperaturas sobre o processo de hidratação. Nessas condições, a reação química do cimento é retardada ou até interrompida, comprometendo a formação da matriz cimentícia e reduzindo o ganho de resistência ao longo do tempo.

A cura convencional, realizada em ambiente controlado e úmido, mostrou-se a mais equilibrada, com ganho progressivo e consistente de resistência, atingindo o melhor desempenho aos 28 dias. Esse comportamento reforça a importância de condições estáveis de cura para o desenvolvimento pleno das propriedades mecânicas do concreto.

A análise de variância confirmou estatisticamente essas tendências, indicando diferenças significativas entre os grupos submetidos a diferentes regimes térmicos, especialmente nas idades iniciais.

Dessa forma, conclui-se que o controle da temperatura de cura é essencial para assegurar o adequado desenvolvimento da resistência mecânica. Recomenda-se a manutenção de condições estáveis, com temperatura em torno de 22 °C e elevada umidade relativa, a fim de favorecer a hidratação do cimento e a formação de uma estrutura mais densa e homogênea.



REFERÊNCIAS

ALMEIRA, V. EVARISTO, W. Avaliação da influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável, Distrito Federal, 2017. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20491/1/2017_VictorLudovicoDeAlmeida_WilsonFlexeirasEvaristo_tcc.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

ALMEIDA, R. Influência de material fino inerte na retração de argamassas de reparo à base de material cimentício, Paraná, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/server/api/core/bitstreams/00976bf0-7cd6-44c9-9c61-ff895e78ae7e/contente>. Acesso em: 05 abr. 2025.

AOKI, J. Concretagem em tempo quente. 2013. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/concretagem-em-tempo-quente/>. Acesso dia: 18 mai. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). São Paulo. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 09 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT NBR 15823: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT NBR 11172: Aglomerante de origem mineral. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT NBR 14931: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BARBOSA, M. COURA, C. MENDES, L. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. Departamento de Construção Civil Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2008.

BOARETTO, G. Estudo comparativo da substituição gradativa de agregado graúdo na forma lamelar pela forma cúbica nas propriedades do concreto. Santa Catarina, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/181781/TCC%20-%20Gabriel%20Boaretto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso dia 21 jun. 2025.



CALADO, C. CAMÕES, A. JALALI, S. JUNIOR, BÉDA. Concreto autoadensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). 1. ed. Pernambuco, 2015.

CAPURUÇU, F. Concretagem em dias frios: como fazer e quais os cuidados?. 2020. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/concretagem-em-dias-frios-como-fazer-e-quais-os-cuidados/20056>. Acesso em: 18 mai. 2025.

CARVALHO, C. BARBOZA, N. BEZERRA, U. SIMAS, T. BORGES, K. FREITAS, L. Investigação do tipo de cura na resistência à compressão do concreto autoadensável. Instituto de Engenharia do Araguaia da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Pará, 2020.

CÍCERO, R. Areia para assentar tijolo: 6 tipos de areia para construção e como usá-las. s. d. Disponível em: <https://blog.obramax.com.br/construcao-civil/tipos-areia/>. Acesso dia 21 jun. 2025.

COCHRANE, M. O processo de fabricação do cimento. Massachusetts, 2024. Disponível em: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/cimentos-avancados/o-processo-de-fabricacao-do-cimento/>. Acesso em: 08 mai. 2025.

CONCRESUPER. Como concretar em dias frios?. 2024. Disponível em: <https://concresuper.com.br/blog/visualizar-postagem/354-como-concretar-em-dias-frios>. Acesso dia: 18 mai. 2025.

COSTA, A. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical, Ceará, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/W4W5Jh6sRb4bZdTztrhgMqs/>. Acesso em: 05 abr. 2025.

COUTINHO, B. Propriedades e comportamento estrutural do concreto autoadensável. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

EMMANUEL, C. A. KRISHNAN, S. BISHNOI, S. Influence of curing temperature on hydration and microstructural development of ordinary Portland cement. Departamento de engenharia civil, Instituto de Tecnologia Delhi, Índia, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182200753X?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 out. 2025.

FM2S. ANOVA: o que é e como utilizar? São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.fm2s.com.br/blog/anova>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GUIMARÃES, C. GOMES, M. Areia de britagem como alternativa à areia natural na confecção de concreto: um panorama sobre o estado da arte. Bahia, 2020. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/labore/article/view/8659725>. Acesso em 21 jun. 2025.

HARTMANN, C. Avaliação de aditivos superplasticificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland. Tese (Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.



HELENE, P. R. L.; T. P. Manual de dosagem e controle do concreto. 3. ed. São Paulo: Pini, 1993.

LANSINI, B. M. Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/148756/001002134.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 out. 2025.

MAPA DA OBRA. Hidratação do cimento: a importância do tempo de reação. 2018. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/hidratacao-do-cimento/>. Acesso em: 09 abr. 2025.

MEHTA, P. MONTEIRO, P. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MUNCHEN, M. R.; EHRENBRING, H. Z.; WIRTH, A. MEDEIROS, D. TUTIKIAN, B. Impacto nas propriedades mecânicas do concreto curado sob baixas temperaturas. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. 1-12, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/ygDbZMkCqPjmvbVKfrrL4WN/>. Acesso em: 10 out. 2025.

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

PG QUIMICA. Superplasticificante para Concreto: o que é e como funciona. São Paulo. Disponível em: <https://pgquimica.com.br/blog/superplasticificante-paraoncreto/#:~:text=Composi%C3%A7%C3%A3o%20Qu%C3%ADmica%3A%20Superplasticificantes%20s%C3%A3o%20geralmente,das%20caracter%C3%ADsticas%20desejadas%20do%20concreto>. Acesso em: 05 abr. 2025.

PHILIPPSEN, A. L. SHIMOSAKA, T. J. Estudo do efeito da cura térmica na resistência inicial do concreto para aplicação na indústria de pré-moldados de concreto. Universidade Tecnológica do Paraná, Pato Branco, Paraná, 2014.

PRÉ-FABRICAR. Concreto autoadensável: dosagem e aplicações. Santa Catarina (s. d.). Disponível em: <https://prefabricar.com.br/concreto-auto-adensavel-dosagem-e-aplicacoes/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

TUTIKIAN, B. Concreto autoadensável. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries – Cement. USGS. Survey, 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-cement.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2025.

VELASCO, L. A importância da cura do concreto. 2018. Disponível em: <https://petcivilufjf.wordpress.com/2018/10/01/a-importancia-da-cura-do-concreto/>. Acesso dia 21 jun. 2025.



WAGNER, J. A fome global por areia, 2018. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/a-fome-global-por-areia/a-44975043>. Acesso em: 05 abr. 2025.

WASKOW, D. GERHOLDT, R. Mudanças climáticas alarmantes: veja 5 grandes resultados do relatório do IPCC. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/mudancas-climaticas-alarmantes-veja-5-grandes-resultados-do-relatorio-do-ipcc>. Acesso em: 24 abr. 2025.


APÊNDICE A: Tabelas de análise ANOVA – 3 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	115,2	38,4	4,33
Cura convencional	3	100,3	33,43333	0,123333

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	37,00167	1	37,00167	16,61751	0,015142	7,708647
Dentro dos grupos	8,906667	4	2,226667			
Total	45,90833	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura resfriada	3	74,8	24,93333	2,903333
Cura convencional	3	100,3	33,43333	0,123333

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	108,375	1	108,375	71,61344	0,001069	7,708647
Dentro dos grupos	6,053333	4	1,513333			
Total	114,4283	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	115,2	38,4	4,33
Cura convencional	3	100,3	33,43333	0,123333
Cura resfriada	3	74,8	24,93333	2,903333

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	278,2689	2	139,1344	56,73811	0,000127	5,143253
Dentro dos grupos	14,71333	6	2,452222			
Total	292,9822	8				


APÊNDICE B: Tabelas de análise ANOVA – 7 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	123,9	41,3	1,24
Cura convencional	3	117,6	39,2	3,79

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,615	1	6,615	2,630219	0,180166	7,708647
Dentro dos grupos	10,06	4	2,515			
Total	16,675	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura resfriada	3	69,4	23,13333	2,203333
Cura convencional	3	117,6	39,2	3,79

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	387,2067	1	387,2067	129,2125	0,000342	7,708647
Dentro dos grupos	11,98667	4	2,996667			
Total	399,1933	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	123,9	41,3	1,24
Cura convencional	3	117,6	39,2	3,79
Cura resfriada	3	69,4	23,13333	2,203333

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	592,5756	2	296,2878	122,8843	1,35E-05	5,143253
Dentro dos grupos	14,46667	6	2,411111			
Total	607,0422	8				


APÊNDICE C: Tabelas de análise ANOVA – 28 dias de cura

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	146,6	48,86667	4,403333
Cura convencional	3	158,7	52,9	7,39

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,40167	1	24,40167	4,138214	0,11167	7,708647
Dentro dos grupos	23,58667	4	5,896667			
Total	47,98833	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura resfriada	3	75,2	25,06667	1,423333
Cura convencional	3	158,7	52,9	7,39

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1162,042	1	1162,042	263,7008	8,41E-05	7,708647
Dentro dos grupos	17,62667	4	4,406667			
Total	1179,668	5				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cura aquecida	3	146,6	48,86667	4,403333
Cura convencional	3	158,7	52,9	7,39
Cura resfriada	3	75,2	25,06667	1,423333

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1357,402	2	678,7011	154,0557	6,97E-06	5,143253
Dentro dos grupos	26,43333	6	4,405556			
Total	1383,836	8				