

A Influência de Ambientes Alcalinos na Resistência à Compressão do Concreto: um estudo experimental

The Influence of Alkaline Environments on Compressive Strength of Concrete: an experimental study

Paulo Henrique Reis Silva¹, Luciano Floriano Barbosa¹, Vander Alkmin dos Santos Ribeiro², Adhimar Flávio Oliveira², Valquíria Claret dos Santos², Elioenai Levi Barbedo²

1 - Centro Universitário de Itajubá – FEPI. E-mail.: paulohfgy@gmail.com

1 - Centro Universitário de Itajubá – FEPI. E-mail.: lucianofb@fepi.br

2 - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. E-mail.: vanderalkmin@gmail.com

2 - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. E-mail.: adhimarflavio@unifei.edu.br

2 - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. E-mail.: valquiria@unifei.edu.br

2 - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. E-mail.: levibarbedo@unifei.edu.br

Recebido em: 28/12/2023

Revisado em: 06/09/2024

Aprovado em: 12/12/2024

Resumo: Este artigo apresenta uma investigação sobre os efeitos do ambiente alcalino no concreto e sua influência na resistência à compressão axial. O estudo envolveu a imersão de corpos de prova em duas soluções distintas: água e uma solução de hidróxido de sódio (soda cáustica). Os resultados revelaram que o ambiente alcalino não teve um impacto negativo na resistência à compressão axial do concreto. No entanto, a pesquisa destacou a complexidade das reações de hidratação do concreto, influenciadas por diversos fatores, como as características dos materiais, a relação água-cimento, o processo de produção e as condições ambientais. Embora tenha havido uma aparente diferença na resistência entre as amostras imersas em soda cáustica e aquelas em água, seus resultados não identificaram diferenças significativas. Assim, conclui-se que a análise da resistência à compressão axial por si só não foi suficiente para avaliar completamente os efeitos das soluções alcalinas no concreto. Outros fatores, como porosidade, permeabilidade, fissuração e composição química, também desempenharam um papel importante nesse contexto. Portanto, o estudo ressaltou a necessidade de considerar uma variedade de variáveis para uma avaliação abrangente dos efeitos do ambiente alcalino no concreto.

Palavras-chave: Concreto, Resistência à Compressão, Ambiente Alcalino, Hidratação, Análise Estatística.

Abstract: This article presents an investigation into the effects of the alkaline environment on concrete and its influence on axial compressive strength. The study involved immersing specimens in two different solutions: water and a solution of sodium hydroxide (caustic soda). The findings showed that the acidic environment did not affect the axial compressive strength of concrete. Nonetheless, the research has brought to light the intricate nature of concrete hydration reactions, which are influenced by a multitude of factors, including the characteristics of the materials, the water-cement ratio, the production process, and the surrounding conditions. Although there was an apparent difference in resistance between samples immersed in lye and those in water, their results did not identify significant differences. Thus, it is concluded that the analysis of axial compressive strength alone was not sufficient to fully evaluate the effects of alkaline solutions on concrete. Other factors, such as porosity, permeability, cracking, and chemical composition, also played an important role in this context. Therefore, the study highlighted the need to consider a variety of variables for a comprehensive assessment of the effects of the alkaline environment on concrete.

Keywords: Concrete, Compressive Strength, Hydration Reactions, Alkaline Environment, Test Specimens

Introdução

Desde tempos antigos, a utilização de pedra como material de construção foi uma prática comum na construção de abrigos, pontes, estradas e templos. No entanto, ao longo da evolução das civilizações, surgiu a necessidade de enfrentar desafios cada vez maiores na construção, como a criação de estruturas em larga escala, em resposta ao crescimento demográfico e ao desenvolvimento urbano.

Isso levou à busca por novos materiais e técnicas de construção que superassem as limitações das pedras, como sua baixa resistência à tração e peso específico, que limitavam a arquitetura das estruturas. No entanto, a performance do concreto pode ser significativamente afetada por uma variedade de fatores ambientais, entre os quais os ambientes alcalinos se destacam.

Conforme destacado por Mehta, (1994), “a utilização do concreto tornou-se uma alternativa fundamental, mas a sua durabilidade em ambientes alcalinos representa um desafio crítico”.

Ambientes alcalinos, caracterizados por um pH elevado, têm sido identificados como influentes no comportamento do concreto ao longo do tempo. Embora, o ambiente alcalino seja inicialmente benéfico para a proteção das armaduras de aço contra a corrosão, alterações no pH ou reações químicas subsequentes podem levar a graves problemas estruturais e estéticos sendo que a sua exposição

prolongada pode alterar as propriedades mecânicas do concreto, afetando sua resistência à compressão e, consequentemente, sua eficácia como material de construção. A compreensão desses efeitos é fundamental para garantir a integridade estrutural e a longevidade das construções expostas a tais condições (Gopal, Gopinath, 2022).

A civilização romana, por exemplo, desempenhou um papel crucial na padronização da matéria-prima e no desenvolvimento de técnicas que ampliaram a produção de tijolos cerâmicos, permitiram a criação de arcos e aumentaram o vão entre os pilares.

No entanto, à medida que as cidades cresciam e as rotas comerciais se expandiam, a construção de portos era necessária para acomodar o transporte marítimo.

Esse ambiente exigia soluções de construção diferentes, com materiais resistentes aos ataques químicos e físicos das regiões costeiras. O cimento, originado de rochas vulcânicas como pozolanas, foi idealizado como uma solução para esse desafio (Artioli, Secco, Addis, 2019).

Como observado por Krug (2023) “os ambientes alcalinos representam um desafio adicional devido à sua natureza corrosiva, que pode comprometer a durabilidade do concreto em estruturas expostas a essas condições”.

Atualmente, a construção civil é beneficiada por uma ampla variedade de materiais e tecnologias.

No entanto, essa evolução também trouxe consigo um aumento nas manifestações patológicas resultantes do uso inadequado dos materiais e da exposição a ambientes hostis.

Essas manifestações patológicas incluem a corrosão das armaduras de aço, a expansão e fissuração do concreto devido à reação com álcalis presentes nos agregados, e a degradação da própria matriz do concreto. As agressões do meio ambiente ao concreto estão relacionadas a ações físicas e químicas, independentemente de ações mecânicas (Dos Santos et al., 2024).

Conforme indicado por Neville (2015) “entender os mecanismos de degradação do concreto em ambientes alcalinos é crucial para mitigar tais problemas e prolongar a vida útil das estruturas tornando-se duráveis e sustentáveis”.

As condições de exposição das estruturas e suas partes à classificação da agressividade do meio ambiente foram estudadas conforme as diretrizes da ABNT NBR (2023). Além disso, este estudo analisou a propriedade de resistência à compressão do concreto após a exposição a meios alcalinos por um período pré-determinado de 365 dias.

Dada a importância do concreto como material de construção, compreender sua durabilidade em ambientes alcalinos é fundamental para garantir a longevidade e a segurança das estruturas. Este artigo revisou os conceitos fundamentais e os desafios enfrentados na preservação da durabilidade do concreto, explorando a influência de variáveis

como pH, temperatura e concentração de soluções alcalinas, e destacando as reações álcali-agregado como um ponto crítico a ser considerado.

Como enfatizado por Scrivener, Snellings, Lothenbach, (2018), “as reações álcali-agregado podem ser particularmente prejudiciais ao concreto em ambientes alcalinos, e compreender esses processos é essencial para a manutenção da durabilidade das estruturas”.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo visa apresentar, por meio de experimentos, ensaios e revisão bibliográfica, conceitos relevantes sobre a durabilidade do concreto em ambientes alcalinos, destacando a dificuldade de avaliar ou estimar a ocorrência de patologias como a corrosão e carbonatação.

Este artigo pretende contribuir para o avanço do conhecimento nessa área, fornecendo informações valiosas sobre como abordar a durabilidade do concreto em ambientes alcalinos e, assim, promover a construção de estruturas mais resistentes e duradouras.

Materiais e Métodos

A determinação da massa específica do cimento foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR16605 (2017). Utilizou-se o cimento Portland da marca *Holcim* (CP II E - 32) como ligante.

Para o procedimento, um fluido não reativo com o cimento e com densidade

superior a $0,73 \text{ g/cm}^3$ a 15°C (xilol) foi empregado.

Os equipamentos utilizados incluíram um frasco volumétrico de Le Chatelier de vidro com capacidade de 250 cm^3 , balança com precisão de $0,01 \text{ g}$, recipiente para armazenar o material, funil e haste curta.

Com um funil, o frasco de Le Chatelier foi preenchido até a marca zero e 1 cm^3 . Após 30 minutos de banho regulador, uma amostra de cimento de 60 g foi pesada. As leituras do deslocamento do líquido no frasco (V1 e V2) foram registradas após a adição do cimento e a eliminação de bolhas. O resultado da massa específica do cimento foi de $2,91 \text{ g/cm}^3$.

A determinação da massa específica do agregado miúdo seguiu a norma ABNT NBR 16916 (2021). Para o ensaio, uma amostra do material foi submetida ao quarteamento, imersa em água por 24 horas e, em seguida, seca. O volume de água deslocado pelo material foi medido. A massa específica do agregado miúdo encontrado foi de $2,59 \text{ g/cm}^3$.

A determinação da massa específica do agregado graúdo seguiu a norma ABNT NBR 16917 (2021).

Uma amostra do agregado foi submersa em água por 24 horas, seca e então submetida a diferentes pesagens para determinar a massa específica do agregado seco, do agregado saturado na superfície seca e da massa aparente. A massa específica do agregado graúdo seco encontrado foi de $2,71 \text{ g/cm}^3$.

A determinação da massa unitária solta seca dos agregados seguiu a norma da ABNT NBR 16972 (2021). Recipientes cilíndricos foram utilizados com capacidade mínima de 10 cm^3 , balança com resolução de 50 g , haste de adensamento, placa de calibração, concha, e estufa a $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Para o agregado miúdo, foram utilizadas quatro amostras e a média da massa unitária solta seca encontrado foi de $1,45 \text{ kg/dm}^3$.

Para o agregado graúdo, também foram utilizadas quatro amostras e a média da massa unitária solta seca encontrada foi de $1,44 \text{ kg/dm}^3$.

Em resumo:

- Massa Específica do Cimento: $2,91 \text{ g/cm}^3$.
- Massa Específica do Agregado Miúdo: $2,59 \text{ g/cm}^3$.
- Massa Específica do Agregado Graúdo: $2,71 \text{ g/cm}^3$.
- Massa Unitária Solta Seca do Agregado Miúdo: Média de $1,45 \text{ kg/dm}^3$.
- Massa Unitária Solta Seca do Agregado Graúdo: Média de $1,44 \text{ kg/dm}^3$.

A determinação da granulometria do agregado miúdo seguiu a norma ABNT NBR 17054 (2022). Duas amostras de 350 g foram secas e peneiradas e levadas para estufa para secagem por 24h. A seguir, foram retiradas e deixadas para esfriar a temperatura ambiente.

Depois retirou-se a massa (m_1) e uma reserva com (m_2). A amostra foi colocada

sobre o conjunto de peneiras e agitada com a ajuda de um agitador mecânico. Em seguida, o processo se deu de forma manual: fez-se a agitação contínua por 1 minuto, depois a massa do material retido foi pesada até que ficasse inferior 1% do retido. No Quadro 1 mostra a granulometria do agregado miúdo.

Quadro 1: Granulometria do agregado miúdo

Dados	M1	M2	Média	R	R Acumulado
Peneira	G	G	G	%	RA%
6,3	9,05	2,2	5,62	1,61	1,61
4,8	9,30	13,27	11,28	3,23	4,84
2,4	23,41	23,83	23,62	6,76	11,60
1,2	29,09	24,90	26,99	7,72	19,32
0,6	53,26	47,73	50,49	14,45	33,77
0,3	95,01	98,57	96,79	27,70	61,47
0,15	100,02	107,28	103,65	29,66	91,13
Final	30,32	31,66	30,99	8,87	100,00
Somatório	349,46	349,44	349,45	100	

Fonte: Próprio Autor (2024)

O diâmetro máximo do agregado miúdo foi de 2,22mm e o módulo de finura 2,22 (areia fina). A curva granulométrica mostrou-se dentro dos limites de utilização.

Para o agregado graúdo, duas amostras de 5 kg foram secas e peneiradas. As amostras foram levadas para estufa para secagem por 24h, em seguida foram retiradas e deixadas para esfriar em temperatura ambiente. Logo depois retirou-se a massa (m_1) e uma reserva com (m_2). A amostra foi colocada sobre o conjunto de peneiras e agitada com auxílio de um agitador mecânico. A seguir, o processo se deu de forma manual, no qual ocorreu a agitação contínua por 1 minuto e depois a massa do material retido foi pesada até que atingisse o inferior a 1% do retido. No Quadro 2 mostra a granulometria do agregado miúdo.

O diâmetro máximo do agregado graúdo foi de 19 mm (brita 1) e do módulo de finura 6,83. A curva granulométrica também atendeu aos limites necessários.

A metodologia utilizada neste estudo baseia-se no método ABCP-ACI, que tem como alicerce de dosagem experimental fundamentado no método desenvolvido pelo American Concrete Institute e adaptado pela Associação Brasileira de Cimento Portland para as condições brasileiras (Ribeiro et al., 2021).

Quadro 2: Granulometria do agregado graúdo.

Dados	M1	M2	Média	R	R Acumulado
Pn	G	G	G	%	Ra%
25	0	0	0	0,00	0,00
19	0	0	0	0,00	0,00
12,50	2070,00	1955,00	2012,50	40,28	40,28
9,50	2160,00	2235,00	2197,50	43,98	84,25
6,30	710,00	760,00	735,00	14,71	98,96
4,80	35,00	36,85	35,92	0,72	99,68
2,40	9,36	8,12	8,74	0,17	99,86
1,20	1,38	0,90	1,14	0,02	99,88
0,60	0,63	0,31	0,47	0,01	99,89
0,30	0,38	0,30	0,34	0,01	99,90
0,15	0,55	0,46	0,50	0,01	99,91
Final	4,62	4,63	4,62	0,09	100,00
Somatório	4991,92	5001,57	4996,74	100,00	

Fonte: Próprio Autor (2024)

Este método determina a relação de mistura pelo volume absoluto ocupado pelos materiais constituintes no volume unitário de concreto.

Para a determinação da resistência de dosagem do concreto, foi seguida a norma ABNT NBR 12655 (2022). A resistência de dosagem deve atender às condições de variabilidade prevalentes durante a construção.

A resistência média do concreto à compressão, na idade de "j" dias, é calculada com base em parâmetros como a resistência característica do concreto à compressão e o desvio padrão de canteiro.

Para a determinação da relação água-cimento, foram seguidos os critérios da norma ABNT NBR 6118 (2023) e da Curva de Abrams (NEVILLE, 2015), juntamente com a norma ABNT NBR 12655 (2022). A relação água-cimento foi determinada com base na classe de agressividade ambiental adotada e no tipo de cimento utilizado.

O consumo de água foi determinado com base na trabalhabilidade requerida e no diâmetro máximo do agregado graúdo.

Para a determinação do consumo de cimento é encontrado através do volume absoluto de água e a relação a/c.

Em seguida, o volume absoluto de agregados foi determinado com base nos valores calculados para o volume absoluto de cimento, o consumo de água e o volume de ar.

A massa de agregado graúdo foi calculada com base no volume absoluto de agregado graúdo e na massa unitária compactada seca. O traço unitário em massa do concreto encontrado foi de 1,0; 1,32; 2,35; 0,45 conforme determinado na sequência para os componentes: cimento, areia, brita e relação água/cimento.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos de 15 cm x

30 cm, e o consumo de materiais foi calculado com uma adição de 10%.

O preparo do concreto seguiu a norma ABNT NBR 12655 (2022). O traço foi feito no laboratório de materiais construção civil do Centro Universitário de Itajubá- FEPI.

Os materiais usados (cimento, agregado graúdo, agregado miúdo natural e água) foram pesados em massa. A mistura foi feita em uma betoneira com um volume de 150 litros e 90 litros de mistura, dividida em três etapas para produzir o suficiente para moldar 6 corpos de prova.

O procedimento da mistura foi o seguinte:

1. Adição de 100% do agregado graúdo e 50% da água, com pré-mistura por cerca de 1 minuto.
2. Adição de 100% do cimento e mistura por 30 segundos.
3. Adição do agregado miúdo com o restante da água.

A trabalhabilidade do concreto foi determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump), conforme a norma ABNT NBR 16889 (2020). O traço foi definido com base em um valor de abatimento de 5 a 10 cm.

Os corpos de prova para o ensaio de compressão axial foram moldados conforme a norma ABNT NBR 5738 (2016). Moldes cilíndricos de 15 cm x 30 cm foram usados e untados com óleo para facilitar a desmoldagem. A compactação das camadas de concreto foi feita com 25 golpes de uma haste

de ferro de 60 cm de comprimento e 25 mm de diâmetro.

Os corpos de prova permaneceram nos moldes por 24 horas e, em seguida, foram colocados em um tanque com solução aquosa de óxido de cálcio (CaO) na concentração de 1,27 g/l por 28 dias para o processo de cura, conforme a norma ABNT NBR 9479 (2006).

Inicialmente, foram coletados 2 corpos de prova para cada um dos 3 grupos, totalizando seis unidades para a análise visual.

Os corpos de prova referência de cada grupo foram imersos em água por 365 dias e os outros corpos de prova foram mergulhados em soda cáustica (NaOH) também por 365 dias.

Para as propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto foi necessário retirar 2 corpos de prova de cada um dos 3 grupos em um total de 6 unidades para a realização do ensaio de resistência a compressão axial.

Os corpos de prova foram imersos em água por 28 dias para a realização do ensaio de resistência à compressão axial.

Os demais corpos de prova foram divididos em 3 grupos de 2 unidades em um total de 6 unidades, um foi imerso em água e o outro em solução aquosa de soda cáustica (NaOH) a 365 dias. Nesse caso, obtiveram-se uma concentração superior 400 g/l e seus recipientes ficaram devidamente tampados, para não proporcionar problemas sanitários, por 365 dias. Ao final desse período, todos os

corpos de prova foram também submetidos ao ensaio de resistência a compressão axial.

Para dissolução da soda cáustica, usou-se um tambor com capacidade de 70 litros, onde os corpos de prova foram posicionados no interior do recipiente atingindo uma altura de aproximadamente 60cm.

O ensaio de resistência à compressão axial foi conduzido de acordo com a norma NBR 5739 (2018)

As faces dos corpos de prova foram regularizadas com argamassa para garantir que os esforços atuassem apenas na compressão axial. A carga foi aplicada continuamente com uma velocidade entre 0,30 MPa/s e 0,80 MPa/s.

Para o ensaio de carbonatação, utilizou-se o reagente indicador de pH (fenolftaleína). Usualmente, utilizou-se uma solução de fenolftaleína (1 g da fenolftaleína em 50 ml de álcool etílico e diluição desta mistura em água destilada até completar 100 ml). A fenolftaleína mantém-se incolor em soluções ácidas e torna-se cor-de-rosa em soluções básicas. A coloração do indicador indica o pH do concreto e a propagação da carbonatação:

A coloração vermelha carmim indica pH superior a 12 e a coloração clara ou ausência de coloração indica pH inferior a 11, o que indica a ocorrência de carbonatação.

No processo, ocorre a redução do pH do concreto, ou seja, regiões carbonatas têm pH diferente de regiões íntegras. Através da análise dos corpos de prova, a parte da

superfície do concreto está carbonatada quando o concreto está com coloração normal. Entretanto, o concreto com a coloração “Rosa” indica um pH normal (alcalino/básico entre 12 e 13) (Zuo et al., 2024).

Para a determinação do módulo de elasticidade, seguiu os ensaios prescritos e as fórmulas apresentadas na ABNT NBR 6118 (2023).

A determinação da resistência à tração do concreto também seguiu a norma da ABNT NBR 6118 (2023), devido à falta de equipamento no laboratório.

Na ABNT NBR 6118 (2023) são apresentadas as fórmulas que foram utilizadas para calcular o valor médio ou característico da resistência à tração, dependendo da classe de concreto.

Para analisar o critério de corrosão, uma vez que diz que em soluções concentradas acima de 20% de bases fortes podem ocorrer reações químicas que causam a deterioração do concreto, é necessário calcular a massa do soluto através do título (ou porcentagem em massa) (Vicente Gentil, 2023). Título ou porcentagem em massa corresponde a quantidade de soluto para cada grama da solução, sendo uma grandeza adimensional sendo que seus valores podem ser expressos em porcentagem.

A massa de soluto m_1 foi igual a 5050g, porém, por se tratar de um material com índice de pureza variável, como a própria embalagem demonstra, o valor necessário para

atender foi de 5260,42g de soda cáustica e a massa adicionada a solução foi aproximadamente de 60,44% superior a demanda. Levando em consideração o coeficiente de pureza foi adicionado 9000 g de soda cáustica com impurezas que corresponde a 8640,00g soluto na sua forma pura.

Para o cálculo da concentração comum, sendo o valor encontrado da quantidade de soluto em gramas para cada litro da solução no valor de 427,72 g/l (Vasconcelos, 2019).

Foi necessário comparar os dados de concentração comum com os dados de solubilidade da soda cáustica.

E, por sua vez, a solubilidade encontrada por meio do gráfico curva de solubilidade foi de 105,5 g/100ml ou 1055,00 g/l, comparando com o valor da concentração comum calculada de 427,72 g/l, a solução será insaturada uma vez que todo soluto está dissolvido na solução (Vasconcelos, 2019). A solução de hidróxido de sódio foi considerada insaturada, uma vez que todo o soluto estava dissolvido.

Para calcular o pH da solução da soda cáustica (NaOH) foi necessário calcular a concentração molar que corresponde a quantidade de soluto em mols para cada litro da solução (Vasconcelos, 2019).

O pH da solução de soda cáustica foi calculado e resultou em um valor alcalino de cerca de 15,2. Isso indica que os blocos de concreto estavam expostos a um ambiente extremamente alcalino.

Em relação ao pH da água, os resultados solicitados pela unidade de vigilância sanitária do município apontam um pH de 8,03. No entanto, como o valor de pH varia muito de acordo com dia, principalmente se houver precipitação, foi retirado uma amostra de água que foi destinada para verificar seu pH (Carvalho; Schlittler; Tornisiello, 2000). Na primeira análise foi utilizada uma tira universal de pH que contém filtros de papel com substâncias que reagem mudando de cor na presença de ácidos ou bases. Segundo o teste, o resultado aproximou do valor de pH valor 5. Sendo assim, o resultado não foi satisfatório, uma vez que apresentava valores não precisos.

Então, para obter valores mais precisos, utilizou-se o pHmetro de bancada, que por meio de um eletrodo submerso na amostra faz-se passar uma corrente e a intensidade da tensão é medida e convertida para escala de pH. Segundo o resultado obtido através do pHmetro de bancada, que foi de pH 5,95, a água é ácida.

O pH é uma variável que influencia nas preservações de tubulações contra entupimentos e é um fator que traz riscos sanitários.

O recomendado é que toda água tratada e distribuída tenha o pH entre 6,0 e 9,5 (CARMO et al., 2024).

Para análise estatística, foi necessário identificar a média, mediana, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo através do software Stata 17.

Resultados e Discussões

As Figuras 1 a 3 mostram a análise de dois corpos de prova em seis unidades para análise visual. Os corpos de referência foram mergulhados em água por 365 dias e os outros corpos de prova foram mergulhados em soda cáustica (NaOH) também por 365 dias.

Em uma análise, observou-se nos 3 grupos diferença de cor entre os corpos de prova referência, ou seja, aqueles que estavam imersos em água, e os que foram imersos em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH).

Os corpos de prova referência (REF) apresentaram uniformidade na cor, enquanto os corpos de prova imersos em soda cáustica (NaOH) exibem uma clara divisão de cores, conforme mostrado nas Figuras 1 a 3. Nos corpos de prova referente ao 3º grupo, houve uma uniformidade visual, porém, a diferença entre os corpos de prova referência e o corpos de prova imersos em soda cáustica ainda é visível.

Figura 1: Corpos de prova 1: (a) Referência (REF). b) Soda Cáustica (NaOH)



Figura 2: Corpos de prova 2: (a) Referência (REF) (b) Soda Cáustica (NaOH)

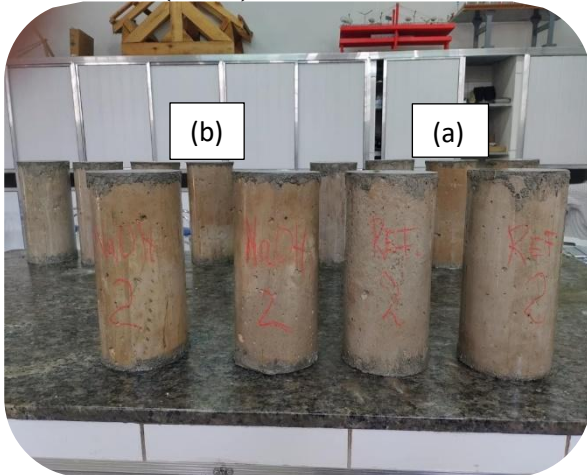
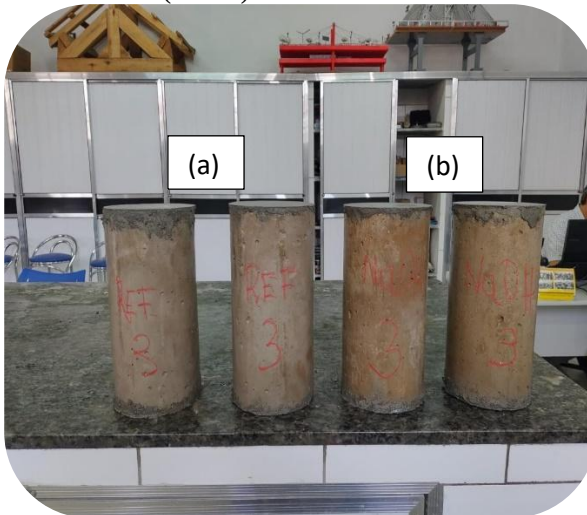


Figura 3: Corpos de prova 3: (a) Referência (REF) (b) Soda Cáustica (NaOH)

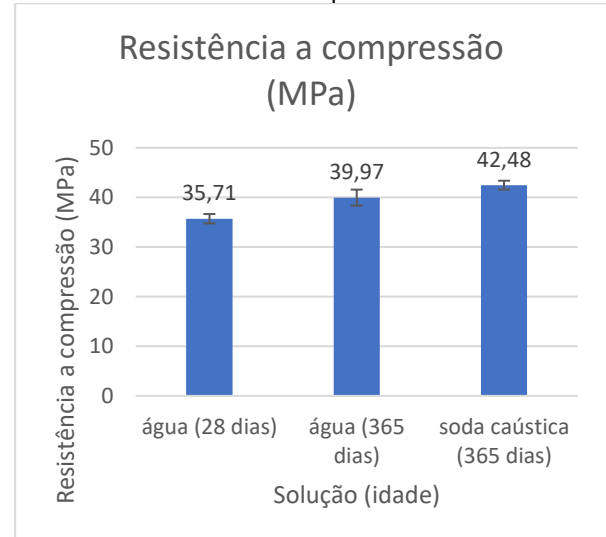


O gráfico 1 mostra os resultados encontrados para a resistência à compressão axial do concreto referência aos 28 dias imersa em água e após 365 dias imersa em água e soda cáustica (NaOH), indicando a média e o erro de cada corpo de prova.

Verificou-se que o concreto de referência imerso em água por 28 dias apresentou uma média de 35,71 MPa. Após 365 dias, os corpos de prova imersos em água e hidróxido de sódio apresentaram uma resistência média encontrada, respectivamente, de 39,97 MPa e 42,48 MPa. Em relação ao corpo de prova

referência, o concreto imerso em água com 28 dias de cura apresentou um crescimento na resistência à compressão de 4,26 MPa para o concreto imerso em água com 365 dias.

Gráfico 1: Resistência a compressão axial



Fonte: Próprio Autor (2024)

Também em relação ao corpo de prova referência, o concreto imerso em água, com 28 dias de cura, ocorreu um crescimento na resistência à compressão de 7,89 MPa em relação ao concreto imerso em soda caustica (NaOH) com 365 dias.

Para a análise estatística, foi necessário identificar a média, mediana, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo dos corpos de prova.

A Tabela 1 apresenta os resultados da resistência a compressão axial em relação aos 6 corpos de prova do concreto referência imersa em água por 365 dias de cura.

A Tabela 2 apresenta os resultados da resistência à compressão axial em relação aos 6 corpos de prova do concreto referência

imersa em soda caustica (NaOH) por 365 dias de cura.

Tabela 1: Resultado da análise dos corpos de prova para o concreto referência imersas em água por 365 dias.

Corpo de prova referência imersa em água por 365 dias		
Média	41,229	MPa
Mediana	41,279	MPa
Desvio Padrão	3,318	MPa
Valor Mínimo	35,417	MPa

Valor Máximo 46,663 MPa

Fonte: Próprio Autor (2024)

Os corpos de prova foram submetidos a um período de 28 dias de cura em água saturada com cal, mantendo a umidade acima de 95% em relação ao ar. Além disso, as extremidades estavam expostas a uma solução de hidróxido de cálcio, conforme as diretrizes da ABNT NBR 5738 (2016). Também foram seguidas as orientações do ACI 308R-01 (2001), que recomendam o uso de água isenta de impurezas e com uma diferença de temperatura não superior a 11 graus em relação à temperatura do concreto.

Mehta (1994) observaram que a hidratação do cimento Portland é limitada pela disponibilidade de água e cimento. A reação de cura continua até que todo o cimento esteja hidratado ou não haja mais cimento não hidratado, ou até que falte água para a hidratação. Como a propagação dos poros capilares está relacionada ao grau de

hidratação, é fundamental fornecer água em quantidade suficiente para garantir a hidratação. Li (2021) destaca que, para um mesmo grau de hidratação, a resistência do concreto depende principalmente da relação água-cimento. Neville (2015) também mencionou a influência do tempo de cura em concretos com diferentes relações água-cimento.

Tabela 2: Resultados da análise dos corpos de prova para o concreto referência imerso em hidróxido de sódio por 365 dias.

Corpos de prova para o concreto referência imerso em hidróxido de sódio por 365 dias		
Média	42,483	MPa
Mediana	41,784	MPa
Desvio Padrão	2,179	MPa
Valor Mínimo	39,963	MPa
Valor Máximo	45,589	MPa

Fluidos agressivos podem penetrar nos poros do concreto por difusão, resultado da diferença nas concentrações iônicas entre os fluidos internos e externos (Ferreira, 2000).

Nos corpos de prova imersos em soda caustica (NaOH), a solução de hidróxido de sódio penetrou no concreto, uma vez que os íons de sódio mantiveram as concentrações iônicas equilibradas entre os fluidos internos e externos (Marko et al., 2022).

No entanto, nos corpos de prova expostos apenas à água, esse equilíbrio não ocorreu. Como demonstrado pelo pH, a água pode ter caráter ácido, levando à hidrólise ou dissolução dos produtos contendo cálcio. O hidróxido de cálcio, devido à sua alta solubilidade em água pura, é particularmente sensível à eletrólise, resultando em lixiviação e perda de resistência (Mehta, 1994).

Thomas; Jennings; Chen, (2009) indicam que misturas com adições possuem níveis mais elevados de água e hidróxido de cálcio, o que favorece a nucleação. A nucleação envolve a organização de um pequeno número de partículas em um padrão característico, preenchendo os espaços vazios entre os silicatos do cimento Portland (C_3S e C_2S), que normalmente seriam porosos. Isso pode reduzir a permeabilidade e proteger o material contra agentes agressivos, além de aumentar a resistência à compressão. Isso explicaria por que os corpos de prova imersos na solução de soda cáustica apresentaram maior resistência do que aqueles imersos apenas em água.

Uma técnica que utiliza a nucleação de partículas, conhecida como "realcalinização," é um método de tratamento para concretos carbonatados. Ela envolve a difusão de soluções alcalinas no interior do concreto, incluindo soluções de soda cáustica. Os íons alcalinos reagem com a fase líquida dos poros do concreto, resultando em novos produtos com pH mais elevado (Glawe; Raupach, 2024).

Outra possível causa da variação na resistência à compressão pode estar relacionada à carbonatação. Isso envolve a reação do dióxido de carbono (CO_2) com a água, formando ácido carbônico (H_2CO_3), que reage com as substâncias alcalinas presentes no concreto, como os íons de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), hidróxido de sódio ($NaOH$) e hidróxido de potássio (KOH), formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (Wang; Yue, 2023). A velocidade desse processo depende de vários fatores, incluindo a difusão de CO_2 no concreto, umidade relativa, tempo, relação água-cimento, tipo de cimento, permeabilidade do concreto e método de cura. Em condições ideais de produção e qualidade dos materiais, a velocidade de carbonatação varia de 1 a 3 mm por ano (Jedidi; Benjeddou; Soussi, 2020).

No entanto, como os corpos de prova deste estudo estavam totalmente imersos em água, todos os poros do concreto estão cheios de água, com umidade superior a 60% em relação ao ar.

Portanto, o dióxido de carbono não pode se difundir pelos poros, eliminando a hipótese de carbonatação. Isso se deve à alta umidade, que impede a carbonatação devido à baixa velocidade de difusão do CO_2 na água (Zheng et al., 2022).

A fenolftaleína é um indicador ácido que, em sua estrutura molecular, possui um hidrogênio ionizável. Em presença de grupos básicos, esses hidrogênios ionizáveis são fortemente atraídos pelas hidroxilas desses

grupos, resultando na liberação de ânions que causam a coloração no concreto (Hossain; Chowdhury; Anik, 2024)

Na Figura 5 através do ensaio de carbonatação, observou-se que o corpo de prova, imerso em soda cáustica, exibiu uma tonalidade mais rosa. À direita, o corpo de prova de referência possui uma coloração mais concentrada.

Figura 5: Reação com o Indicador Fenolftaleína nos Corpos de Prova.



Fonte: Próprio Autor (2024)

Isto quer dizer que os corpos de prova com coloração vermelho carmim apresentaram pH superior a 12 e uma tonalidade clara, que indica pH inferior a 11. Isso significa que houve carbonatação e, conseqüentemente, a despassivação das armaduras.

Na Figura 6 observou-se o indicador ácido-base aplicado na superfície dos corpos de prova. O corpo de prova da esquerda representa a amostra imersa em soda cáustica,

enquanto o da direita foi imerso em água apenas.

Figura 6: Reação com o Indicador Fenolftaleína nos Corpos de Prova.



Fonte: Próprio Autor (2024).

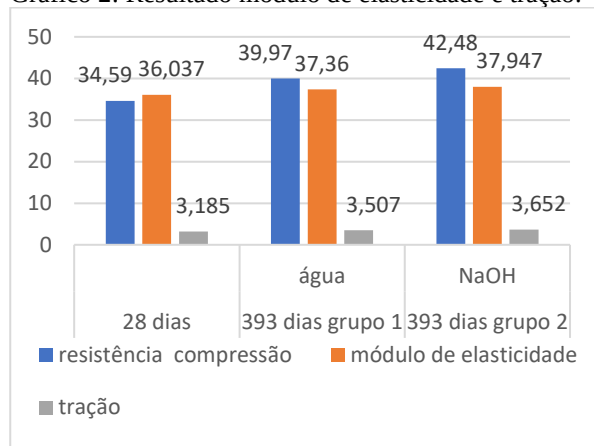
Observa-se que os corpos de prova imersos em soda cáustica apresentam uma coloração indicativa da presença de uma base. No entanto, o indicador não reage de forma tão significativa no outro corpo de prova.

Os valores do módulo de elasticidade e da tração foram calculados a partir das médias de resistência à compressão, conforme os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 6118 (2023), conforme mostrado no gráfico 2.

Os resultados mostraram um aumento de 3,67% no módulo de elasticidade do concreto referência imerso em água por 28 dias para o concreto referência imerso em água por 365 dias.

Também houve um aumento de 5,30% nos valores no módulo de elasticidade do concreto referência imerso em água por 365 dias para o concreto referência imerso em soda cáustica (NaOH) por 365 dias.

Gráfico 2: Resultado módulo de elasticidade e tração.



Fonte: Próprio Autor (2024)

Quanto à tração, houve um aumento de 10,12% do concreto referência imerso em água por 28 dias para o concreto referência imerso em água por 365 dias. Também houve um aumento de 14,68% do concreto referência imerso em água por 365 dias para o concreto referência imerso em soda cáustica (NaOH) por 365 dias.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, observa-se que o ambiente alcalino não exerceu um impacto negativo na resistência à compressão. No entanto, é importante ressaltar que o método de avaliação da resistência à compressão do concreto, que envolve a fabricação de corpos de prova, apresenta desafios devido à variabilidade dos resultados.

Mesmo em situações em que os corpos de prova são moldados na mesma betoneira, eles podem apresentar resistências diferentes para uma mesma idade e condição.

As reações de hidratação do concreto são influenciadas por diversas variáveis, como as características dos componentes, a morfologia das partículas, o processo de produção do concreto, a relação água-cimento, as condições de cura, o ambiente e até mesmo a presença de aditivos. As reações químicas envolvidas no processo de hidratação do concreto estão intimamente relacionadas com as propriedades do material e a forma como é preparado. Devido à complexidade desse processo, é difícil estabelecer um modelo que leve em consideração todos os fatores envolvidos.

Observa-se que, em comparação às amostras que foram mergulhadas em solução de hidróxido de sódio e aquelas que apenas receberam água, as primeiras apresentaram uma resistência à compressão axial aparentemente maior, enquanto as segundas apresentaram valores inferiores.

Entretanto, quando os resultados foram analisados estatisticamente, não foi possível identificar diferenças significativas entre as amostras. Isso sugere que não houve diferença estatisticamente relevante entre as amostras em termos de resistência à compressão.

Portanto, não é possível concluir que a presença de soda cáustica contribuiu para o aumento da resistência, nem que a solução contendo apenas água resultou em uma

redução da resistência dos corpos de prova em comparação com aqueles expostos à soda cáustica. Para investigar essas variações, é necessário considerar outros fatores, como os efeitos físicos prejudiciais, como o aumento da porosidade, permeabilidade, fissuração, destacamento e a composição química. A avaliação da resistência à compressão axial por si só não é suficiente para uma análise abrangente desses efeitos.

Referências

- ABNT NBR_12655. Concreto de cimento Portland Preparo, controle, recebimento e aceitação Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 16889. concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 16916. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 16917. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 16972. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 17054. Agregados-Determinação da composição granulométrica- Método de ensaio Abnt. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ABNT NBR 9479. Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 16605. NBR 16605 /2017: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ARTIOLI, Gilberto; SECCO, Michele; ADDIS, Anna. The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world. *In*: [s.l.: s.n.]. p. 151–202. DOI: 10.1180/EMU-notes.20.4.
- CARMO, Júlia Gomes; VIEIRA, Vitória Cristina da Silva; SILVA, Mário Batista Da; HOFFMANN, Nora Katia Saavedra del Aguila. Monitoramento da qualidade da água de estação de tratamento de ciclo completo - Goiânia, Goiás. *Caderno Pedagógico, [S. l.]*, v. 21, n. 3, p. e3159, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n3-072.
- CARVALHO, Adriana Rosa; SCHLITTLER, Flávio Henrique Mingante; TORNISIELO, Valdemar Luiz. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. *Química Nova, [S. l.]*, v. 23, n. 5, p. 618–622, 2000. DOI: 10.1590/s0100-40422000000500009.
- DOS SANTOS, Fábio José et al. Study of pathological manifestations in concrete structures in the municipality of Carlos Chagas: case study. *Observatório De La Economía Latinoamericana, [S. l.]*, v. 22, n. 2, p. e3493, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n2-230.
- GLAWE, Clarissa; RAUPACH, Michael. Basics and new opportunities for chemical re-alkalisation of carbonated concrete , including alkali-activated binders. *[S. l.]*, v. 76, p. 1185–1197, 2024.
- HOSSAIN, Md. Anwar; CHOWDHURY, Sharmin Reza; ANIK, Md. Fazla Rabbi. Study on carbonation of low strength concrete made of brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials, [S. l.]*, v. 20, p. e03073, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509524002249>.
- JEDIDI, Malek; BENJEDDOU, Omrane; SOUSSI, Chokri. EFFECT OF WATER-CEMENT RATIO , CEMENT DOSAGE , TYPE OF CEMENT AND CURING PROCESS ON THE DEPTH OF. *[S. l.]*, n. 30, p. 333–346, 2020. DOI: 10.14311/CEJ.2020.03.0030.
- KRUG, Lucas Fernando. Processo de carbonatação no concreto e modelos para sua previsão: uma revisão. *Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, [S. l.]*, v. 8, n. 2, 2023.
- LI, Wei. Analysis of the Influence of Water-cement Ratio on Concrete Strength. *E3S Web of Conferences, [S. l.]*, v. 283, p. 8–11, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301016.
- MARKO, Michal; HRUBÝ, Petr; JANČA, Martin; KŘÍKALA, Jakub; HAJZLER, Jan; ŠOUKAL, František; VOJTÍŠEK, Jan; DOLEŽAL, Martin. Monitoring of Ion Mobility in the Cement Matrix to Establish Sensitivity to the ASR Caused by External Sources. *Materials, [S. l.]*, v. 15, n. 14, 2022. DOI: 10.3390/ma15144730.
- MEHTA, P. K. (Povindar K.). Concreto : estrutura, propriedades e materiais. São Paulo:
- NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.pdf. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: www.abnt.org.br.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto - 5ª Edição. [s.l.] : Bookman Editora, 2015. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=dYOPCgAAQBAJ>.

RIBEIRO, Vander Alkmin dos Santos; WERDINE, Demarcus; BARBOSA, Luciano Floriano; OLIVEIRA, Adhimar Flávio; SANTANA, Lucas Passos. Investigação das propriedades do concreto convencional com adição de resíduos de pneu e metacaulim. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 5, p. e2410514463, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i5.14463.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. 1º ed. [s.l.: s.n.].

T, Hemalatha; GOPAL, Ramesh; GOPINATH, Smitha. Textile Reinforced Concrete Subjected to Acidic and Alkaline Environment: Experimental Study. Journal of Materials in Civil Engineering, [S. l.], v. 34, 2022. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004307.

THOMAS, Jeffrey J.; JENNINGS, Hamlin M.; CHEN, Jeffrey J. Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement. The Journal of Physical Chemistry C, [S. l.], v. 113, n. 11, p. 4327–4334, 2009. DOI: 10.1021/jp809811w. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp809811w>.

VASCONCELOS, Nadja Maria Sales. Fundamentos de Química Analítica Quantitativa. [s.l.: s.n.].

VICENTE GENTIL. Corrosao. 7. ed. [s.l.: s.n.].

WANG, Weina; YUE, Qingxia. The Time Variation Law of Concrete Compressive Strength: A Review. Applied Sciences, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258163033>.

ZHENG, Jun; ZENG, Gang; ZHOU, Hui; CAI, Guanghua. Experimental Study on Carbonation of Cement-Based Materials in Underground Engineering. Materials, [S. l.], v. 15, n. 15, p. 1–19, 2022. DOI: 10.3390/ma15155238.

ZUO, Wei; ZHAO, Xiao; LUO, Jianglin; HE, Zixin; ZHAO, Jianjun. Investigating the impact of carbonation curing concentrations on the mechanical properties and microstructure of recycled concrete. Journal of Building Engineering, [S. l.], v. 96, p. 110465, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110465>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224020333>.