

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CONCRETOS COM ADITIVO REDUTOR DE PERMEABILIDADE

Alexandre Alves Fernandes

Bacharel em Engenharia Civil (a.alves.fernandes74@gmail.com)

Gabriel Victor Rodrigues Cardoso

Bacharel em Engenharia Civil (gabrielbielcardoso@gmail.com)

Matheus Souza Gomes

Bacharel em Engenharia Civil (matheus.sousagomes24@gmail.com)

Pedro Henrique da Silva Nobrega do Nascimento

Bacharel em Engenharia Civil (vov157@hotmail.com)

Raynner Lucas Gouveia Godoi

Bacharel em Engenharia Civil (raynner180@gmail.com)

Julliana Simas Vasconcellos

Doutora, Docente da Universidade Estadual de Goiás - UEG (julliana.simas@ueg.br)

Ana Lúcia Carrijo Adorno

Doutora, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (ana.carrijo@unievangelica.edu.br; ana.adorno@ueg.br)

RESUMO

O concreto, material poroso e suscetível a microfissuras, pode sofrer deterioração quando exposto à penetração de água e líquidos corrosivos, comprometendo sua durabilidade e desempenho estrutural. Para reduzir esses efeitos, estratégias tradicionais incluem o uso de materiais cimentícios suplementares e a diminuição da relação água-cimento. Este trabalho concentra-se no emprego de aditivos redutores de permeabilidade, com o objetivo de verificar se há melhorias significativas nas propriedades do concreto, sobretudo na resistência à penetração de água e de outros agentes agressivos, buscando aumentar sua vida útil em diferentes aplicações. Foram avaliados os efeitos de três concentrações de aditivo (1%, 1,5% e 2%) sobre a resistência à compressão e a permeabilidade, a partir de um traço padronizado em que cada grupo recebeu uma das dosagens estabelecidas. Corpos de prova foram moldados conforme normas técnicas, submetidos à cura adequada e ensaiados quanto à resistência à compressão. A permeabilidade foi analisada por testes de absorção e imersão em água, seguindo métodos padronizados. Os resultados indicaram que os aditivos aumentam a resistência inicial à compressão, porém esse efeito tende a se reduzir ao longo do tempo. Além disso, a absorção de água mostrou que a redução da permeabilidade não é linear, sugerindo influência da composição do concreto e das condições de cura. Conclui-se que, embora os aditivos contribuam para maior durabilidade e resistência inicial, sua eficácia em longo prazo ainda requer investigações adicionais.

PALAVRAS-CHAVE: concreto, aditivos redutores de permeabilidade, durabilidade, resistência à compressão, absorção de água.

1 INTRODUÇÃO

A natureza porosa do concreto e a presença de microfissuras em sua matriz o tornam vulnerável à penetração de água e outros líquidos corrosivos, o que acarreta uma redução progressiva da vida útil das estruturas de concreto expostas à condições ambientais agressivas. Este processo de deterioração é agravado pela degradação física e química dos materiais, conforme identificado por Souza *et al.* (2017). Além disso, estruturas situadas próximas ao lençol freático ou em regiões de alta umidade são particularmente suscetíveis a esses desafios, exigindo intervenções frequentes de manutenção que implicam altos custos de reparo.

Ao longo dos anos, diversas estratégias foram adotadas para minimizar a absorção de água pelo concreto. Conforme discutido por Muhammad *et al.* (2015), métodos tradicionais incluem a inclusão de materiais cimentícios suplementares na mistura do concreto, a redução da proporção água-cimento e o uso de reforços adicionais para controlar a formação de fissuras. Mais recentemente, como observado por Rodriguez (2021), novas abordagens foram desenvolvidas, incluindo o uso de membranas externas, revestimentos superficiais e técnicas de impermeabilização integral. Entre essas novas técnicas, o uso de aditivos emergiu como uma alternativa promissora às soluções convencionais de redução de permeabilidade, com variadas formulações sendo testadas para otimizar sua eficácia na redução da absorção de água, como destacado por Apay *et al.* (2016).

Dada a necessidade crescente de soluções eficientes que assegurem a redução de permeabilidade do concreto, especialmente em estruturas expostas a ambientes agressivos ou em contato frequente com água, este estudo é de grande relevância. Os resultados obtidos fornecerão informações sobre a eficácia dos aditivos redutores de permeabilidade, auxiliando empresas e profissionais da construção civil na tomada de decisões informadas sobre a utilização desses aditivos em seus projetos, visando melhorar a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto.

Neste contexto, o presente estudo visa explorar o comportamento de concretos enriquecidos com aditivos redutores de permeabilidade, investigando especificamente os efeitos desses aditivos na penetração de água por imersão em amostras de concreto contendo diferentes percentuais (1%, 1,5% e 2%) do aditivo. Além disso, avalia-se a resistência das amostras por meio de ensaios de compressão axial, comparando o desempenho do concreto com e sem a adição de aditivo redutor de permeabilidade.

No entanto, um desafio significativo reside na variabilidade dos resultados esperados da adição de aditivos redutores de permeabilidade. A incerteza quanto à capacidade desses aditivos de mudarem as propriedades do concreto ao longo do tempo pode comprometer sua eficácia prática, destacando a necessidade de uma investigação rigorosa neste estudo.

2 O CONCRETO

De acordo com Silva (2018), o concreto é um material artificial que se adapta às demandas criativas da construção civil. Devido as habilidades inventivas, foi possível desenvolver um material que, após endurecido, apresenta uma resistência comparável à das rochas naturais. Em seu estado fresco, o concreto é altamente maleável, possibilitando sua moldagem em diversas formas e tamanhos conforme necessário.

Neville (2015) define o concreto como uma mistura uniforme de cimento, agregados finos e grossos, podendo ou não incluir aditivos químicos e outros componentes adicionais. Suas características são desenvolvidas à medida que a pasta de

cimento endurece. De acordo com Grubba (2023), o concreto é composto por uma mistura de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água. Logo após a mistura, o concreto deve apresentar uma consistência plástica adequada para ser manuseado, transportado e moldado em fôrmas. Com o tempo, ele adquire coesão e resistência devido às reações entre o aglomerante e a água. Em alguns casos, são adicionados aditivos para modificar suas propriedades físicas e químicas.

Segundo Tafarel *et al.* (2016), o concreto se destaca por duas principais propriedades: sua resistência à água, que o torna menos suscetível à deterioração quando exposto a este elemento, sendo amplamente utilizado em estruturas para controle, armazenamento e transporte de água; e sua plasticidade, que permite a criação de formas construtivas diversas e criativas. Além disso, o concreto possui outras vantagens, como a abundante disponibilidade de seus componentes e seus custos relativamente baixos.

Porto (2016) afirma que o concreto de cimento Portland é amplamente reconhecido como o material estrutural mais importante na construção civil contemporânea. Embora tenha surgido recentemente em comparação com outros materiais de construção, sua ascensão pode ser vista como uma das descobertas mais significativas na história do progresso humano e na promoção da qualidade de vida.

Porto e Fernandes (2015) classificam o concreto utilizado como material estrutural em três categorias: concreto simples, sem armadura; concreto armado, com armadura, mas não pré-tensionada ou protendida; e concreto protendido, com armadura ativa e pré-tensionada. Balbo (2016) explica que o concreto simples é empregado em diversas aplicações, como na fabricação de blocos de concreto, construção de estacas broca para fundações, fabricação de tubulações e preparação de pisos de cimento, entre outros usos. Por outro lado, Porto e Fernandes (2015) destacam que o concreto armado é um material composto pela união do concreto simples com barras de aço, garantindo uma perfeita aderência entre os dois materiais, permitindo que ambos resistam solidariamente aos esforços a que são submetidos.

Carvalho e Motta (2019) argumentam que a utilização de barras de aço junto com o concreto é viável devido a várias razões, tais como: a interação eficiente entre o concreto e o aço, garantida pela aderência entre os materiais; os coeficientes de dilatação térmica do aço e do concreto são praticamente idênticos e o concreto proporciona proteção contra a oxidação do aço de armadura, assegurando a durabilidade da estrutura.

Teixeira, Andrade e Bonifácio (2015) destacam que, no controle de qualidade do concreto, a resistência é frequentemente especificada como uma propriedade fundamental, pois os testes de compressão são relativamente simples em comparação com outros ensaios de propriedades. Silva *et al.* (2017) acrescentam que muitas características do concreto, como módulo de elasticidade, estanqueidade e durabilidade sob intempéries, incluindo exposição a águas agressivas, estão relacionadas à sua resistência à compressão e podem ser inferidas a partir dos dados obtidos nesses testes. A resistência à compressão do concreto geralmente supera outras formas de resistência, razão pela qual a maioria das estruturas de concreto é projetada para aproveitar essa propriedade. Embora o concreto esteja sujeito a uma combinação de diferentes tipos de estresse na prática, os testes de compressão uniaxial são mais simples de realizar em laboratórios. Portanto, o teste de resistência à compressão aos 28 dias é universalmente aceito como um indicador geral da qualidade do concreto (Teixeira, Andrade e Bonifácio, 2015).

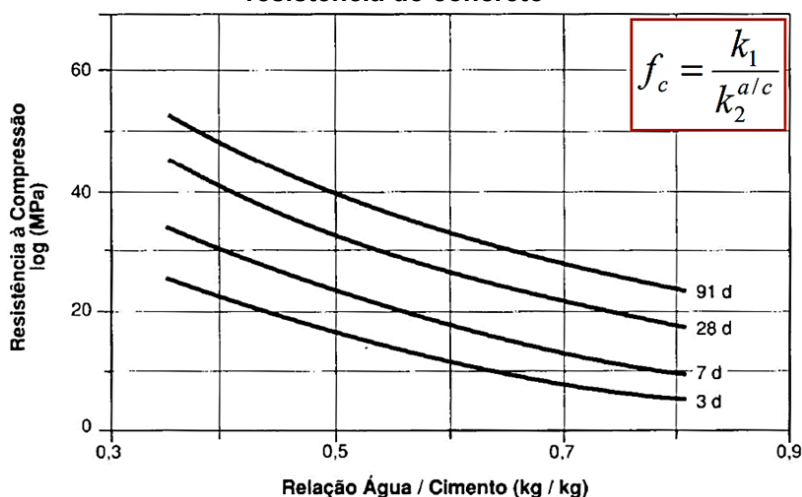
3 DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade do concreto é um aspecto importante na construção civil, pois o material se deteriora ao longo dos anos devido a diversos fatores. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), as estruturas de concreto devem possuir uma durabilidade mínima de 50 anos. No entanto, a durabilidade não é determinada apenas pelo tempo; a composição do concreto, sua compactação e sua exposição ao ambiente também desempenham papéis significativos. Segundo Neville (2015), a durabilidade do concreto depende de sua capacidade de resistir a condições ambientais adversas.

Villar *et al.* (2012) a durabilidade do concreto e suas propriedades mecânicas estão ligadas intrinsecamente pelos efeitos do transporte de umidade, destacando que a permeabilidade é a principal influência na durabilidade do concreto, afetando sua capacidade de resistir às ações do ambiente. As características essenciais para garantir a conservação e durabilidade do concreto incluem a relação água-cimento (a/c) e o nível de absorção de água e ar pelo material. Esta mínima quantidade de vazios proporciona ao material uma elevada densidade de empacotamento, o que confere elevada resistência mecânica e elevada durabilidade (Christ; Tutikian; Helene, 2022).

Ensaio realizado por Duff Abrams (Figura 1) mostraram que a resistência do concreto no estado endurecido é inversamente proporcional à relação a/c. Em outras palavras, o uso habitual de um excesso de água reduz a qualidade do concreto (Ferreira, 2016).

Figura 1 - Gráfico de relação água/cimento em função da resistência do concreto



Fonte: Ferreira (2016).

O gráfico da Figura 1 mostra que, à medida que a relação a/c diminui, a resistência à compressão do concreto aumenta. Uma menor quantidade de água relativa ao cimento leva à formação de um material mais compacto e denso, com menos porosidade e, portanto, maior resistência. O ponto de inflexão no gráfico indica a relação a/c ótima, onde a resistência à compressão do concreto é maximizada. Geralmente, uma relação a/c baixa é considerada ideal para obter um concreto de alta resistência.

A água é considerada tanto um agente de deterioração quanto um meio de transporte para substâncias corrosivas. Portanto, para aumentar a durabilidade e a vida útil da estrutura, é crucial aumentar a capacidade do concreto. Isso significa que controlar a quantidade de água na mistura é fundamental, pois uma baixa relação água-cimento, como indicado no gráfico da Figura 1, contribui significativamente para essa capacidade, resultando em concreto de qualidade superior e maior resistência ao longo do tempo.

Para especificar as propriedades do concreto, como a relação água-cimento máxima e a resistência à compressão característica mínima (f_{ck}), é necessário identificar corretamente a classe de agressividade ambiental, conforme a Tabela 1, apresentada pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

Tabela 1 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023).

A Tabela 1 apresenta a correspondência entre a classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto, conforme definido pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Esta tabela é fundamental para garantir que o concreto utilizado em diversas condições ambientais possua a resistência e durabilidade necessárias. A tabela é dividida em duas principais categorias de concreto: CA (concreto armado) e CP (concreto protendido). Para cada tipo de concreto, são especificadas as relações água/cimento máximas permitidas e as classes de resistência do concreto (f_{ck}) mínimas necessárias, de acordo com a classe de agressividade ambiental, que varia de I a IV.

A relação água/cimento (a/c) é um fator crítico na durabilidade do concreto. À medida que a classe de agressividade aumenta, de I para IV, a relação a/c permitida diminui, indicando a necessidade de um concreto mais denso e menos permeável em ambientes mais agressivos. Para o concreto armado (CA), a relação a/c varia de $\leq 0,65$, na classe I a $\leq 0,45$, na classe IV. Já para o concreto protendido (CP), a relação a/c varia de $\leq 0,60$, na classe I a $\leq 0,45$, na classe IV. Além disso, a classe de concreto, definida pela resistência característica à compressão (f_{ck}), também deve aumentar conforme a classe de agressividade cresce, garantindo que o concreto terá a resistência necessária para suportar as condições ambientais adversas. Para o concreto armado (CA), a classe de concreto varia de C20, na classe I a C40, na classe IV, enquanto para o concreto protendido (CP), a classe de concreto varia de C25, na classe I a C40, na classe IV.

De acordo com a Tabela 1, para garantir a durabilidade e a integridade estrutural do concreto em diferentes condições ambientais, é essencial ajustar tanto a relação água/cimento quanto a classe de resistência do concreto. Em ambientes mais agressivos, como aqueles sujeitos a exposição química intensa ou ciclos de gelo-degelo, é necessário um concreto mais denso e com maior resistência para evitar deteriorações prematuras. O cumprimento dos requisitos especificados na NBR 6118 (ABNT, 2023) é fundamental para a durabilidade das estruturas de concreto, seja armado ou protendido.

Helene e Terzian (1992) afirmam que a classe de agressividade está intimamente ligada ao ambiente específico onde a estrutura será localizada, variando de moderada a extremamente severa, dependendo das circunstâncias locais. Essa classificação considera fatores como a presença de substâncias químicas agressivas, ciclos de gelo-

degelo, exposição à água do mar e atmosferas industriais. Mehta e Monteiro (2014) enfatizam que, para garantir a durabilidade da estrutura, diferentes medidas de proteção e especificações de materiais são necessárias para cada classe de agressividade.

Em resumo, a durabilidade do concreto depende de vários fatores inter-relacionados, como sua composição, técnicas de cura e condições ambientais. A literatura sugere que é possível aumentar a durabilidade do concreto por meio do uso de aditivos, da seleção de materiais cimentícios adicionais e da manutenção de uma baixa relação água-cimento.

4 ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE

De acordo com Ary (2019), os aditivos são utilizados para alterar e aprimorar diversas propriedades do concreto. Devido à alta porosidade do concreto, que facilita a entrada de água por meio de poros, microfissuras, absorção capilar ou pressão hidrostática, a adição de um aditivo para reduzir a permeabilidade é uma opção viável para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado. Ary (2019) também menciona que o relatório de aditivos químicos publicado pelo Instituto de Concreto Americano (ACI) destaca que os aditivos químicos que reduzem a permeabilidade do concreto podem variar de acordo com o fabricante. Esses aditivos incluem produtos químicos hidrofóbicos ou repelentes de água, sólidos finamente divididos e materiais cristalinos. Conforme a definição do ACI, os aditivos redutores de permeabilidade (PRA) dividem-se em duas categorias: os que reduzem a permeabilidade em condições hidrostáticas (PRAH) e os que atuam em condições não-hidrostáticas (PRAN). No Brasil, esses aditivos ainda não possuem regulamentação normativa.

Segundo Araújo *et al.* (2020), os PRAH são uma opção para prevenir a passagem de água e selar fissuras, enquanto os aditivos PRAN são recomendados para retardar o ingresso e a passagem de água pelo concreto, seja na forma líquida ou vapor, em condições de pressões menos severas por ações capilares, tornando a superfície do concreto repelente à água. Os aditivos cristalizantes pertencem à categoria PRAH e são hidrofílicos, reagindo facilmente com a água. Por outro lado, os produtos repelentes à água se encaixam na categoria de PRA que, diferentemente dos PRAH, são hidrofóbicos. A reação dos produtos químicos do aditivo cristalino nas misturas cimentícias ocorre na presença de umidade. Devido à natureza hidrofílica do aditivo, o fornecimento de água é essencial para que as reações de cristalização aconteçam.

Conforme Roig-Flores (2016), o comportamento desses produtos ainda é parcialmente desconhecido. Um relatório da ACI TC 212 indica que os compostos que reagem com esses aditivos são silicatos tricálcicos, enquanto Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2012) apontam o hidróxido de cálcio como o composto reativo. O consenso é que essas reações formam produtos cristalinos que preenchem os poros e fissuras do concreto, tornando-o menos permeável à água e a outros líquidos agressivos. As formações cristalinas produzidas pelos aditivos tornam-se uma parte permanente da matriz cimentícia.

Esses aditivos não são apenas eficazes no bloqueio de poros, mas também têm a capacidade de resistir a condições hidrostáticas e selar fissuras quando ativados pela umidade. Como resultado da reação, eles formam CSH modificado e, dependendo do promotor cristalino, geram um precipitado a partir de moléculas de água e cálcio. Essas características podem contribuir para a recuperação das propriedades mecânicas do concreto, dependendo das condições de exposição e dos mecanismos de cicatrização ativados, conforme mencionado por Ferrara, Krelani e Moretti (2016).

4.1 PEQUISAS EXPERIMENTAIS COM ADIÇÃO DE ADITIVO REDUTOR DE PERMEABILIDADE NO CONCRETO

Ary (2019) realizou um estudo com o objetivo de analisar o efeito de dois tipos de aditivos (PRAH e PRAN) nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Foram moldadas e testadas amostras de cinco formulações diferentes: uma referência (sem adição de PRA), duas com diferentes aditivos PRAH e duas com diferentes aditivos PRAN. Os testes realizados incluíram resistência à compressão, absorção de água por imersão e ação capilar, permeabilidade à água sob pressão, resistividade volumétrica e difusão de cloreto. Os resultados indicaram que os aditivos PRA não afetaram a resistência à compressão do concreto. Em relação à durabilidade, os testes de absorção por imersão não mostraram alterações significativas nos valores de absorção, tornando os resultados inconclusivos sobre o desempenho desses aditivos.

Em testes de absorção capilar, observou-se que o aditivo PRAN reduziu significativamente a absorção de água em comparação com a mistura de referência. Por outro lado, em condições de alta pressão de água, como em testes de penetração de água sob pressão, os aditivos PRAH apresentaram uma redução mais acentuada na absorção. Em relação à permeabilidade aos íons cloreto e à resistividade volumétrica, os resultados não mostraram tendências claras relacionadas ao tipo de aditivo, variando conforme o produto. No entanto, foi observado que concretos com maior resistividade são menos permeáveis à passagem de íons cloreto e geralmente de outros íons. Por fim, os resultados foram comparados com os limites de penetração do concreto da Linha Leste do Metrô de Fortaleza, concluindo-se que todos os traços estavam dentro dos limites padrão para ação capilar e absorção por imersão, mas não cumpriram os critérios de penetração de água sob pressão.

Oliveira (2018) conduziu uma avaliação do desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto em relação à penetração de cloretos. Foram preparados seis traços de concreto, três para cada uma das classes de agressividade ambiental II e III, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), utilizando relações a/c de 0,60 e 0,55, respectivamente, e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V) em ambos. Após a cura submersa, os corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm²) foram cortados em fatias cilíndricas (100 x 50 mm²) e submetidos ao ensaio de migração de cloretos, conforme a norma NT Build 492. Adicionalmente, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água, índice de vazios e alguns ensaios mecânicos para uma melhor caracterização dos concretos. Os resultados mostraram que os aditivos proporcionaram melhorias em algumas propriedades analisadas, especialmente na resistência à penetração de íons cloreto e na redução da absorção de água por capilaridade. Contudo, as melhorias mais significativas foram decorrentes da redução da relação a/c, conforme as classes de agressividade ambiental adotadas.

Araújo (2020) avaliou o efeito de um aditivo redutor de porosidade cristalino (ARPC) na durabilidade do concreto produzido com materiais da cidade de Manaus, por meio de estudos experimentais e análises de cura autógena. Foram produzidos quatro tipos de concreto, utilizando CPII Z-40-RS e CP II E-32, com relação água-cimento fixa de 0,58, ARPC e adições de cimento. Nestes concretos foram analisadas as propriedades de resistência à compressão aos 28 dias com 100% e 90% de carga de fratura para indução de microfissuras no concreto e, posteriormente, a cura aos 84 dias foi avaliada pela resistência à compressão. Verificou-se que o ARPC apresentou melhor desempenho em concretos produzidos com CP II Z-40 RS, principalmente aos 84 dias de idade. Além disso, o concreto adicionado de ARPC apresentou melhor desempenho em termos de percentual de recuperação da resistência à compressão. Os concretos com ARPC e CP II Z-40 RS apresentaram os menores valores em termos de teor de vazios e taxa de

absorção total. Em termos de absorção capilar, o concreto adicionado de ARPC apresentou menor absorção e menor ascensão capilar. A microestrutura apresentou cristais típicos de concreto autocicatrizante, como etringita e carbonato de cálcio. Em relação à migração de íons cloreto, o concreto produzido com CP II E-32 apresentou a menor concentração, o que se deve à presença de escória de alto forno na composição do cimento.

No Quadro 1 estão descritos o estudo experimental desenvolvido pelos autores e os resultados obtidos na avaliação dos efeitos do aditivo.

Quadro 1 - Estudo experimental desenvolvido pelos autores

(continua)

Ary	
Estudo Experimental	Resultados
Resistência à compressão	Os aditivos PRA não alteram a resistência à compressão do concreto.
Absorção de água por imersão	Os aditivos PRA não provocam alterações nos valores de absorção, tornando o ensaio inconclusivo sobre o desempenho dos aditivos.
Absorção de água por capilaridade	O aditivo PRAN destacou-se na redução de absorção de água em relação ao traço referência.
Penetração de água sob pressão	Os aditivos PRAH tiveram uma redução de absorção mais significativa em comparação com o traço referência.
Oliveira	
Estudo Experimental	Resultados
Preparação de seis traços de concreto, três para cada classe de agressividade ambiental (II e III), utilizando relação a/c de 0,60 e 0,55, respectivamente.	Os aditivos redutores de permeabilidade resultaram em melhorias significativas na resistência à penetração de íons cloreto e na redução da absorção de água por capilaridade.
Avaliação através de ensaios de migração de cloretos (norma NT Build 492), absorção de água por capilaridade, absorção de água, índice de vazios, e ensaios mecânicos (resistência à compressão axial e tração por compressão diametral).	Foi observado um aumento na resistência à penetração de cloretos com o uso dos aditivos, porém todos os traços ainda apresentaram coeficientes de difusão acima de $15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.
Análise das propriedades mecânicas dos concretos ensaiados, incluindo resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.	O uso dos aditivos promoveu um aumento na resistência à compressão axial nas idades de 3 e 7 dias, mas não houve efeito significativo em outras propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.
Observação da estrutura dos concretos através de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).	Não foram identificadas formações específicas de cristalização capilar nos vazios da matriz cimentícia devido ao uso dos aditivos, porém os coeficientes de difusão reduzidos indicam uma eficácia na redução da migração de íons cloreto.
Araújo	
Estudo Experimental	Resultados
Produção de concretos com relação água/cimento de 0,55	Avaliação da resistência à compressão aos 84 dias em concretos com microfissuras provocadas por cargas de ruptura de 100% e 90% após 28 dias de cura.
Adição de ARPC e cimentos CPII Z-40-RS e CP II E-32	ARPC apresentou melhor desempenho nos concretos com CPII Z-40-RS aos 84 dias.
Eficácia da cicatrização avaliada pela resistência à compressão	Concretos com ARPC mostraram melhor recuperação da resistência à compressão aos 84 dias em comparação com os sem adição.

Quadro 1 - Estudo experimental desenvolvido pelos autores

(conclusão)

Araújo	
Estudo Experimental	Resultados
Comparação entre concretos com CPII Z-40-RS e CP II E-32 com ARPC	Melhores resultados observados com CPII Z-40-RS aos 84 dias, indicando potencial de autocicatrização.

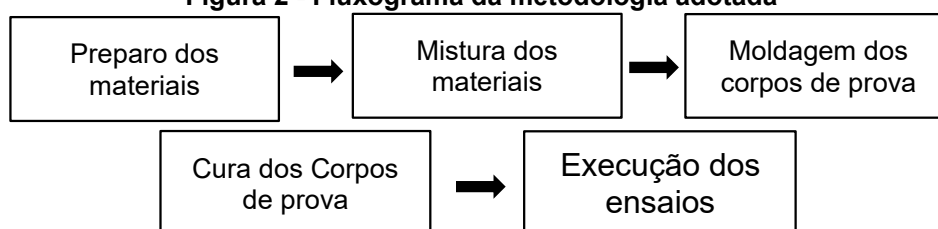
Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a descrição do programa experimental realizado no estudo. São abordadas as características, composições e fatores operacionais trabalhados durante a investigação. Inicialmente, é fornecida uma caracterização dos materiais utilizados no experimento, incluindo o cimento, agregados, água e aditivo redutor de permeabilidade. Em seguida, é descrito o processo de fabricação dos corpos de prova (CPs), detalhando as proporções adotadas e os procedimentos de moldagem. Posteriormente, são apresentadas as propriedades avaliadas no estado endurecido dos concretos, com ênfase na resistência à compressão. Os ensaios de laboratório realizados para determinar essas propriedades também são descritos, incluindo os métodos, equipamentos e idades de rompimento utilizados.

Por fim, os resultados obtidos nos ensaios são apresentados, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes traços realizados, com e sem a adição do aditivo redutor de permeabilidade.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás. Na Figura 2 está representado um fluxograma da execução do programa experimental.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia adotada

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A primeira etapa consiste no preparo dos materiais, incluindo a seleção e preparação dos componentes utilizados no concreto, como cimento, agregados, água e aditivos. Após a mistura, o concreto é moldado em corpos de prova (CPs). A moldagem correta garante que os CPs tenham a forma e o tamanho apropriados para os ensaios subsequentes, assegurando que as amostras sejam representativas e uniformes. Finalmente, os ensaios são realizados nos corpos de prova curados. Esta fase inclui a execução de testes para avaliar as propriedades do concreto, como resistência à compressão, absorção de água e permeabilidade.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado no experimento foi o CP II-Z 32 de uso geral da Ciplan. Este tipo de cimento é classificado como Portland composto, contendo adições de material pozzolânico. A presença de pozzolana contribui para uma maior durabilidade e resistência química do concreto, tornando-o adequado para obras expostas a ambientes agressivos. Sua versatilidade o torna apropriado para diversas aplicações, desde estruturas de concreto armado até pavimentação, oferecendo um bom desempenho geral (Ciplan, 2023). A escolha desse cimento foi feita devido à sua versatilidade e ampla aplicação, sendo adequado para diferentes usos, como a confecção de argamassas e a execução de concretos em projetos de diversas escalas. Nas Tabelas 2 e 3 estão especificadas algumas de suas características, fornecidas pelo fabricante do produto.

Tabela 2 - Características Químicas do CP II-Z 32

Componente	Faixa de concentração (%)
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Carbonato de cálcio	0 - 20
Óxido de magnésio	0 - 5,5
Óxido de cálcio	0 - 0,2

Fonte: Ciplan, 2023.

Tabela 3 - Características Físicas e Mecânicas do CP II-Z 32

Propriedades	Valor/Descrição
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Solubilidade em água	até 1,5 g/l a 20°C
Massa Específica Absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2 \text{ g/cm}^3$ a 20°C
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C

Fonte: Ciplan, 2023.

5.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo selecionado, classificado como brita 0 devido ao seu diâmetro máximo de 9,5 mm, é ideal para garantir uma boa trabalhabilidade e compacidade do concreto. Agregados com este diâmetro são amplamente utilizados em concreto estrutural, pois permitem a formação de uma matriz densa e resistente. A massa unitária compactada do agregado graúdo foi igual a 1740 kg/m³, indicando uma boa densidade e compacidade, essenciais para assegurar a integridade estrutural e reduzir a porosidade do concreto.

5.1.3 Agregado miúdo

A areia utilizada possui um módulo de finura igual a 2,6, caracterizando-a como uma areia de granulometria média. Este valor é indicativo de uma boa distribuição das partículas, proporcionando um equilíbrio entre a coesão e a trabalhabilidade da mistura de concreto. Com uma massa específica de 2460 kg/m³, demonstra a sua capacidade de preencher os espaços entre os agregados graúdos, contribuindo para a redução da porosidade e aumento da resistência do concreto.

5.1.4 Aditivo

O aditivo redutor de permeabilidade utilizado foi o Tecplus 1 Quartzolit, da Saint Gobain. O Quadro 2 oferece uma visão das características e aplicações deste produto, destacando suas indicações de uso, vantagens, limitações e especificações técnicas.

Quadro 2 - Informações sobre o Tecplus 1 Quartzolit

Característica	Detalhes
Tipo	Aditivo mineral inorgânico
Indicações	• Impermeabilização de concretos e argamassas utilizados em áreas sujeitas a umidade e pressão d'água; • Argamassas de revestimento (rebocos) e assentamento de alvenarias; • Contrapisos em contato com umidade; • Concretos de fundações, caixas d'água, piscinas, canaletas e reservatórios em geral; • Melhorar a trabalhabilidade e aumentar a coesão das argamassas.
Principais Vantagens	• Produto inorgânico com maior durabilidade; • Fácil adição a argamassas e concretos, proporcionando ganho de coesão e melhor trabalhabilidade; • Maior garantia e durabilidade da obra; • Isento de cloretos que podem agredir a armadura das estruturas.
Limitações de Uso	• Não deve ser utilizado em gesso ou argamassa de gesso; • Não deve ser utilizado em misturas onde o aglutinante não seja cimento Portland; • Deve ser utilizado como complemento da impermeabilização, não substituindo o sistema completo de impermeabilização.
Características do Produto	• Aspecto: Líquido branco leitoso; • Aplicação: Pronto para uso; • Temperatura de aplicação adequada: ar ambiente de 5°C a 40°C, superfície da base de 5°C a 30°C; • Evitar aplicação em superfícies expostas diretamente ao sol ou com risco de chuva.
Consumo Teórico	• Concreto: 1% em relação à massa de cimento (0,5L/50kg de cimento); • Argamassas: 4% em relação à massa de cimento (2L/50kg de cimento).
Tempo de Cura	Deve seguir os critérios da tecnologia de materiais cimentícios após a aplicação.
Fornecimento	Frascos de 1L; Galões de 3,6L; Baldes de 18L; Tambores de 200L.
Armazenamento	• Local seco e arejado, sobre estrado elevado do solo; • Pilhas com no máximo 4 frascos de altura (para frascos de 1L), 4 galões de altura (para galões de 3,6L) e 3 baldes de altura (para baldes de 18L), em sua embalagem original fechada.

Fonte: Adaptado de Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda (2023).

O teor de aditivo utilizado variou para cada mistura de concreto, em relação à massa do cimento. Embora este trabalho vise comparar diferentes quantidades de ARP em corpos de prova de concreto comuns, houve a precaução de basear-se também na dosagem especificada pelo fabricante do produto. Assim, foi adicionada aos traços uma porcentagem recomendada de 1% em relação à massa de cimento, além de serem analisados os resultados das amostras submetidas a 1,5% e 2,0% de ARP (Tabela 2).

5.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Os corpos de prova moldados para a pesquisa foram baseados em uma concepção empírica, resultando no traço em massa de 1:2:3, que indica 1 parte de cimento, 2 partes de areia e 3 partes de brita, conforme mostrado na Tabela 2. Consequentemente, obteve-se um fator água/cimento (a/c) de 0,55.

Foram realizados testes sobre quatro características distintas. Iniciou-se com uma característica inicial sem nenhum componente adicional, seguida por três características adicionais que alteravam o nível do aditivo redutor de permeabilidade presente, conforme descrito abaixo:

- a) Concreto sem aditivo - Traço de referência;
- b) Concreto com 1% de ARP - Traço A;
- c) Concreto com 1,5% de ARP - Traço B;
- d) Concreto com 2% de ARP - Traço C.

Tabela 2 - Proporções utilizadas para confecção dos traços de concreto

Traço 1:2:3	Cimento (kg) 1:	Areia (kg) 2:	Brita (kg) 3:	Água (l) 1,64	Aditivo redutor de permeabilidade (ml)
Traço referência (0% ARP)	9,0	18,0	27,0	4,92	-
A (1% ARP)	9,0	18,0	27,0	4,92	90
B (1,5% ARP)	9,0	18,0	27,0	4,92	135
C (2% ARP)	9,0	18,0	27,0	4,92	180

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Ao utilizar esse traço específico, buscou-se estabelecer uma base de comparação entre os diferentes corpos de prova, permitindo avaliar o impacto do aditivo redutor de permeabilidade na resistência do concreto em diferentes períodos de cura. A variação nos teores de aditivo, de 0% a 2%, proporcionou uma análise dos efeitos desse componente na evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo.

5.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Como ilustrado na Figura 3 para prevenir a contaminação do concreto e não afetar a qualidade e resistência do material, foi realizada uma lavagem prévia do agregado para remover impurezas como terra e lixos orgânicos. Isso foi feito para garantir que substâncias nocivas não excedam os limites máximos em porcentagem estabelecidos em relação à massa do material, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022); posteriormente, na segunda etapa, os agregados foram dispostos em bandejas para serem levados ao forno do laboratório. Neste forno, foram expostos a uma temperatura de 225°C por um período médio de 60 minutos, garantindo o teor de umidade adequado, eliminando a água superficial.

Seguindo as diretrizes da NBR 12655 (ABNT, 2022), foi pesado cada componente, garantindo a preparação adequada dos materiais e a proporção correta das partes, conforme as especificações do traço do concreto (Figura 4).

Ao adicionar os materiais à betoneira, seguiu-se uma sequência padronizada. Com os componentes devidamente secos, o agregado graúdo (brita 0) e o cimento foram colocados na betoneira, seguidos pela adição de metade da água. Esses materiais foram misturados por 2 minutos. Em seguida, o agregado miúdo (areia) foi adicionado à mistura,

junto com o restante da água e o aditivo impermeabilizante já diluído, e a mistura foi continuada por mais 5 minutos (Figura 5). Esse processo foi repetido para cada traço.

Figura 3 - Limpeza e secagem dos agregados



Fonte: Autores (2024).

Figura 4 - Pesagem dos materiais e recipientes utilizados



Fonte: Autores (2024).

Figura 5 - Mistura dos materiais de composição do concreto



Fonte: Autores (2024).

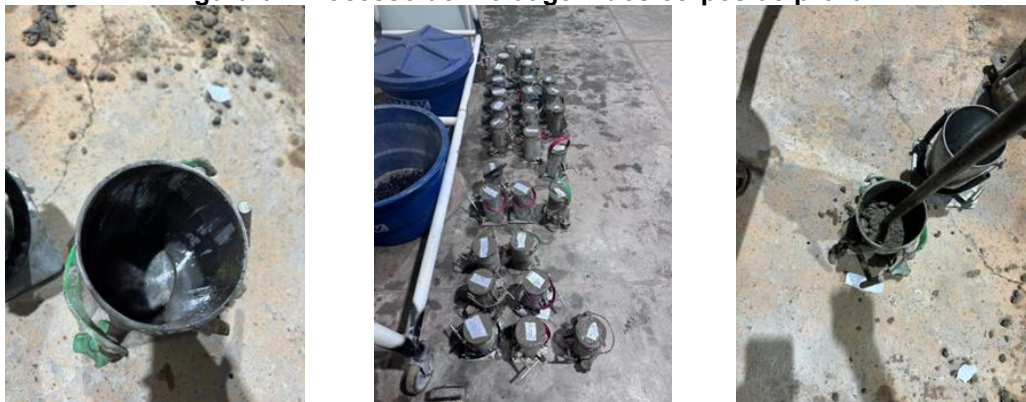
5.4 MOLDAGEM E CURA

O programa experimental foi preparado em quatro grupos distintos, cada um utilizando o cimento CP II-Z 32. Cada grupo consistiu em três subgrupos, representando diferentes períodos de análise: aos 7 dias, aos 14 dias e aos 28 dias. Cada subgrupo incluiu três corpos de prova sem aditivo e três corpos de prova destinados ao teste de imersão, totalizando 12 corpos de prova por grupo. Os corpos de prova foram moldados

na forma cilíndrica com dimensões padronizadas de 100 x 200 mm, seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Durante o processo de moldagem, os corpos de prova foram adensados manualmente, usando hastes metálicas para eliminar qualquer bolha de ar na mistura, conforme as diretrizes da norma mencionada. O limite de 12 golpes por camada, limitado a duas camadas, garantiu a uniformidade da distribuição do concreto e a compactação adequada da amostra (Figura 6).

Figura 6 - Processo de moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autores (2024).

Após 24 horas do processo de moldagem e secagem, os corpos de prova foram devidamente identificados com nome, quantidade de aditivo e data de moldagem. Em seguida, foram transportados para o local de desforma, conforme as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Posteriormente, os corpos de prova foram desenformados e armazenados em uma câmara úmida a uma temperatura controlada de 28,1°C, aguardando o período de rompimento, conforme os requisitos padrão para testes de resistência, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Armazenamento na câmara úmida



Fonte: Autores (2024).

5.5 ENSAIOS REALIZADOS

Objetivando avaliar o desempenho dos corpos de prova (CPs) em relação à sua permeabilidade à entrada de água, com o uso de aditivo, foi necessário determinar a capacidade do concreto de suportar cargas, além de avaliar sua durabilidade e resistência

à penetração de umidade. Para isso, foram realizados dois ensaios para avaliar as propriedades do concreto, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Ensaios realizados nesta pesquisa

Tipo de Ensaio	Ensaios realizados	Objetivo	Norma de referência
Mecânico	Resistência à compressão	Avaliar a capacidade do concreto de suportar cargas de compressão	NBR 5739 (ABNT 2018)
	Absorção de água por imersão	Avaliar a capacidade do concreto de resistir à penetração de umidade.	NBR 9778 (ABNT 2005)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Em relação ao ensaio mecânico, foi realizada a resistência à compressão, que tem como objetivo avaliar a capacidade do concreto de suportar cargas de compressão, seguindo a norma de referência NBR 5739 (ABNT 2018). No âmbito da absorção de água, foi realizado o ensaio de absorção de água por imersão, cujo objetivo é avaliar a capacidade do concreto de resistir à penetração de umidade, conforme a norma NBR 9778 (ABNT 2005). Esses ensaios foram conduzidos para garantir que o concreto tivesse a capacidade necessária de suportar cargas compressivas e resistir à penetração de umidade, aspectos essenciais para a integridade estrutural e a durabilidade do concreto. As normas de referência fornecem diretrizes claras e padronizadas para a realização dos ensaios, garantindo a confiabilidade e a validade dos resultados.

5.5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão do concreto é fundamental para a estabilidade e segurança das estruturas. Ao realizar o ensaio de resistência à compressão, verifica-se se o concreto está de acordo com as especificações do projeto, identificando quaisquer diferenças na qualidade do material utilizado. Durante o ensaio, foi possível acompanhar a curva de desempenho do concreto sob esforço mecânico, permitindo registrar a resistência característica do material à compressão (f_{ck}), proporcionando uma compreensão de seu comportamento estrutural ao longo do tempo. Para garantir a planicidade, as superfícies superior e inferior dos corpos de prova foram retificadas com o auxílio de um material metálico, após foram submetidos aos testes de ruptura (Figura 8), respeitando os tempos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 8 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autores (2024).

5.5.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A NBR 9778 (ABNT, 2005) descreve a absorção de água por imersão como o “fenômeno em que a água entra e ocupa os vazios de uma substância sólida porosa”. Compreender esse processo é necessário para avaliar a durabilidade do concreto, pois a intrusão de água pode diminuir muito a vida útil das construções de concreto.

Figura 11 - Determinação de massa seca



Fonte: Autores (2024).

Os corpos de prova passaram por um processo de cura úmida ao longo de 28 dias na câmara úmida. Após os 28 dias de cura, procedeu-se à secagem das amostras para a determinação de sua massa na condição seca, m_s e para isso, foram colocadas em uma estufa e mantidas à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas (Figura 11). Posteriormente, foram imersos em água por um período de mais 72 horas e obtida sua massa saturada, utilizando-se de uma balança hidrostática (m_{sat}) (Figura 12). As amostras então foram retiradas da água e enxugadas com um pano úmido, garantindo o registro da massa úmida (m_i).

Figura 12 - Corpos de prova submersos em água



Fonte: Autores (2024).

Utilizando a metodologia de cálculo prescrita pela NBR 9778 (ABNT, 2005), seguem as expressões para obtenção da absorção (A), do índice de vazios (I_v), da massa específica da amostra seca (ρ_s), da massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e da massa específica real (ρ_r), dadas, respectivamente, pelas expressões 1 a 5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (1)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (5)$$

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O objetivo do ensaio foi verificar se as diferentes porcentagens do aditivo redutor de permeabilidade tiveram um efeito direto na amostra, podendo alterar sua resistência. Após serem submetidos aos esforços de compressão demonstrados na figura 8, os resultados foram apurados e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios à compressão

(continua)

Quantidade de Aditivo	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão média de ruptura (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0%	7	1	13,9	15,0	1,06
		2	15,2		
		3	16,0		
	14	1	15,8	16,6	0,86
		2	16,4		
		3	17,5		
	28	1	21,1	22,7	1,42
		2	23,2		
		3	23,8		
1%	7	1	11,6	11,9	0,31
		2	12,0		
		3	12,2		
	14	1	16,0	17,1	1,15
		2	17,1		
		3	18,3		
	28	1	17,4	18,4	1,00
		2	18,4		
		3	19,4		
1,50%	7	1	11,1	12,1	1,25
		2	11,7		
		3	13,5		
	14	1	18,2	18,9	0,61
		2	19,2		
		3	19,3		

Tabela 3 - Resultados dos ensaios à compressão

(conclusão)

Quantidade de Aditivo	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão média de ruptura (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1,50%	28	1	20,3	21,7	1,23
		2	22,2		
		3	22,6		
2%	7	1	9,2	9,8	0,95
		2	9,3		
		3	10,9		
	14	1	16,4	17,5	1,10
		2	17,4		
		3	18,6		
	28	1	18,9	20,0	0,96
		2	20,4		
		3	20,7		

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados em corpos de prova de concreto com diferentes porcentagens de aditivo redutor de permeabilidade (0%, 1%, 1,5% e 2%) ao longo de períodos de 7, 14 e 28 dias. A tabela fornece a tensão de ruptura dos corpos de prova, a tensão média de ruptura e o desvio padrão.

Considerando os corpos de prova sem aditivo, a tensão média de ruptura aumenta de 15,0 MPa, aos 7 dias, para 22,7 MPa, aos 28 dias. O desvio padrão é relativamente baixo, variando de 1,06 MPa, aos 7 dias, 0,86 MPa, aos 14 dias e 1,42 MPa, aos 28 dias. Estes valores indicam que o concreto sem aditivo apresenta uma resistência crescente com o tempo e uma consistência razoável nos resultados.

Já para os corpos de prova com 1% de aditivo, a tensão média de ruptura aos 7 dias é de 11,9 MPa, chegando a 18,4 MPa, aos 28 dias. Os desvios padrão foram menores em comparação aos valores obtidos pelo traço de referência, indicando uma melhor consistência nos resultados.

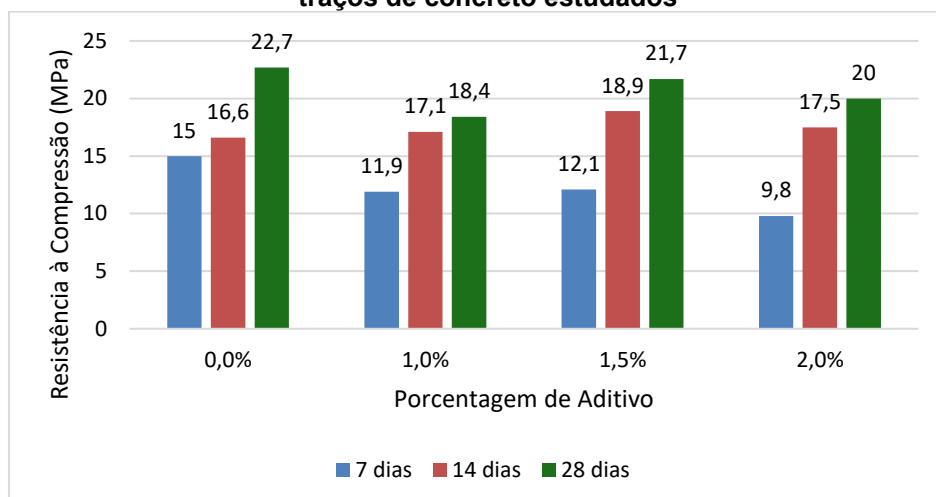
No caso dos corpos de prova com 1,5% de aditivo, a tensão média de ruptura é de 12,1 MPa aos 7 dias, aumentando para 21,7 MPa aos 28 dias.

Considerando os corpos de prova com 2% de aditivo, a tensão média de ruptura é a menor aos 7 dias (9,8 MPa), mas aumenta aos 14 e 28 dias, alcançando 20,0 MPa aos 28 dias. O desvio padrão também foi baixo, com 0,95 MPa, aos 7 dias, 1,10 MPa, aos 14 dias e 0,96 MPa, aos 28 dias, indicando uma boa consistência nos resultados.

Para melhor compreensão dos resultados, construiu-se o gráfico da Figura 9, que apresenta os valores médios da tensão de ruptura à compressão dos corpos de prova de cada traço ensaiado.

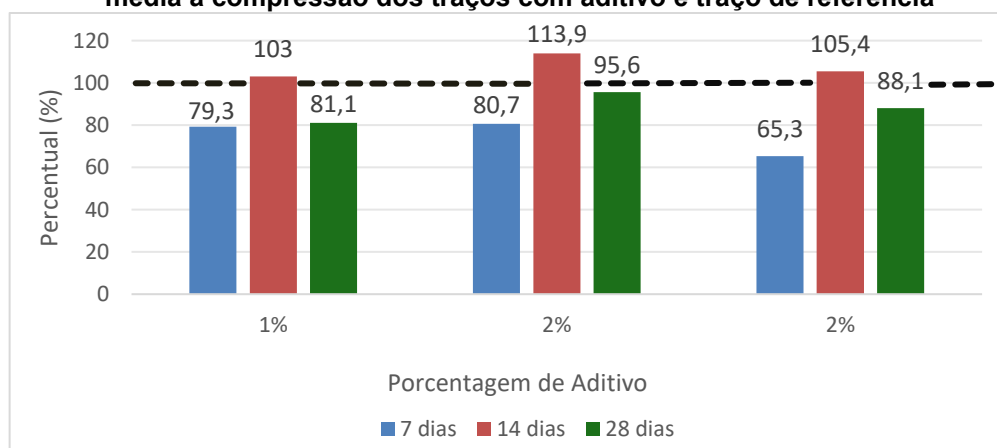
O gráfico da Figura 10 ilustra a comparação percentual entre os valores de resistência média à compressão dos traços de concreto com diferentes porcentagens de aditivo redutor de permeabilidade (1%, 1,5% e 2%) e o traço de referência (0% de aditivo) ao longo de períodos de 7, 14 e 28 dias. A análise dos dados apresentados revela as variações na resistência à compressão ao longo do tempo. No gráfico da Figura 10, os valores do traço de referência foram tomados como base, representados por uma linha constante tracejada que marca 100% para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Figura 9 - Gráfico da evolução da resistência média à compressão dos traços de concreto estudados



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Figura 10 - Comparação percentual entre os valores de resistência média à compressão dos traços com aditivo e traço de referência



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Aos 7 dias, a resistência dos traços com aditivo é menor em comparação ao traço de referência. O traço com 1% de aditivo apresenta um decréscimo de -20,7% da resistência do concreto sem aditivo, o traço com 1,5% de aditivo mostra -19,3%, enquanto o traço com 2% de aditivo possui uma baixa de -34,7% da resistência do traço de referência. Esses resultados indicam que na idade inicial de 7 dias, a adição de aditivo reduziu a resistência à compressão do concreto.

Aos 14 dias, há uma recuperação na resistência à compressão dos traços com aditivo. O traço com 1% de aditivo supera a resistência do concreto sem aditivo, atingindo uma marca de +3% do valor do traço de referência. O traço com 1,5% de aditivo mostra um aumento ainda maior, com +13,9% da resistência do traço de referência, enquanto o traço com 2% de aditivo atinge +5,4%. Esses resultados sugerem que os aditivos começam a ter um efeito positivo na resistência à compressão com o passar do tempo.

Aos 28 dias, embora todos os traços com aditivo apresentem valores de resistência à compressão inferiores aos do traço de referência, a diferença é menor em relação aos 7 dias. O traço com 1% de aditivo possui uma baixa de -18,9% da resistência do concreto sem aditivo, o traço com 1,5% de aditivo alcança uma redução de -4,4%, e o traço com 2% de aditivo atinge -11,9%. Apesar da resistência inferior aos 28 dias, a

proximidade dos valores sugere que os aditivos não comprometem drasticamente a resistência do concreto a longo do tempo.

Os resultados apresentados na Tabela 3 e nas Figuras 9 e 10 demonstram que a adição de aditivos redutores de permeabilidade afetou a resistência à compressão do concreto ao longo do tempo. Observa-se que, inicialmente, aos 7 dias, a resistência à compressão dos corpos de prova com aditivo é inferior à dos corpos de prova sem aditivo. Aos 14 dias, há uma recuperação parcial da resistência, com as amostras contendo 1,5% e 2% de aditivo, apresentando resistências superiores às do concreto sem aditivo, enquanto a amostra com 1% de aditivo mostra uma resistência ligeiramente maior (3%) que a do traço de referência. No entanto, aos 28 dias, todas as porcentagens de aditivo resultaram em resistências à compressão menores que as do traço sem aditivo.

Aos 7 dias há uma diminuição da resistência inicial; mas é interessante notar que aos 14 e 28 dias, houve uma melhora parcial da resistência, sugerindo que o concreto pode ter compensado uma parte da perda inicial de resistência durante o processo de maturação. Por outro lado, os corpos de prova com 2% de aditivo demonstraram uma resistência menor do que os demais. Isso sugere que as propriedades podem estar sendo prejudicadas pelo aditivo em concentrações mais altas.

6.2 ENSAIO POR IMERSÃO

O ensaio de imersão para absorção de água além da determinação da porcentagem de absorção para cada proporção de mistura, também permite a avaliação do índice de vazios das amostras e a obtenção de características físicas, como: massa específica seca, saturada e real. A Tabela 4 apresenta os resultados da massa seca e saturada dos corpos de prova dos traços estudados.

Tabela 4 - Valores das massas dos corpos de prova

Traço	CP	m_s (kg)	m_i (kg)	m_{sat} (kg)
Referência (0%)	1	3,500	2,151	3,706
	2	3,491	2,153	3,722
	3	3,497	2,156	3,734
A (1%)	1	3,426	2,135	3,671
	2	3,481	2,151	3,702
	3	3,515	2,153	3,715
B (1,5%)	1	3,447	2,120	3,648
	2	3,488	2,149	3,701
	3	3,508	2,162	3,742
C (2%)	1	3,463	2,149	3,698
	2	3,485	2,160	3,730
	3	3,469	2,156	3,710

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Os dados obtidos mediante ao cálculo das expressões de 1 a 5, são utilizados para avaliar a porosidade e a permeabilidade do concreto, fatores que influenciam diretamente sua durabilidade e resistência a ambientes agressivos. Os resultados obtidos a partir da metodologia de cálculo estão registrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos com os ensaios de absorção de água por imersão

Traço	CP	A (%)	$A_{média}$ (%)	I_v (%)	$I_{v,médio}$ (%)	ρ_s (g/cm ³)	$\rho_{s,média}$ (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)	$\rho_{sat,média}$ (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)	$\rho_{r,média}$ (g/cm ³)
Referência (0%)	1	5,88	6,42	13,25	14,26	2,25	2,23	2,38	2,37	1,873	1,873
	2	6,62		14,72		2,22		2,37		1,870	
	3	6,77		14,82		2,21		2,36		1,875	
A (1%)	1	7,15	6,40	15,95	14,21	2,23	2,24	2,39	2,38	1,821	1,855
	2	6,35		14,15		2,24		2,38		1,863	
	3	5,69		12,54		2,25		2,38		1,882	
B (1,5%)	1	6,45	6,41	13,15	13,89	2,25	2,24	2,39	2,38	1,821	1,857
	2	6,10		13,72		2,25		2,38		1,865	
	3	6,67		14,81		2,22		2,36		1,885	
C (2%)	1	6,78	6,92	15,17	15,89	2,23	2,23	2,39	2,38	1,852	1,861
	2	7,03		17,00		2,22		2,37		1,872	
	3	6,95		15,51		2,23		2,39		1,860	

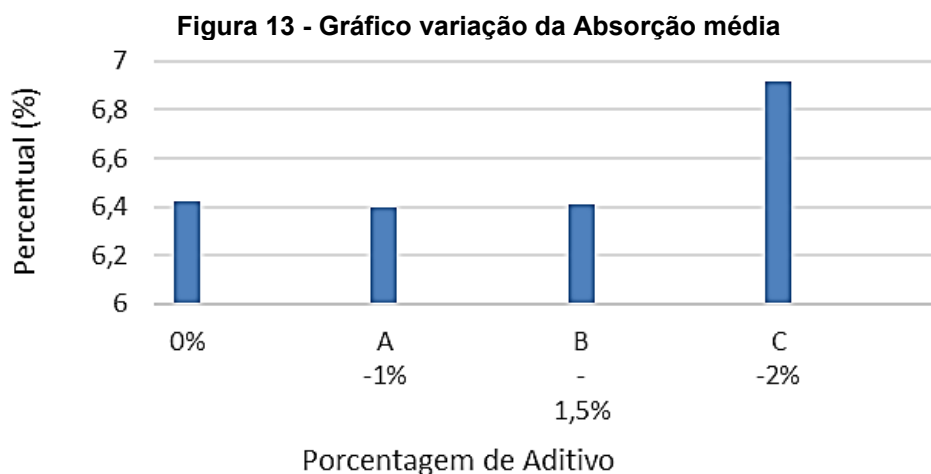
Fonte: Elaborada pelos Autores (2024).

A Tabela 5 fornece uma visão das variações na absorção de água por imersão de concretos com diferentes porcentagens de aditivo redutor de permeabilidade (ARP). Os dados revelam que, geralmente, o aumento da porcentagem de ARP não leva a uma diminuição consistente na absorção de água, indicando que a eficácia do aditivo pode ser influenciada por outros fatores da mistura de concreto.

A análise mostra que para os concretos com 0% de ARP, as porcentagens de absorção variam entre 5,88% e 6,77%, com uma média de 6,42%. Quando introduzido 1% de ARP, as absorções variam entre 5,69% e 7,15%, com uma média próxima da dos corpos de prova sem ARP (6,40%). Essa observação sugere que uma pequena quantidade de ARP não altera significativamente a capacidade de absorção de água do concreto.

A maior variação ocorre com 1,5% de ARP, onde a absorção média cai ligeiramente para 6,41%. As medidas individuais para essa configuração variam de 6,10% a 6,67%, indicando uma tendência de diminuição na absorção, mas não tão significativa quanto poderia ser esperada com uma dosagem maior de ARP.

Os concretos com 2% de ARP mostram uma tendência de absorção média mais alta (6,92%), com valores que oscilam entre 6,78% e 7,03%. Esse aumento pode ser atribuído a variações na composição ou no processo de cura, que podem não ter sido completamente controlados durante a experimentação.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A variação na absorção de água (Figura 13) entre as diferentes porcentagens de ARP indica que a eficiência do aditivo em reduzir a permeabilidade do concreto pode não ser linear e depende da dosagem, da qualidade da mistura e das condições de cura. Além disso, os resultados apontam para a complexidade na formulação de concretos com ARPs, onde a simples adição de mais aditivo não necessariamente resulta em melhor desempenho contra a absorção de água. Portanto, estes dados são fundamentais para compreender a porosidade e a permeabilidade do concreto, aspectos que impactam diretamente sua durabilidade e capacidade de resistir a ambientes adversos. Indicam que a escolha e a dosagem dos aditivos redutores de permeabilidade (ARPs) devem ser rigorosamente avaliadas durante o desenvolvimento das misturas de concreto, visando maximizar tanto a durabilidade quanto a resistência mecânica.

7 CONCLUSÕES

No decorrer deste estudo, investigou-se a influência dos aditivos redutores de permeabilidade sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, com foco particular na sua resistência à compressão e na absorção de água. Os dados das análises fornecem informações que questionam algumas premissas convencionais sobre a eficácia desses aditivos, especialmente no que diz respeito à sua capacidade de aprimorar a resistência e a durabilidade do concreto em diferentes condições.

Os resultados demonstraram que a adição de aditivos redutores de permeabilidade não garante um aumento na resistência à compressão. Observou-se que enquanto alguns traços com aditivos mostraram uma leve melhoria na resistência à compressão em estágios iniciais, a longo prazo, a resistência de traços com maior concentração de aditivos tendeu a ser inferior à dos traços de referência. Este resultado sugere que a incorporação de aditivos pode influenciar adversamente a hidratação do cimento e outras reações químicas que ocorrem durante o processo de cura do concreto.

Quanto à absorção de água, os resultados não apontam uma redução significativa na absorção nos traços contendo aditivos. Este comportamento aponta para uma possível saturação do efeito dos aditivos ou para a influência de outros fatores, como a variação na granulometria dos agregados, que podem ter contribuído para os resultados variáveis. Além disso, os dados sugerem que a eficácia dos aditivos em reduzir a permeabilidade pode ser limitada e dependente das condições específicas de cada mistura e do ambiente de cura.

Em suma, o presente estudo sublinha a necessidade de uma avaliação cuidadosa ao incorporar aditivos redutores de permeabilidade no concreto, sugerindo que tais adições devem ser feitas com base em uma compreensão detalhada das reações químicas envolvidas e das propriedades físicas do concreto. Futuras investigações devem focar em otimizar as formulações de concreto com aditivos e em desenvolver métodos de teste que reflitam mais precisamente o comportamento a longo prazo do concreto em condições de campo.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, Duff A.; WALKER, Stanton. Quantities of Materials for Concrete. 9. ed. Chicago: Structural Materials Research Laboratory, 1921.

APAY, Ahmet Celal et al. Investigation and modelling the effects of water proofing and water repellent admixtures dosage on the permeability and compressive strengths of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 698-711, 2016.

ARAÚJO, Frank Albert Soares *et al.* **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização**. Contecc, 2020.

ARY, Catarina Accioly. **Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Controle de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido– Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. Oficina de Textos, 2016.

BENTUR, A., Diamond, S., & Berke, N. S. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice**. **CRC Press**, 2006.

CARVALHO, Leonardo Lima Costa; MOTTA, Carla Araújo. Uso de Fibras de Aço para Execução do Concreto Armado. **Boletim do Gerenciamento**, v. 8, n. 8, p. 65-74, 2019.

CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo; HELENE, Paulo. **Concreto de ultra alto desempenho**. São Paulo: Leud, 2022. 23 p.

FERRARA, Liberato; KRELANI, Visar; MORETTI, Fabio. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. **Smart materials and structures**, v. 25, n. 8, p. 084002, 2016.

FERREIRA, Prof. M.Sc. Ricardo. **Lei de Abrams**: resistência do concreto é função da relação a/c.. [S. L.]: Dario Dafico, 2016. 21 slides, color.

FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS. Fercal Sobradinho: Ciplan, 2023. 2 p.

GRUBBA, David. **Materiais de construção: Para gostar e aprender**. Editora Blucher, 2023.

HELENE, P.; Terzian, Pini. P. **Manual de dosagem e controle do concreto**, 1992.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill Education, 2014.

MUHAMMAD, Nasiru Zakari et al. Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 80-90, 2015.

NEVILLE, Adam. **Propriedades do concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

OLIVIERA, Carla Dabian de. **Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle. **Curso básico de concreto armado**. Oficina de Textos, 2015.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil. **Trabalho Final de Graduação. UFRJ, Rio de Janeiro**, v. 9, 2016.

RODRIGUEZ, Rosangela Nayireth. **Study of the performance of waterproofing additives capable of promoting self-healing in concrete**. 2021. Tese de Doutorado. Politecnico di Torino.

ROIG-FLORES, Marta et al. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447-457, 2016.

SAINT GOBAIN (São Paulo). **BOLETIM TÉCNICO tecplus 1 quartzolit**. São Paulo: Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e Para Construção Ltda., 2023. 4 p.

SILVA, Fabiana Maria da et al. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, p. e11778, 2017.

SILVA, Valdeir Tavares da Silva. **Estudo da substituição da areia natural por pó de pedra na produção de concreto convencional**. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2018.

SISOMPHON, Kritsada.; COPUROGLU, Oguzhan.; KOENDERS, Eduardus. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 566-574, 2012.

SOUZA, Rui Barbosa et al. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, 2017.

TAFAREL, Nathann Francisco et al. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 974-986, 2016.

TEIXEIRA, Regiane Farias; ANDRADE, Paulo César; BONIFÁCIO, Elton Diêgo. Análise estatística da resistência a compressão do concreto. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 13, n. 1, p. 635-643, 2015.

VILLAR, M. V.; MARTÍN, P. L.; ROMERO, F. J.; RODRIGO, V. Gutiérrez-; BARCALA, J. M.. **Gas and Water Permeability of Concrete**. Madrid: Ciemat - Centro de Investigaciones, Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2012. 58 p.