

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO QUÍMICO REDUTOR DE PERMEABILIDADE NO CONCRETO

Ana Vitória Lima Santana

Bacharela em Engenharia Civil (ana_vitoria-2000@hotmail.com)

Gabriel Luiz Fernandes

Bacharel em Engenharia Civil (gabrieluiz2296@gmail.com)

Marcelo de Sousa Sepulveda

Bacharel em Engenharia Civil (gabrieluiz2296@gmail.com)

Eduardo Martins Toledo

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (eduardo.toledo@ueg.br)

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

Este trabalho visa avaliar a eficácia de aditivos redutores de permeabilidade a fim de melhorar a resistência e a durabilidade do concreto em condições ambientais adversas. O estudo, analisa se há melhorias significativas nas propriedades do concreto, especialmente na resistência à penetração de água e a agentes agressivos, com o intuito de prolongar sua vida útil e durabilidade em aplicações estruturais e ambientais. Para isso, foram estudados dois traços: um sem aditivo e outro com aditivo redutor de permeabilidade. As amostras foram moldadas e submetidas a ensaios de resistência à compressão e absorção de água após a cura. Os resultados, mostram que o aditivo influencia negativamente a resistência à compressão inicial. No teste de absorção de água, o concreto com aditivo apresentou menor permeabilidade, trazendo ganhos significativos para vida útil da estrutura. Esses resultados evidenciam que o aditivo redutor de permeabilidade é eficaz em melhorar a durabilidade do concreto, contribuindo para a longevidade e a menor necessidade de manutenção. Entretanto, sua aplicação deve ser cuidadosamente avaliada caso a resistência à compressão seja crítica, como em pilares e vigas principais. Pesquisas futuras podem explorar alternativas para otimizar o equilíbrio entre impermeabilidade e resistência, investigando combinações de aditivos ou alterações na dosagem do concreto.

PALAVRAS-CHAVE: concreto; aditivos redutores de permeabilidade; durabilidade do concreto; resistência.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, destacando-se por sua facilidade de aplicação. Estima-se que, anualmente, o consumo global de concreto atinja aproximadamente 11 bilhões de toneladas. De acordo com a *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP)*, isso representa uma média de cerca de 1,9 toneladas por habitante por ano, o que o coloca em segundo lugar em termos de consumo, atrás apenas da água. No contexto brasileiro, a produção de concreto nas centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos anualmente, o que equivale a cerca de 72 milhões de toneladas (Leite; Girardi; Hastenpf Lug, 2018).

Conhecido por unir a boa resistência à compressão do concreto com a boa resistência à tração do aço, a técnica do concreto armado traz como resultado um material econômico e versátil, uma vez que pode assumir diferentes formas, sendo, por isso, um dos materiais mais consumidos na construção civil (Ary, 2019). Embora seja amplamente utilizado, criar uma estrutura de concreto completamente impermeável continua sendo um desafio.

O princípio fundamental, no entanto, permanece inalterado. É imperativo, por um lado, conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente, e, por outro, entender as características do concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo assim uma correlação entre a agressividade do meio e a durabilidade da estrutura de concreto (Helene, 1983).

A resistência da estrutura de concreto à ação do ambiente e ao uso dependerá, portanto, da resistência do próprio concreto, da armadura e da integridade estrutural como um todo. A deterioração de qualquer um desses elementos comprometerá a estabilidade e a funcionalidade da estrutura (Medeiros; Andrade; Helene, 2011)

Durante a hidratação da pasta de cimento, é formada uma estrutura composta por diversos poros que facilitam o transporte de água, gases e outras substâncias corrosivas para a parte interna do material. Esses poros podem ser classificados em grandes ou macroporos, poros capilares, mesoporos e microporos. Quanto menor a permeabilidade do concreto, maior será sua durabilidade, pois estruturas permeáveis estão sujeitas à degradação prematura, fissuras, corrosão das armaduras e perda de resistência (Giammusso, 1992).

O concreto impermeável é obtido por meio da redução do volume de poros capilares e da desconexão entre eles, segmentando e interrompendo sua continuidade. Essas características são alcançadas por meio da correta determinação da relação água/cimento (a/c), escolha do tipo e finura do cimento e a adequada distribuição granulométrica dos agregados. No entanto, pesquisadores vêm desenvolvendo aditivos que possam garantir essa estanqueidade. Um concreto denso e compacto, com uma rede capilar segmentada de diâmetro mínimo, não assegura a impermeabilidade do sistema. É necessário que incluam aditivos para promover alterações químicas na hidratação do cimento, a incorporação de ar em proporções e diâmetros adequados, além do foco no aumento da resistividade elétrica do produto final.

De acordo com a norma regulamentadora ACI 212.3R-10, os aditivos redutores de permeabilidade do concreto são divididos em duas categorias principais. A primeira, sob condições hidrostáticas, promove a impermeabilização por meio da cristalização dos poros e capilares do concreto. A segunda, sob condições não hidrostáticas, atua fechando os poros para impedir a passagem superficial da água. Estes aditivos são amplamente utilizados na construção civil para aumentar a estanqueidade e durabilidade do concreto, reduzindo a infiltração de água em sua estrutura (Ary, 2019). Os ARPs (aditivos redutores de permeabilidade) são materiais hidrofílicos que os tornam reativos em contato com a

água. Essas reações resultam na formação de depósitos insolúveis, que podem obstruir poros e fissura.

Este trabalho tem como objetivo explorar a influência dos aditivos redutores de permeabilidade (ARPs) no concreto, estudando como esses aditivos afetam a capacidade do concreto de resistir à penetração de agentes agressivos. Além disso, serão discutidos os desafios enfrentados na aplicação desses aditivos em diferentes contextos e sob diversas condições. A busca por soluções para melhorar a qualidade do concreto e prolongar sua vida útil é fundamental para o desenvolvimento de concretos mais duráveis e resistentes, promovendo a sustentabilidade e a segurança das estruturas construídas.

2 DURABILIDADE DO CONCRETO

O concreto é uma substância de construção composta por cimento, agregado fino, agregado grosso, água e, às vezes, aditivos químicos e adições. Mehta e Monteiro (2008) destacam que o concreto é altamente valorizado por engenheiros estruturais devido à sua robustez. Contudo, é crucial considerar a durabilidade do material, mesmo quando aplicado com rigorosos padrões de qualidade, incluindo dosagem adequada, técnicas de lançamento e processos de cura. Embora geralmente seja durável em diversos ambientes, as instâncias de deterioração precoce do concreto podem oferecer lições valiosas para os gestores das estruturas.

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida pela sua capacidade de suportar condições adversas, como intempéries, ataques químicos, abrasão e outros fatores degradantes, preservando sua integridade estrutural e funcionalidade para o ambiente específico ao qual foi destinado. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2024), a durabilidade é definida como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas, as quais devem ser previamente definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, desde o início da elaboração do projeto. Já o item 6.1 da mesma norma prescreve que "as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil".

Para aumentar a produtividade, reduzir custos e atender às demandas de reconstrução pós-guerra, os projetistas reduziram as seções das peças estruturais, aumentando a esbeltez das estruturas e diminuindo o cobrimento das armaduras, o que resultou em tensões de trabalho mais elevadas. Essas alterações tiveram um impacto negativo nas construções, afetando diretamente a durabilidade das estruturas de concreto armado, aumentando a propensão à fissuração e reduzindo a proteção das armaduras.

A partir da segunda metade do século XX, os danos causados às construções pela deterioração das estruturas de concreto armado tornaram-se significativos, acarretando altos custos de reparo. Diante desse cenário, surgiram os primeiros estudos para identificar os principais agentes de deterioração e foram incluídos parâmetros de projeto relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado em normas.

Diversos estudos têm evidenciado a relevância econômica de levar em conta a durabilidade, conforme indicado por pesquisas que destacam os consideráveis custos associados à manutenção e reparo de estruturas em nações desenvolvidas (Ueda; Takewaka, 2007), conforme ilustrado na Tabela 1, que apresenta uma análise comparativa dos investimentos em construção civil, distinguindo entre gastos em novas estruturas e trabalhos de manutenção e reparo em diferentes países, incluindo Japão, Coreia, França, Alemanha, Itália e Reino Unido. A proporção significativa de recursos alocados para manutenção e reparos, particularmente notável na Itália e no Reino Unido, onde os gastos

com manutenção superam ou se equiparam aos de novas construções, sugere uma atenção crescente à durabilidade das estruturas. Esta tendência pode indicar desafios relacionados à longevidade das construções existentes, que podem ser atribuídos a técnicas de construção anteriores ou a condições ambientais adversas que aceleram a deterioração. Os dados evidenciam a importância econômica de considerar a durabilidade na construção civil. Eles sugerem que um planejamento cuidadoso é necessário para equilibrar os investimentos entre novas construções e manutenção. Além disso, os altos gastos em manutenção reforçam a necessidade de investimentos em materiais e técnicas construtivas que prolonguem a vida útil das estruturas.

Tabela 1 - Investimentos em construção civil

País	Novas estruturas	Trabalhos de manutenção e reparo	Total de gastos com a construção civil
Japão	52,5 trilhões de tenes (83%)	10,7 trilhões de tenes (17%)	63,2 trilhões de tenes (100%)
Coréia	116,8 trilhões de wones (85%)	21,1 trilhões de wones (15%)	137,9 trilhões de wones (100%)
França	85,6 bilhões de euros (52%)	79,6 bilhões de euros (48%)	165,2 bilhões de euros (100%)
Alemanha	99,7 bilhões de euros (50%)	99 bilhões de euros (50%)	198,7 bilhões de euros (100%)
Itália	58,6 bilhões de euros (43%)	76,8 bilhões de euros (57%)	135,4 bilhões de euros (100%)
Reino Unido	60,7 bilhões de libras (50%)	61,2 bilhões de libras (50%)	121,9 bilhões de libras (100%)

Fonte: Ueda; Takewaka (2007).

Em sua maioria, os problemas de deterioração em estruturas ocorrem no concreto devido a sua pouca resistência à tração. Quando submetido a esse tipo de tensão, o material desenvolve fissuras, que servem como vias preferenciais para a entrada de agentes agressivos e umidade, aumentando consideravelmente sua permeabilidade (Silva, 2007).

Diferentes ambientes podem acelerar a degradação do concreto, afetando tanto a funcionalidade quanto a estabilidade estrutural. Lima (2011), aponta que a análise da durabilidade de estruturas de concreto abrange vários fatores, incluindo os componentes usados na construção (como agregados, cimento e aço), as proporções na mistura de concreto (tal como a relação água/cimento e o uso de aditivos), bem como as práticas construtivas adotadas, incluindo as condições de cura. É fundamental considerar o ambiente específico onde a estrutura está situada para avaliar adequadamente seu comportamento, visto que condições adversas podem diminuir consideravelmente a durabilidade do concreto, mesmo que este tenha sido especificado e aplicado corretamente.

As principais causas que levam ao enfraquecimento do concreto podem ser agrupadas em categorias, como mecânicas, físicas, químicas, biológicas e eletromagnéticas, dependendo de suas características. No Quadro 1, são apresentados os principais agentes de deterioração, acompanhados dos processos que influenciam a qualidade do concreto e os resultados resultantes da deterioração. Este quadro, adaptado das obras de Ferreira (2000) e Neville (2016), fornece uma visão sobre as diversas causas de deterioração, facilitando a compreensão dos riscos associados a cada tipo de exposição ambiental ou operacional que o concreto enfrenta ao longo de sua vida útil.

Frequentemente, a deterioração do concreto é o resultado da interação entre múltiplos fatores, tanto internos quanto externos. Esses processos de degradação são complexos e são influenciados pelas características físico-químicas do concreto, bem como pela sua interação com o ambiente. Tais processos comprometem a funcionalidade do material, e muitas vezes não são imediatamente perceptíveis a olho nu. Fissuras,

descolamentos e desintegrações são alguns dos sinais mais comuns que podem surgir sozinhos ou em combinação, indicando problemas na estrutura do concreto.

Quadro 1 – Principais processos que causam a deterioração do concreto

Ações / Natureza	Fator	Causas / Fonte de dano	Deterioração
Mecânicas	Externo	Impacto / Fadiga	Deflexão / Fissuração / Ruptura
		Abrasão	Desgaste superficial
		Erosão	Desgaste superficial
		Cavitação	Formação de Cavidades
		Qualidade do adensamento	Porosidade
Químicas	Interno	Alcali / sílica	Expansão / Fissuração
		Álcali / carbonato	Expansão / Desagregação
		Ataque por cloretos	Despassivação do aço
		Ataque por sulfatos	Desagregação do concreto
		Ataque por dióxido de carbono	Carbonatação / corrosão
		Micro-organismo / bactérias	Lixiviação
Físicas	Externo	Variação de temperatura	Fissuração
		Diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos materiais	
	Interno	Ciclo gelo / degelo	

Fonte: Adaptado de Ferreira (2000) e Neville (2016).

Giammusso (1992), é enfatizado a importância da água e sua interação com o cimento, destacando a relação água/cimento (fator a/c) como um aspecto fundamental. Uma menor proporção de água em relação ao cimento reduz a porosidade da pasta, o que, por sua vez, aumenta sua resistência. Além disso, durante o processo de endurecimento do concreto, a água é um componente que afeta diretamente a resistência do material, bem como sua retração, permeabilidade e, conseqüentemente, a carbonatação e a durabilidade da pasta.

O Quadro 2, estabelece uma relação entre a classe de agressividade ambiental e as exigências de qualidade do concreto, especificamente a relação água/cimento necessária para diferentes tipos de concreto, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2024). Para concretos armados (CA) e concretos protendidos (CP), a tabela define limites máximos para a relação água/cimento que variam de acordo com a classe de agressividade, de I a IV. Por exemplo, concreto armado em ambiente de classe I deve ter uma relação água/cimento de até 0,65, enquanto em classe IV, o limite é de 0,45. Para concreto protendido, os valores são com um máximo de 0,60 em classe I e 0,45, em classe IV. Essas especificações indicam que quanto mais agressivo o ambiente, menor deve ser a relação água/cimento, refletindo uma necessidade de maior densidade e menor porosidade para aumentar a durabilidade do concreto em condições mais severas.

Quadro 2 - 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	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2022).
^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, 2024).

O cobrimento do concreto desempenha um papel fundamental na proteção da estrutura contra agentes agressivos, sendo sua importância ainda mais evidente quando se considera a classe de agressividade do ambiente em que a estrutura está inserida. A NBR 6118 (ABNT, 2024) especifica os valores mínimos do cobrimento de concreto para cada classe de agressividade ambiental, apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10mm$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal 15 mm.
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2024).

O Quadro 3 define o cobrimento mínimo necessário para lajes, vigas e pilares, ajustando-se à variabilidade das condições ambientais, que vão de I a IV. Por exemplo, em concreto armado, o cobrimento para lajes varia de 20 mm, em ambientes de classe I até 45 mm, em classe IV, aumentando conforme a agressividade do ambiente. Em contextos mais

agressivos, como áreas costeiras com alta salinidade, ambientes industriais com substâncias químicas corrosivas ou regiões com intensa poluição atmosférica, o cobrimento adequado é importante para impedir a penetração de agentes corrosivos que podem comprometer a integridade estrutural do concreto armado ao promover a corrosão das armaduras (ferro ou aço) presentes no interior. Essa barreira efetiva contra a corrosão das armaduras de aço é fundamental para prevenir danos estruturais e prolongar a vida útil da construção. Assim, entender a classe de agressividade do ambiente é essencial para o correto dimensionamento e especificação do concreto e das medidas de proteção, garantindo que a espessura do cobrimento seja projetada para oferecer a proteção necessária ao longo da vida útil da estrutura.

As discussões e análises apresentadas realçam a necessidade de considerar o ambiente específico ao qual o concreto está exposto. A implementação de práticas adequadas de mistura e aplicação, conforme discutido, não apenas melhora as propriedades físicas e químicas do concreto, mas também garante uma maior resistência contra agentes degradantes que podem comprometer a estrutura ao longo do tempo. Portanto, a escolha cuidadosa de aditivos, combinada com um entendimento das condições ambientais e das exigências estruturais, é fundamental para otimizar a durabilidade e a funcionalidade das construções em concreto, garantindo que estas permaneçam seguras e viáveis economicamente por toda a sua vida útil projetada.

3 ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE (ARP)

Amplamente empregado na construção civil, o concreto é um material que precisa se adaptar a diferentes exigências, dependendo de sua aplicação. Para atender a essas necessidades específicas, os aditivos são incorporados à mistura de concreto para melhorar suas características e desempenho em variados contextos. Esses aditivos não apenas aprimoram a trabalhabilidade e a resistência do concreto, mas também ajudam a controlar outras propriedades, como tempo de cura e permeabilidade, essenciais para a durabilidade e a funcionalidade das estruturas de concreto em longo prazo (Pinheiro, 2019).

Segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), aditivo é o produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido. A quantidade da porcentagem de 5% pode ser superior para algumas aplicações, como por exemplo, aditivos para concreto projetado ou aditivos compensadores de retração.

Os aditivos variam amplamente, incluindo tipos como plastificantes e superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega, entre outros. Eles são usados para ajustar as propriedades reológicas do concreto, melhorando sua trabalhabilidade, tempo de cura e desempenho geral, tanto em seu estado fresco quanto após o endurecimento.

O Quadro 4, apresenta as designações normalizadas dos aditivos especificados pela NBR 11768-1 (ABNT, 2019), onde categoriza uma variedade de aditivos usados na produção de concreto, detalhando suas funções específicas para melhorar diferentes propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido. Os aditivos são classificados principalmente com base em sua capacidade de reduzir a água, controlar o tempo de pega, modificar a viscosidade e influenciar a retração, entre outros efeitos.

Quadro 4 – Aditivos Especificados pela NBR 11768-1 (ABNT, 2019)

Aditivo	Característica
Redutor de Água Tipo 1 - RA1	aditivo que, sem modificar a consistência do concreto, permite reduzir o conteúdo de água; ou que, sem alterar a quantidade de
Redutor de Água Tipo 1 - RA1	água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez; ou, ainda, aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente
Redutor de Água Tipo 1 - RA1-R	aditivo que combina os efeitos de um aditivo redutor de água tipo 1 (função principal) e os efeitos de um aditivo retardador de pega (função secundária)
Redutor de Água Tipo 1 - RA1-A	aditivo que combina os efeitos de um aditivo redutor de água tipo 1 (função principal) e os efeitos de um aditivo acelerador de pega (função secundária)
Redutor de Água Tipo 2 - RA2	aditivo que, sem modificar a consistência, permite maior redução de água no concreto quando comparado ao redutor de água tipo 1 – RA1, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto; ou, ainda, aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente
Redutor de Água Tipo 2 – RA2-R	aditivo que combina os efeitos de um aditivo redutor de água tipo 2 (função principal) e os efeitos de um aditivo retardador de pega (função secundária)
Redutor de Água Tipo 2 – RA2-A	aditivo que combina os efeitos de um aditivo redutor de água tipo 2 (função principal) e os efeitos de um aditivo acelerador de pega (função secundária)
Controlador de Hidratação – CH	aditivo que controla a hidratação do cimento
Acelerador de Pega – AP	aditivo que promove a redução dos tempos de pega do concreto
Acelerador de Resistência – AR	aditivo que aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais do concreto, com ou sem modificação do início de pega
Acelerador de Pega para Concreto Projetado – APP	aditivo que altera imediatamente a reologia do concreto projetado, promovendo aderência ao substrato e, posteriormente, acelera a hidratação do cimento aumentando as resistências iniciais
Compensador de Retração – CR	aditivo que ao reagir com o cimento e água, produz etringita ou hidróxido de cálcio e outros, levando ao aumento de volume, que induz o concreto a expandir e compensar as forças de retração total
Redutor de Retração – RR	aditivo que possui como função principal a redução da retração autógena, atuando na diminuição da tensão superficial da água presente no concreto
Incorporador de Ar – IA	aditivo que incorpora intencionalmente, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de microbolhas de ar separadas entre si, uniformemente distribuídas, estáveis e que mantenham estas características no estado endurecido
Incorporador de Ar para Concreto Leve - IA-L	aditivo que incorpora intencionalmente, durante o amassamento do concreto, uma quantidade de microbolhas de ar, para produzir concretos com densidade abaixo de 2000 kg/m ³
Redutor de Corrosão - RC	aditivo que potencializa a diminuição da corrosão da armadura do concreto, por inibir a entrada de íons cloretos em seu interior
Modificador de Viscosidade Retentor de Água - MV-RT	aditivo que retém a água dentro do concreto diminuindo o efeito de exsudação
Modificador de Viscosidade Antisegregante - MV-AS	aditivo que reduz a segregação de concretos fluidos ou autoadensáveis e também permite desenvolver concretos submersos
Redutor de Absorção Capilar – RAC	aditivo que diminui a absorção capilar por efeito físico, quando a resistência à água sob pressão é limitada ou inexistente
Redutor de Permeabilidade - RP	aditivo que diminui a permeabilidade capilar, por efeito de cristalização, onde os compostos que bloqueiam os poros são suficientemente estáveis para resistir à água sob pressão
Aditivos para Concreto Vibroprensado - CVP	grupo de aditivos que facilitam o processo de vibroprensagem do concreto

Fonte: Adaptado da NBR 11768-1 (ABNT, 2019).

Os aditivos redutores de água são categorizados em dois tipos, RA1 e RA2, com variantes que adicionam funções de retardamento ou aceleração da pega, permitindo uma manipulação mais precisa das propriedades do concreto durante e após a aplicação. Aditivos como controladores de hidratação, aceleradores de pega e resistência, e incorporadores de ar ajustam desde a reação química do cimento até a introdução controlada de ar para melhorar a resistência ao congelamento e a leveza do concreto. Outros, como modificadores de viscosidade, redutores de absorção capilar, e redutores de permeabilidade, focam em aumentar a durabilidade e funcionalidade do concreto, reduzindo a segregação, a absorção de água e a permeabilidade, respectivamente. O Quadro 4 é uma ferramenta para selecionar o aditivo correto, visando atingir as especificações desejadas em diferentes projetos de construção, assegurando a durabilidade e eficácia das estruturas de concreto.

Segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), os aditivos Incorporador de Ar para Concreto Leve (IA-L), Redutor de Corrosão (RC), Modificador de Viscosidade Antisegregante (MV-AS), Redutor de Absorção Capilar (RAC), Redutor de Permeabilidade (RP) e Aditivos para Concreto Vibroprensado (CVP) devem atender aos requisitos gerais estabelecidos conforme descrito no Quadro 5.

Quadro 5 - Requisitos gerais para todos os aditivos

Propriedade	Método de ensaio	Requisitos
Homogeneidade ^a	Exame visual	Homogêneo no momento de sua utilização, não apresentando separação ou sedimentação ^b .
Cor ^a	Exame visual	Uniforme e similar à descrição informada pelo fabricante
Massa específica ^a (somente para líquidos)	ABNT NBR 11768-3	Valor declarado pelo fabricante com tolerância de $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
Teor de sólidos ^a	ABNT NBR 11768-3	Valor declarado pelo fabricante com tolerância de $\pm 2 \%$
pH ^a	ABNT NBR 11768-3	Valor declarado pelo fabricante com tolerância de ± 1
Cloretos solúveis em água (Cl^-) ^a	ABNT NBR 11768-3	Menor ou igual ao valor declarado pelo fabricante ^c .
^a O valor declarado pelo fabricante deve ser informado por escrito. As tolerâncias desta tabela se referem a valores absolutos. ^b Os critérios de armazenagem e agitação devem seguir a recomendação do fabricante. ^c Teor de cloretos menor ou igual a 0,15 %, em massa, corresponde a aditivo isento de íons cloretos. O uso de aditivos não isentos de cloretos deve ser avaliado pela massa total de cloretos solúveis no concreto, conforme a ABNT NBR 12655.		

Fonte: NBR 11768-1 (ABNT, 2019).

Em 2010, o Instituto Americano de Concreto divulgou o relatório sobre aditivos químicos para concreto, especificando, conforme o fabricante, os tipos de aditivos que funcionam através da cristalização no concreto (ACI 212.3R-10, 2010 *apud* Ary, 2019). Esses aditivos incluem:

- Hidrofóbicos ou repelentes de água: formam o maior grupo de aditivos. Compostos por materiais como sabões e derivados de ácidos graxos de cadeia longa, óleos vegetais (incluindo produtos à base de soja e sebos), e derivados

de petróleo (como óleo mineral, parafina, ceras e emulsões baseadas em asfalto). Esses materiais criam uma camada que repele a água nos poros do concreto, mas deixam os poros fisicamente abertos;

- b) Sólidos finamente divididos: compreendem materiais inertes e agentes de preenchimento quimicamente inativos (talco, bentonita, argila, resinas de hidrocarbonetos e carvão) além de agentes de preenchimento quimicamente ativos (cal, silicatos e sílica coloidal). Estes sólidos atuam como densificadores, aumentando a densidade do concreto e restringindo fisicamente a passagem de água pelos poros.
- c) Materiais cristalinos: estes produtos químicos ativos são hidrofílicos e aumentam a densidade do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ou formam depósitos cristalinos que bloqueiam os poros, impedindo a penetração de água.

Os aditivos cristalizantes são considerados uma categoria especial de aditivos redutores de permeabilidade, conhecidos academicamente como Permeability-Reducing Admixtures (PRAs). Conforme o Comitê ACI 212.3R-10 (2010 *apud* Araújo; Ribas, 2020), esses aditivos são divididos em duas classes: aditivos redutores de permeabilidade para condições não hidrostáticas (PRAN) e para pressões hidrostáticas (PRAH). Os PRAH são indicados para bloquear a entrada de água e selar fissuras, enquanto os PRAN são utilizados para retardar a entrada e passagem de água no concreto sob condições de pressão menos intensas, como as provocadas por ação capilar, tornando a superfície do concreto repelente à água.

3.1 ADITIVOS DE REDUÇÃO DE PERMEABILIDADE PARA CONDIÇÕES HIDROSTÁTICA

Segundo o ACI 212.3R-10 (2010 *apud* Ary, 2019), o aditivo redutor de permeabilidade sob condições hidrostáticas, a qual refere-se à pressão de um líquido em repouso, conhecido como aditivo de cristalização integral, tem como função primária formar uma estrutura cristalina insolúvel que preenche os poros e capilares do concreto, impedindo a penetração de água e outros agentes agressivos. Esses aditivos cristalizantes são essenciais para aumentar a durabilidade de materiais à base de cimento, especialmente em ambientes agressivos e são conhecidos por facilitar a autocicatrização das estruturas de concreto (Ferrara, Krelani, Carsana, 2014).

Os aditivos PRAH adicionados ao concreto conferem uma proteção contra a água sob pressão hidrostática, com sua eficácia dependendo da extensão da obstrução dos poros e da estabilidade dos depósitos cristalinos formados sob pressão (Moreira, 2016). Esses aditivos, de natureza hidrofílica, reagem com a água e os componentes do cimento para formar silicato de cálcio hidratado e/ou outros tipos de precipitados cristalinos que são integrados permanentemente à matriz do concreto, como descrito no ACI 212.3R-10 (2010).

Os cristalizantes se enquadram na categoria dos PRAH e diferem dos aditivos repelentes de água, que são hidrofóbicos e não reagem da mesma forma. A ação desses aditivos ocorre na presença de umidade, essencial para a cristalização, e este processo ainda é parcialmente compreendido na comunidade científica, com alguns estudos identificando os silicatos tricálcicos e o hidróxido de cálcio como reagentes. O consenso, no entanto, é que essas reações resultam em formações cristalinas que preenchem os poros e fissuras, aumentando a impermeabilidade do concreto (Araújo; Ribas, 2020).

Além de bloquear os poros, esses aditivos também selam fissuras quando ativados pela umidade, formando um silicato de cálcio hidratado modificado que pode precipitar a partir das moléculas de água e cálcio, melhorando as propriedades mecânicas do concreto sob diversas condições de exposição e mecanismos de autorreparo (Ferrara, Krelani, Carsana, 2014).

Takagi (2019), ressalta que a principal função desses aditivos é minimizar a penetração de águas agressivas e vedar pequenas fissuras, reduzindo o risco de reações prejudiciais, como a reação álcali-agregado, a ação de sulfatos, a carbonatação e a infiltração de cloretos, que dependem da presença de água para ocorrer. Flores *et al.* (2015) enfatizam que a água é essencial para a formação dos depósitos cristalinos que se tornam parte integrante do concreto, enquanto Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008) complementam que, na ausência de água, os cristais permanecem inativos, reativando-se ao entrar em contato com a água, garantindo assim a proteção contínua do concreto. A capacidade dos aditivos PRAH de resistir tanto à pressão positiva quanto negativa da água é fundamental para garantir a durabilidade e a integridade das estruturas em ambientes úmidos ou aquosos, oferecendo também proteção contra a deterioração química em ambientes agressivos (Araújo; Ribas, 2020).

3.2 ADITIVOS DE REDUÇÃO DE PERMEABILIDADE PARA CONDIÇÕES NÃO HIDROSTÁTICAS

Os aditivos redutores de permeabilidade para condições não hidrostáticas, a qual não está submetido a pressão de um líquido em repouso, também conhecidos como PRANs (*Permeability-Reducing Admixtures for Non-Hydrostatic conditions*), desempenham um papel importante na proteção de estruturas de concreto armado contra o ataque de agentes agressivos e na prevenção da penetração de líquidos e vapores. Esses aditivos, conforme esclarece a ACI 212.3R-10 operam ao preencher os vazios dos materiais e ao revestir internamente os poros, tornando o concreto menos permeável à água e mais resistente à umidade.

Segundo Moreira (2016), as misturas hidrofugantes no concreto alteram a superfície deste para torná-lo repelente à água. Medeiros, Gomes e Helene (2006) observam que os hidrofugantes podem penetrar mais de 10 mm no substrato, transformando as forças capilares de sucção em repelência, o que efetivamente impede a absorção de água enquanto permite a passagem de vapor, facilitando a transpiração do concreto.

Os hidrofugantes disponíveis comercialmente incluem silanos, siloxanos oligoméricos, siloxanos poliméricos e resinas de silicone, que são distinguíveis por suas propriedades de tamanho molecular, reatividade e solubilidade, conforme explicado por Medeiros, Gomes e Helene (2006). Esses compostos são absorvidos pelos poros do concreto, formando uma camada hidrofóbica que bloqueia a entrada de água líquida, mas permite a transmissão de vapor de água.

Além disso, os PRANs são eficazes não apenas em barrar a penetração de água, mas também de cloretos, sem alterar significativamente os tempos de pega e cura do concreto. Esses aditivos oferecem uma repelência permanente, boa durabilidade, fácil manuseio e outras vantagens significativas para as estruturas de concreto (Ary, 2019).

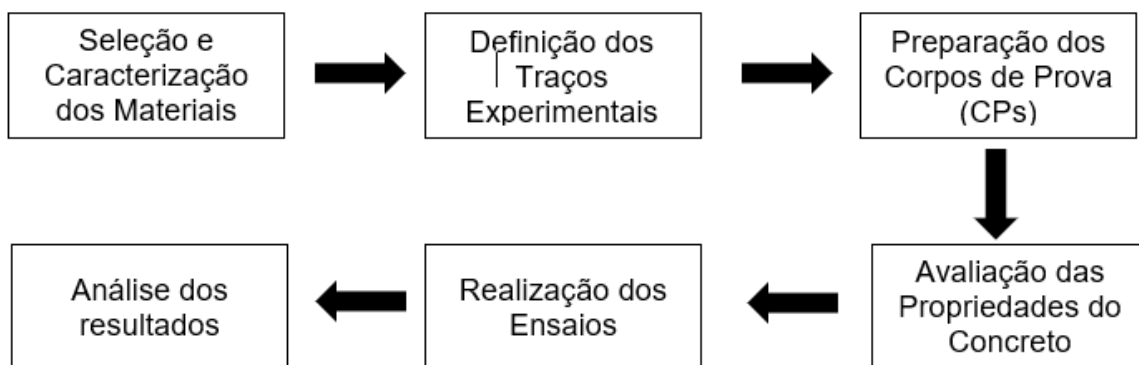
A proteção contra a corrosão das armaduras em concreto também depende da redução da difusão de umidade e oxigênio. Portanto, minimizar a absorção de água pelo concreto é um dos principais objetivos dos hidrofugantes, uma vez que a umidade reduzida contribui para diminuir a deterioração do concreto (Medeiros, Gomes e Helene, 2006).

No entanto, Ramachandran (1995) argumenta que os aditivos hidrofóbicos nem sempre conseguem revestir todos os poros uniformemente, especialmente aqueles de maior dimensão, o que pode limitar a eficácia dos aditivos em testes de permeabilidade a apenas alguns centímetros de pressão. Santana e Aleixo (2017), complementam essa perspectiva, notando que tais impermeabilizações não suportam movimentações estruturais e, em caso de trincas ou fissuras, os efeitos dos aditivos podem se tornar ineficazes.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção tem como objetivo descrever o procedimento experimental adotado na pesquisa. A priori, são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento dos corpos de prova (CPs), que foram elaborados de acordo com a NBR 5738/2015. Em seguida, há o detalhamento das propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, incluindo a avaliação da sua compressibilidade. Além disso, os métodos, equipamentos e as proporções dos materiais utilizados são descritos, de forma a possibilitar uma melhor análise dos resultados. Em última análise, os dados obtidos nos ensaios são apresentados, permitindo uma comparação entre os diferentes traços de concreto, com e sem a adição do aditivo redutor de permeabilidade. O desenvolvimento do programa experimental deste estudo é resumido e apresentado de forma esquemática na Figura 1.

Figura 1: Esquema do programa experimental desenvolvido na pesquisa



Fonte: Autores (2024).

A sequência das etapas apresentadas no fluxograma reflete a divisão do processo da pesquisa, permitindo a análise do comportamento dos aditivos redutores de permeabilidade (PRA) quando incorporados ao concreto, em relação às suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Diversos estudos experimentais têm sido conduzidos para avaliar a eficácia dos aditivos redutores de permeabilidade sob variadas condições e formulações de concreto. Tais pesquisas são essenciais para entender como diferentes composições de aditivos interagem com os componentes do concreto e quais são os efeitos dessas interações nas propriedades mecânicas e na durabilidade do material. Um estudo realizado pela Mirellen Mara Moreira em 2016 através da UNB – Universidade de Brasília foram utilizados 4 tipos de cimentos (CP-II, CP-III, CP-IV e CP-V) para observar o comportamento do ARP, sendo que, os maiores valores de absorção de água foram registrados nos traços ARPIV e ARPV.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados são classificados como brita 0, caracterizado por ser composto por fragmentos de rochas com diâmetro máximo de 9,5 mm e brita 1, cujas partículas possuem um diâmetro máximo de 4,75 mm.

4.1.2 Agregados miúdos

No programa experimental foram utilizados dois tipos de agregados miúdos: uma areia de cava quartzosa rosa e uma areia proveniente do britamento de rocha calcária. A

areia média apresentou módulo de finura 1,74, onde apresenta um bom equilíbrio entre trabalhabilidade, compactação e resistência.

A areia artificial, também chamada de areia manufaturada, é um tipo de agregado que é produzido a partir da britagem de pedras ou rochas.

4.1.3 Agloremente (cimento)

O CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial apresenta alta reatividade em idades precoces devido ao grau de moagem ao qual é submetido.

4.1.4 Aditivos

4.1.4.1 Aditivo superplastificante

Aditivo redutor de água tipo 2 – RA2 (superplastificante PCE de pega normal) de alto desempenho baseado na nova tecnologia de polímeros MC, principalmente indicado para promover altas resistências iniciais. As características são representadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Características aditivo plastificante MC-Powerflow 1172

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,07 kg/L	NBR 11768-3:2019
Dosagem recomendada	≥ 0,2% ≤ 2,0%	sobre o peso do cimento

Fonte: Ficha Técnica MC-Powerflow 1172 (2024)

4.1.4.2 Aditivo redutor de permeabilidade

Para o estudo proposto empregou-se o aditivo da empresa Quartzolit, Tecplus 1, utilizado para reduzir a permeabilidade do concreto e da argamassa, melhorando suas propriedades em relação à absorção de água. Ele age formando uma barreira que bloqueia a passagem de água no interior do concreto, aumentando a durabilidade da estrutura ao proteger contra processos de degradação relacionados à umidade e a agentes agressivos.

Quadro 7 – Informações sobre o aditivo

(continua)

Características	Detalhes
Tipo	Aditivo mineral inorgânico
Indicações	• Impermeabilização de concretos e argamassas utilizados em áreas sujeitas a umidade e pressão d'água;
Indicações	• Melhorar a trabalhabilidade e aumentar a coesão das argamassas; • Argamassas de revestimento (rebocos) e assentamento de alvenarias;
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.
Limites 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.

Quadro 7 – Informações sobre o aditivo

(conclusão)

Características	Detalhes
Limites de Uso	• 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.
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).

4.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Os ensaios foram realizados no laboratório do Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás, localizado no município de Anápolis/GO.

Foram produzidos dois tipos de traços de concreto: um concreto sem aditivo impermeabilizante e outro com a adição do produto X. Para o concreto com o aditivo redutor de permeabilidade foi adicionado a porcentagem máxima recomendada pelo fabricante, correspondente a 2% da massa de cimento utilizada no traço (0,216g).

A Tabela 2 e 3, apresentam os traços dos concretos sem aditivo (referência) e com aditivo, com a dosagem dos materiais essenciais para a mistura. Cada componente tem um papel específico na obtenção das propriedades desejadas do concreto, como resistência, trabalhabilidade e durabilidade.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de mistura utilizados para a preparação do concreto, especificando as relações entre os diferentes componentes da mistura.

O abatimento desejado no ensaio de tronco de cone foi estabelecido no intervalo de (210 ± 20) mm para todas as composições de concreto. Assim, a quantidade de aditivo superplastificante na mistura foi ajustada para que o abatimento ficasse dentro desse intervalo.

Os agregados (tanto os grãos quanto os miúdos) apresentam uma granulometria diversa, abrangendo desde fragmentos maiores de rocha até partículas de dimensões muito pequenas. Dessa forma, caracterização dos agregados utilizados na composição do concreto, aplicando o ensaio de granulometria conforme a norma ABNT NBR NM 248:2003 já haviam sido realizados.

**Tabela 2 - Traço sem aditivo
(referência)**

Material	Massa (KG)
Cimento (CP V ARI)	380
Areia natural	384
Areia artificial	415
Brita 0	205
Brita 1	818
Aditivo Plastificante	0,2
Água	170

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 3 – Traço com aditivo

Material	Massa (KG)
Cimento (CP V ARI)	380
Areia natural	384
Areia artificial	415
Brita 0	205
Brita 1	818
Aditivo Plastificante	0,2
Aditivo X	0,4
Água	170

Fonte: Autores, 2024

Tabela 4 – Parâmetro de mistura do concreto

Parâmetro de Mistura	Traço (m³)
Relação a/c	0,45
Relação agregado miúdo seco/cimento (a) em kg/Kg	2,10
Relação agregado graúdo seco/cimento (p) em kg/Kg	2,69
Relação agregados seco/cimento (m) em kg/Kg	4,79

Fonte: Autores, 2024

4.3 PROCESSO DE MISTURA

Foram moldados para os ensaios 15 corpos de prova com o concreto sem aditivo impermeabilizante e mais 15 corpos de prova com o aditivo redutor de permeabilidade (Tabela 5).

Tabela 5 – Quantidade de corpos de provas

Ensaio	CP's Moldados (sem aditivo)	CP's Moldados (com aditivo)
Compressão Axial	9	9
Capilaridade	3	3
Absorção de Água	3	3

Fonte: Autores, 2024

Durante a moldagem dos corpos de prova, foi realizado primeiramente o teste de abatimento do concreto, conhecido como *Slump test*, para verificar a consistência do concreto fresco por meio da medição de seu assentamento, conforme estabelecido pela NBR NM 67:1998, conforme ilustrado na Figura 2.

Aparelhagem utilizada no *Slump test*:

- Molde metálico;
- Complemento do molde (tronco-cônico);
- Haste de compactação de seção circular em aço (16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento);
- Placa metálica de apoio do molde;
- Colher de pedreiro;
- Trena de 2m.

Figura 2 – Teste de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autores, 2024.

Foi elaborado o concreto sem aditivo (referência) e com o aditivo. No ensaio do *Slump Test*, encontrou-se os valores mencionados na Tabela 6.

Tabela 6 – *Slump test*

Mistura	Tipo de Concreto	<i>Slump</i> (cm)
1	Sem aditivo	21
2	Com aditivo	23

Fonte: Autores, 2024.

A classe de consistência e o valor do *slump* obtido no ensaio foi de acordo com a norma NBR 5738:2015, utilizando o método de adensamento manual, onde a tabela 7 faz o detalhamento.

Tabela 7 - Teste de abatimento de tronco de cone (*Slump test*)

Classe	Abatimento (mm)	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	Manual
S220	$A \geq 220$	

Fonte: ABNT NBR 5738:2015, 2018

Seguindo as especificações supracitadas pela norma NBR 7538:2015 foram moldados os 22 corpos de provas com untamento, separação e montagem das peças conforme Figura 3, 4 e 5. Além disso, os corpos de provas foram armazenados no laboratório da Universidade onde esteve em local protegido de intempéries por 24 horas, foi realizado os desmolde e depositados em um tanque dentro da câmara fria mantendo as peças submersas.

Figura 3 – Untando molde do corpo de prova



Fonte: Autores, 2024.

Figura 4 – Concreto para corpo de prova



Fonte: Autores, 2024.

Figura 5 – Corpo de prova moldado



Fonte: Autores, 2024.

4.4 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para a execução deste ensaio, utilizou-se a infraestrutura do laboratório da universidade, onde há uma prensa hidráulica disponível para os testes. Os corpos de prova foram previamente secos e limpos e, em seguida, posicionados cuidadosamente no centro da plataforma da prensa. O ensaio foi realizado em conformidade com a NBR 7215:2019, assegurando que a calibragem e a velocidade de aplicação da carga estivessem adequadas. A carga foi aplicada de forma contínua e sem choques para garantir a precisão dos resultados.

Figura 6 – Ruptura do corpo de prova



Fonte: Autores, 2024.

Os resultados serão apresentados nas tabelas abaixo, foi realizado o acompanhamento e rompimento dos corpos de provas com 7, 14 e 21.

4.5 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Foi realizado o ensaio de absorção de água por imersão, é um teste importante para avaliar a permeabilidade do concreto. O objetivo é determinar a capacidade do concreto de absorver água sob condições específicas, o que está diretamente relacionado à sua porosidade e permeabilidade. Altos índices de absorção podem indicar maior vulnerabilidade a danos por penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos.

As normas consultadas para elaboração do ensaio foi a NBR 9778 (ABNT, 2011) onde o procedimento descreve a preparação da amostra, o corpo de prova já havia sido realizado o processo de cura, a amostra foi colocada em uma estufa a 100 - 110°C até atingir massa constante, ou seja, quando a variação de massa entre duas pesagens consecutivas for inferior a 0,1%. Foi realizado a pesagem da massa seca (M_d), colocamos o corpo de prova submerso em água por um período de 24 horas, foi retirado e pesado, massa saturada (M_s).

Para a execução do ensaio, seguiu-se a norma ABNT NBR 9778:2011, que detalha os procedimentos necessários. Inicialmente, os corpos de prova, previamente curados, foram submetidos a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100 a 110°C até atingirem massa constante. Essa condição é atingida quando a variação de massa entre duas pesagens consecutivas é inferior a 0,1%. Após a secagem, foi realizada a pesagem para determinar a massa seca (M_d).

Em seguida, os corpos de prova foram submersos em água por um período de 24 horas, de acordo com as especificações da norma. Após esse período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água, e o excesso de água superficial foi removido. Procedeu-se então à pesagem dos corpos de prova para obter a massa saturada (M_s).

Equipamentos utilizados foram:

- a) Balança hidrostática;
- b) Recipientes (para imersão e fervura das amostras);
- c) Estufa.

A Tabela 8 apresenta os dados sobre o peso das amostras de concreto, incluindo a massa seca (m_s), massa imersa (m_i) e massa saturada (m_{sat}) das amostras, tanto para o concreto sem aditivo quanto com aditivo. Esses dados são importantes para analisar as propriedades de absorção de água, porosidade e a densidade das amostras conforme apresentado a seguir:

Tabela 8 – Peso das amostras			
Amostra	Peso das amostras (Média)		Massa saturada (m_{sat})
	Massa seca (m_s)	Massa imersa (m_i)	
Sem aditivo	3436	2065	3560
Com aditivo	3640	2162	3728

Fonte: Autores, 2024.

Esse procedimento permite calcular a absorção de água do concreto. De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) oferecendo uma avaliação precisa de sua permeabilidade e contribuindo para o entendimento de seu comportamento frente à exposição a ambientes agressivos.

Determinação da absorção de água (A):

$$A = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \times 100$$

Determinação do índice de vazios (I_v):

$$I_v = \frac{(M_{sat} - M_s)}{(M_{sat} - M_i)} \times 100$$

Determinação da massa específica da amostra seca (ρ_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i}$$

Determinação da massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}):

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i}$$

Determinação da massa específica real (ρ_r):

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i}$$

5 RESULTADOS E DISCUSÕES

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão é de fundamental importância para avaliar a qualidade e o desempenho mecânico do concreto, sendo um dos principais indicadores utilizados na engenharia civil. Esse procedimento, é possível prever o comportamento do concreto em diferentes idades, avaliar o impacto de aditivos ou outros materiais incorporados, e assegurar que o concreto atenda às demandas estruturais ao longo de sua vida útil, os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios a compressão

(continua)

Corpo de Prova	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão média de ruptura (MPa)
Sem aditivo	7	1	20,8	20,8
		2	21,1	
		3	20,5	
	14	1	23,7	24,3
		2	25,0	
		3	24,1	
	21	1	22,4	23,1
		2	23,3	
		3	23,5	
Com aditivo	7	1	12,2	12,7
		2	13,0	
		3	12,8	
	14	1	15,8	14,9
		2	14,3	

Tabela 9 – Resultados dos ensaios a compressão

(conclusão)

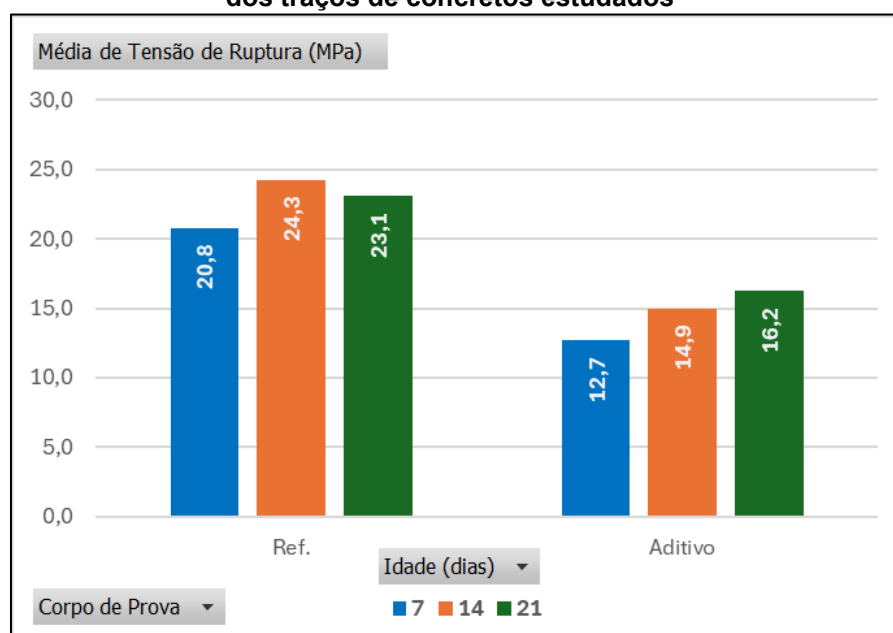
Corpo de Prova	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão média de ruptura (MPa)
Com aditivo	14	3	14,7	14,9
	21	1	16,7	16,2
		2	15,9	
		3	16,1	

Fonte: Autores, 2024

Os resultados do ensaio de compressão demonstraram diferenças significativas entre os concretos com e sem o uso de aditivo redutor de permeabilidade. Para o concreto sem aditivo, a resistência média foi de 20,8 MPa aos 7 dias, 24,3 MPa aos 14 dias e 23,1 MPa aos 21 dias, evidenciando um crescimento consistente até os 14 dias, com leve redução posterior, que pode ser atribuída a variações no teste ou no processo de cura.

Já o concreto com aditivo apresentou resistências médias inferiores em todas as idades analisadas, com valores de 12,7 MPa aos 7 dias, 14,9 MPa aos 14 dias e 16,2 MPa aos 21 dias. Essa diferença sugere que o aditivo retardou o ganho inicial de resistência, provavelmente devido à sua interferência na reação de hidratação do cimento. Embora o concreto com aditivo tenha mostrado um crescimento gradativo na resistência ao longo do tempo, ele permaneceu abaixo do desempenho do concreto sem aditivo.

Figura 07 – Gráfico de evolução da resistência média a compressão dos traços de concretos estudados



Fonte: Autores, 2024.

O gráfico da figura 07 ilustra a comparação do traço referencia e com o aditivo ARP, onde o percentual da resistencia média a 7 dias reduziu em 63,77%, 14 dias reduziu em 63,08 % e a 21 dias reduziu 42,59% a resistencia a compressão do concreto.

Esses resultados indicam que, apesar do potencial do aditivo em reduzir a permeabilidade, seu impacto negativo na resistência à compressão deve ser considerado, especialmente em projetos estruturais onde a resistência mecânica é fator crítico. A aplicação do aditivo, portanto, deve ser avaliada cuidadosamente, equilibrando os benefícios em termos de durabilidade com as limitações na resistência mecânica.

5.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO

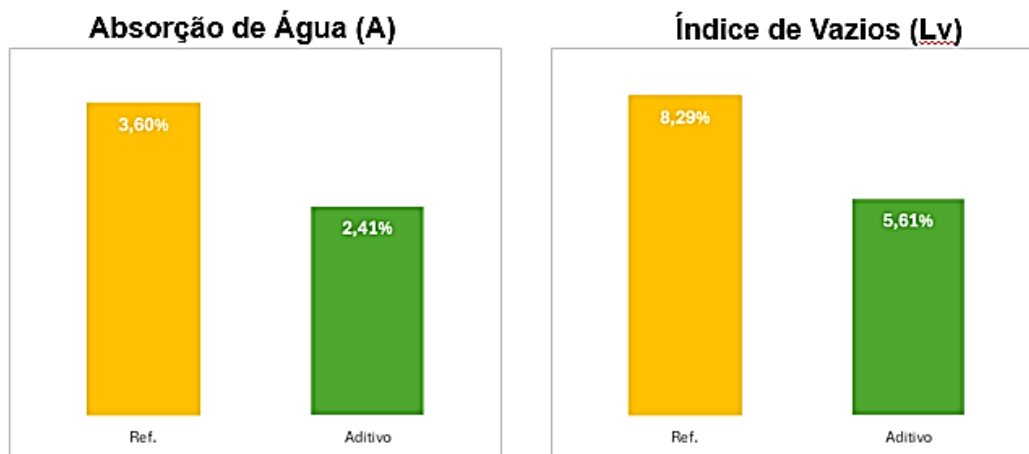
A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos e o gráfico ilustra os resultados no ensaio de absorção de água por imersão, comparando as propriedades físicas de corpos de prova confeccionados com e sem aditivo redutor de permeabilidade.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Propriedade	Concreto Com Aditivo	Concreto Sem Aditivo
Massa Seca (M_s)	3640 g	3436 g
Massa Imersa (M_i)	2162 g	2065 g
Massa Saturada (M_{sat})	3728 g	3560 g
Absorção de Água (A)	2,41%	3,60%
Índice de Vazios (I_v)	5,61%	8,29%
Massa Específica Seca (ρ_s)	2,32 g/cm ³	2,29 g/cm ³
Massa Específica Saturada (ρ_{sat})	2,38 g/cm ³	2,47 g/cm ³
Massa Específica Real (ρ_r)	2,46 g/cm ³	2,50 g/cm ³

Fonte: Autores, 2024.

Figura 08 – Gráfico variação de absorção de água por imersão e índice de vazios



Fonte: Autores, 2024

As propriedades avaliadas incluem a massa seca, a massa saturada e a massa imersa, além da absorção de água, índice de vazios e as massas específicas nas condições seca, saturada e real. Esses dados são fundamentais para compreender o comportamento do concreto em relação à sua porosidade e à capacidade de absorção de água, características diretamente relacionadas à durabilidade e ao desempenho das estruturas expostas a condições ambientais adversas.

A absorção de água foi reduzida em aproximadamente 33% no concreto com aditivo. Isso indica que o aditivo impermeabilizante conseguiu reduzir a quantidade de água absorvida, o que contribui para uma menor permeabilidade do concreto.

O índice de vazios também foi menor no concreto com aditivo, demonstrando uma estrutura mais densa e compacta. Isso está relacionado à menor quantidade de porosidade

conectada, o que dificulta a penetração de água e, conseqüentemente, aumenta a durabilidade do material frente a ambientes agressivos.

A massa específica seca foi ligeiramente maior no concreto com aditivo, o que reforça a presença de uma microestrutura mais densa e de menor porosidade.

A massa específica saturada foi um pouco menor no concreto com aditivo. Isso pode ser interpretado como resultado da menor capacidade de absorção de água no concreto impermeabilizado, indicando uma menor saturação dos poros.

A figura 08 apresenta que a absorção de água por imersão em percentual reduziu de 3,60% para 2,41%, o índice de vazios reduziu de 8,29% para 5,61%.

6 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi analisada a influência dos aditivos redutores de permeabilidade nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, com ênfase nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água. O objetivo principal foi avaliar se a redução de permeabilidade promovida pelo aditivo comprometeria a resistência do concreto em diferentes idades, além de determinar a eficácia desse aditivo para aplicações em condições ambientais agressivas.

Com base nos resultados apresentados nos ensaios de compressão e de absorção de água por imersão, é possível concluir que a utilização do aditivo redutor de permeabilidade influenciou significativamente as propriedades do concreto. No ensaio de compressão, o concreto com aditivo apresentou resistências médias inferiores em todas as idades analisadas, sugerindo que o aditivo impactou negativamente o ganho inicial de resistência, possivelmente devido à interferência no processo de hidratação do cimento. Embora tenha havido um aumento gradual na resistência ao longo do tempo, os valores permaneceram inferiores aos do concreto sem aditivo, o que ressalta a necessidade de um balanço cuidadoso entre resistência mecânica e durabilidade na escolha desse material, principalmente em projetos estruturais.

Por outro lado, o ensaio de absorção de água por imersão demonstrou que o aditivo foi eficiente na redução da permeabilidade do concreto. O concreto com aditivo apresentou uma absorção de água aproximadamente 33% menor e um índice de vazios mais baixo, indicando uma estrutura mais densa e compacta, com menor porosidade conectada. Esses resultados refletem diretamente em uma menor capacidade de penetração de água, o que contribui para a durabilidade do concreto em ambientes agressivos. Além disso, a massa específica seca foi ligeiramente maior no concreto com aditivo, reforçando a densidade aprimorada da microestrutura, enquanto a massa específica saturada foi inferior, corroborando a menor capacidade de saturação dos poros.

Em síntese, este estudo destaca a importância de uma análise criteriosa ao adicionar aditivos redutores de permeabilidade no concreto, enfatizando que essas incorporações devem ser baseadas em um entendimento aprofundado das reações químicas envolvidas e das propriedades físicas do material. Pesquisas futuras devem se concentrar em aprimorar as formulações de concreto com aditivos, buscando traços que consigam equilibrar a eficiência na redução da permeabilidade e a resistência à compressão, além de desenvolver métodos de ensaio que representem com maior precisão o desempenho do concreto em condições reais de uso a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Frank Albert Soares. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização**. 2020. 18 f. Tese (doutorado) — Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.
- ARY, Catarina Accioly. **Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto**. 2019. 81 f. Monografia (especialização) — Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Cap. 81.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003: Cimento Portland — Determinação da finura pelo método do permeâmetro de permeabilidade a ar**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015: Execução de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:1998: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2019 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575: impermeabilização – seleção e projeto**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:2011: Concreto — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 535–551, 15 out. 2014.
- FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão**. Minho: Dissertação (mestrado em Engenharia Civil), 2000. 246 p.

HELENE, P. et al. Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 544-563, maio 2018.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

JEZEK, Geno. **History of concrete**.

LAPA, José. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. Monografia (especialização em Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, [s.l.], 2008.

LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. Durabilidade do concreto: análise dos requisitos dos materiais constituintes. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana*, v. 8, p. 14-25, 2018.

LIMA, M. G. Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: *IBRACON Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: Copyright, v. 1, 2011. Cap. 21, p. 733-772.

MEDEIROS, Marcelo; GOMES, Thais; HELENE, Paulo. **Hidrofugantes de superfície: estudo da capacidade de barrar o ingresso de água no concreto**. Universidade de São Paulo, [s.l.], 2006.

MEDEIROS, Marcelo; GOMES, Thais; HELENE, Paulo. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. Universidade de São Paulo, [s.l.], 2011.

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete. *American Concrete Institute*, oct. 2001. v. 23, n. 10, p. 61-66.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 674 p.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland: contribuição aos processos de autocicatrização**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2016.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PEREIRA, Barbara. **Avaliação de desempenho de concretos no estado fresco com a incorporação de aditivo cristalizante**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia Civil) — Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, [s. l.], 2018.

PINHEIRO, Igor. **Os principais aditivos utilizados no concreto**. [s. l.], 15 mar. 2019.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology**. Park Ridge, NJ: Second Edition Noyes Publications, 1995. 1153 p.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 163 p. Tese (pós-graduação em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANTANA, Bruna; ALEIXO, Isabella. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. 2017. Relatório final de pesquisa de iniciação científica (pós-graduação) — Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, [S.I.], 2017.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. Tese (doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. 306 p.

VISCALDI, Diego; SILVA, Bruno. **Análise do concreto submetido a ataque por sulfato de ferro em áreas degradadas pela mineração do carvão**. 2014.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. **Performance-based standard specifications for maintenance and repair of concrete structures in Japan**. *Structural Engineering International*, v. 4, p. 359-366, 2007.

ANEXO

Determinação da absorção de água (A):

$$A = \frac{(Msat - Ms)}{Ms} \times 100$$

a. Com aditivo impermeabilizante:

$$A = \frac{(3728 - 3640)}{3640} \times 100 = 2,41\%$$

b. Sem aditivo impermeabilizante:

$$A = \frac{(3560 - 3436)}{3436} \times 100 = 3,60\%$$

Determinação do índice de vazios (Iv):

$$Iv = \frac{(Msat - Ms)}{(Msat - Mi)} \times 100$$

a. Com aditivo impermeabilizante:

$$Iv = \frac{(3728 - 3640)}{(3728 - 2162)} \times 100 = 5,61\%$$

b. Sem aditivo impermeabilizante:

$$Iv = \frac{(3560 - 3436)}{(3560 - 2065)} \times 100 = 8,29\%$$

Determinação da massa específica da amostra seca (ρ_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i}$$

a. Com aditivo impermeabilizante:

$$\rho_s = \frac{3640}{3728 - 2162} = 2,32$$

b. Sem aditivo impermeabilizante:

$$\rho_s = \frac{3436}{3560 - 2065} = 2,29$$

Determinação da massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}):

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i}$$

a. Com aditivo impermeabilizante:

$$\rho_{sat} = \frac{3728}{3728 - 2162} = 2,38$$

b. Sem aditivo impermeabilizante:

$$\rho_{sat} = \frac{3560}{3560 - 2065} = 2,47$$

Determinação da massa específica real (ρ_r):

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i}$$

a. Com aditivo impermeabilizante:

$$\rho_r = \frac{3640}{3640 - 2162} = 2,46$$

b. Sem aditivo impermeabilizante:

$$\rho_r = \frac{3436}{3436 - 2065} = 2,50$$