

Estudo do desempenho mecânico do concreto autoadensável com aditivos impermeabilizantes.

Jhonata Jose Grana, Engenharia Civil, Centro Universitário Integrado, Brasil

Lucas Mateus Pereira Dos Santos, Engenharia Civil, Centro Universitário Integrado, Brasil

Resumo

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e comparar o desempenho mecânico do Concreto Autoadensável (CAA) com e sem a incorporação de distintos aditivos impermeabilizantes, buscando avaliar a influência dessa combinação na resistência à compressão. O método experimental consistiu na produção de três traços de CAA (um de referência e dois com aditivos impermeabilizantes de marcas diferentes, denominados A e B), todos com fator água/aglomerante de 0,4 e aditivo superplastificante. Foram realizados ensaios no estado fresco (Slump Flow e T500) para confirmar a autoadensamento, seguido da moldagem e cura de 27 corpos de prova. O resultado dos ensaios de compressão axial nas idades de 7 e 14 dias demonstrou um aumento significativo na resistência do CAA com aditivos em comparação ao traço de referência, que atingiu 12,61 MPa aos 14 dias. O CAA com aditivo A apresentou a melhor performance, alcançando uma média de 21,30 MPa aos 14 dias, enquanto o CAA com aditivo B obteve 14,89 MPa, indicando que a natureza do aditivo influencia diretamente o ganho de resistência. No entanto, a trabalhabilidade no estado fresco sofreu alterações que aumentaram o tempo de escoamento e reduziu média diametral nos traços aditivados. A conclusão do estudo aponta que a adição de aditivos impermeabilizantes ao Concreto Autoadensável é uma estratégia eficaz para aumentar a resistência à compressão axial, mas os resultados variam substancialmente de acordo com a marca e composição do aditivo utilizado.

Palavras-chave: Concreto Autoadensável. Aditivo Impermeabilizante. Resistência à Compressão. Desempenho Mecânico. Trabalhabilidade.

Abstract

This work's main objective was to analyze and compare the mechanical performance of Self-Compacting Concrete (SCC) with and without the incorporation of distinct waterproofing admixtures, seeking to evaluate the influence of this combination on compressive strength. The experimental method consisted of producing three SCC mixes (one reference and two with waterproofing admixtures from different brands, named A and B), all with a water-to-binder ratio of 0.4 and a superplasticizer admixture. Tests were conducted in the fresh state (Slump Flow and T500) to confirm self-compaction, followed by the molding and curing of 27 test specimens. The results of the axial compression tests at the ages of 7 and 14 days demonstrated a significant increase in the strength of the SCC with admixtures compared to the reference mix, which reached 12.61 MPa at 14 days. The SCC with admixture A showed the best performance, reaching an average of 21.30 MPa at 14 days, while the SCC with admixture B obtained 14.89 MPa, indicating that the nature of the admixture directly influences the strength gain. However, the workability in the fresh state underwent changes that increased the flow time and reduced the average diameter in the admixed mixes. The study concludes that the addition of waterproofing admixtures to Self-Compacting Concrete is an effective strategy for increasing axial compressive strength, but the results vary substantially according to the brand and composition of the admixture used.

Keywords: Self-Compacting Concrete. Waterproofing Admixture. Compressive Strength. Mechanical Performance. Workability.

INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias na construção civil, o concreto autoadensável (CAA) surgiu, por volta de 1988, como uma solução técnica voltada à concretagem em locais de difícil acesso e formas geométricas complexas. Conforme destacam Tutikian e Dal Molin (2008), esse tipo de concreto dispensa a necessidade de vibração mecânica ou manual, o que contribui diretamente para a redução da mão de obra e a garantia de homogeneidade na estrutura, mesmo em elementos com elevada densidade de armaduras.

A principal característica do CAA é sua elevada fluidez, viabilizada pelo uso de aditivos químicos, especialmente os superplastificantes, que aumentam significativamente a trabalhabilidade sem comprometer a resistência. Além disso, outros aditivos, como os retardadores de pega, impermeabilizantes e plastificantes, também são amplamente empregados. Esses aditivos atuam de maneira específica: os retardadores controlam o tempo de endurecimento; os impermeabilizantes reduzem a permeabilidade do concreto, dificultando a penetração de água e agentes agressivos; os plastificantes melhoram a coesão e a trabalhabilidade da mistura (AMORIM et al. 2014).

A correta seleção e dosagem desses aditivos é fundamental para prevenir patologias recorrentes nas estruturas de concreto, como a fissuração por retração, exsudação e, principalmente, a corrosão das armaduras causada pela penetração de umidade (CAMARGO, 2010). Neste contexto, a incorporação de aditivos impermeabilizantes representa uma estratégia técnica para garantir maior durabilidade e desempenho.

Esses aditivos criam uma barreira interna protetora que pode ser obtida por dois mecanismos principais: a ação hidrofugante, que torna o concreto repelente à água, e a ação cristalizante, que reage com a umidade para formar cristais que bloqueiam fisicamente os poros do material, reduzindo a permeabilidade capilar (IBI, 2021). A correta aplicação dessas tecnologias pode diminuir e até mesmo impedir a manifestação de futuras patologias, como a corrosão e a proliferação de mofo e bolor.

Apesar dos benefícios do CAA (compacidade inerente) e dos aditivos impermeabilizantes (redução da permeabilidade), são poucos os estudos que abordam a combinação desses dois elementos e avaliam o impacto direto na resistência mecânica do composto final. Portanto, este trabalho buscará avaliar experimentalmente os efeitos que a combinação dessas tecnologias pode causar no desempenho mecânico do Concreto Autoadensável aditivado com impermeabilizantes.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar e comparar o desempenho mecânico do concreto autoadensável com e sem a incorporação de distintos aditivos impermeabilizantes através de ensaios laboratoriais.

Objetivos Específicos

- Produzir um traço de concreto autoadensável de referência e dois traços com distintos aditivos impermeabilizantes.
- Realizar ensaios técnicos no estado fresco para verificar a trabalhabilidade.
- Realizar ensaio técnico no estado endurecido para avaliar a resistência a compressão.
- Analisar e comparar os resultados para avaliar a influência de cada aditivo nas propriedades do concreto.

JUSTIFICATIVA

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, sendo constantemente aprimorado para atender às crescentes necessidades de desempenho estrutural, durabilidade e sustentabilidade. Nesse contexto, o concreto autoadensável (CAA) representa uma importante inovação tecnológica, pois permite maior fluidez e facilidade de aplicação, reduzindo a necessidade de vibração mecânica, tempo de execução e falhas na compactação, especialmente em estruturas com geometrias complexas ou elevada densidade de armaduras (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Paralelamente, os aditivos impermeabilizantes vêm sendo cada vez mais utilizados como alternativa para aumentar a durabilidade das estruturas, ao reduzir a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, minimizar os riscos de corrosão das armaduras e outras patologias associadas à presença de umidade (NEVILLE, 2015). Contudo, apesar dos avanços no uso de aditivos químicos, ainda existem poucos estudos que investigam a influência dos aditivos impermeabilizantes nas propriedades mecânicas do concreto autoadensável.

A combinação dessas duas tecnologias ainda é uma área de estudo recente e carece de maior aprofundamento, especialmente no que diz respeito ao impacto direto na resistência à compressão e na trabalhabilidade do concreto. Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de avaliar experimentalmente como os aditivos impermeabilizantes afetam o desempenho mecânico do CAA, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais duráveis e eficientes, além de oferecer subsídios técnicos e científicos para projetistas, engenheiros e profissionais da construção civil.

No entanto, para o desenvolvimento do estudo da combinação do concreto autoadensável com adição de aditivos impermeabilizantes, deixamos como ponto de observação que a quantidade de aditivo impermeabilizante a ser utilizados não será a indicada pelo fabricante dos aditivos, mas sim a quantidade equivalente a 1% da proporção de aglomerante. O estudo não estabelece como objetivo avaliar o papel do aditivo impermeabilizante como um dispersor de umidade, mas como a

quantidade de aditivo estabelecido afeta a resistência mecânica do concreto autoadensável.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção estabelece a fundamentação teórica do estudo. Serão abordados a origem e a definição do Concreto Autoadensável (CAA), seus materiais constituintes e os principais ensaios de autoadensamento. Adicionalmente, será apresentado os aditivos impermeabilizantes, detalhando o seu mecanismo de ação e relevância para a durabilidade, garantindo assim a base para a compreensão da pesquisa.

Concreto autoadensável origem e conceito.

O Concreto autoadensável (CAA) é considerado um dos maiores avanços na tecnologia do concreto moderno. Sua origem remonta ao Japão, no final da década de 1980, desenvolvida por pesquisadores Okamura e Ouchi (2003) na Universidade de Tóquio.

O desenvolvimento do CAA foi uma resposta direta à crise de durabilidade que afetava muitas estruturas de concreto armado construídas durante o avanço econômico do país. Tais estruturas apresentavam deterioração precoce, frequentemente causada pela falha na compactação do concreto convencional (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2004).

A dificuldade em adensar o concreto de maneira eficiente, especialmente em peças com alta densidade de armadura, resultava em porosidade excessiva e vazios. Esta baixa compactação permitia a rápida penetração de agentes agressivos (como o dióxido de carbono e cloretos), acelerando a corrosão da armadura e comprometendo a vida útil da estrutura (NEVILLE, 2015).

O CAA foi concebido para eliminar a necessidade de vibração, garantindo uma matriz mais homogênea e durável. Conforme a literatura técnica, o CAA é definido como um concreto capaz de fluir, preencher e se compactar em suas fôrmas sob a ação de seu próprio peso, sem o auxílio de qualquer compactação mecânica externa (EFNARC, 2002).

Para ser classificado como CAA, o material no estado fresco deve satisfazer, simultaneamente, as seguintes três propriedades fundamentais, verificadas através de ensaios padronizados conforme a ABNT NBR 15823 (2017):

- I. Capacidade de Preenchimento: Habilidade de escoar e se espalhar livremente, preenchendo todos os espaços da fôrma.
- II. Habilidade Passante: Capacidade de fluir através de armaduras densas e estreitas sem ocorrência de bloqueio.
- III. Resistência à Segregação e Estabilidade: Capacidade de manter seus constituintes (agregados e pasta) em suspensão, garantindo a homogeneidade da mistura durante o transporte e o lançamento.

A principal vantagem técnica do CAA reside na sua capacidade de garantir a máxima compacidade mesmo em condições de concretagem difíceis, resultando em uma estrutura de concreto endurecido significativamente menos permeável e mais durável (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A dosagem do Concreto Autoadensável (CAA) é fundamentalmente distinta daquela empregada no concreto convencional (CCV), exigindo a otimização da fase fluida e do esqueleto granular (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2004). Para garantir a autoadensabilidade, o material exige um alto volume de materiais pulverulentos (com partículas $\leq 0,125$ mm), essenciais para conferir a viscosidade e coesão que previnem a segregação (NEVILLE, 2015).

Estes finos são compostos por cimento e, majoritariamente, por adições minerais, como o filer calcário (para volume) ou a sílica ativa e a cinza volante. Estes últimos promovem ganhos de resistência e durabilidade a longo prazo por sua atividade pozolânica. No entanto, o CAA depende de aditivos químicos de alto desempenho, os aditivos superplastificantes (SP) são obrigatórios para dispersar as partículas finas e garantir alta fluidez com baixa relação água/aglomerante (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Em certas misturas, podem ser necessários Aditivos Modificadores de Viscosidade (AMV) para aumentar a coesão e evitar a exsudação (EFNARC, 2002). Por fim, o agregado graúdo é utilizado em volume reduzido e com uma dimensão máxima característica (DMC) menor (tipicamente ≤ 19 mm), a fim de facilitar a habilidade passante pelas armaduras.

Para garantir que a mistura no estado fresco atenda às propriedades de auto adensamento, são realizados ensaios específicos, conforme a normalização brasileira ABNT NBR 15823 (2017). O Ensaio do Abatimento de Tronco de Cone (Slump Flow Test) é utilizado para medir a fluidez, sendo determinado pela média diametral do espalhamento, e o ensaio T500 aponta o tempo que o espalhamento levou para atingir a medida de 500 mm.

A habilidade passante é verificada pelo Ensaio da Caixa L (L-Box), que avalia a capacidade do concreto de atravessar um arranjo simulado de barras de aço. Por último, a resistência à segregação é verificada, de forma indireta, através do Ensaio do Funil V (V-Funnel), que mede o tempo de escoamento, indicando a viscosidade da mistura.

Apesar dos custos mais elevados, o CAA oferece benefícios técnicos e operacionais significativos. Sua principal vantagem reside na melhoria da durabilidade, uma vez que a ausência de vibração garante uma matriz com alta compacidade e menor permeabilidade, aumentando a proteção da armadura contra corrosão (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Outros benefícios incluem a maior velocidade de concretagem, a redução do ruído no canteiro e a obtenção de melhor qualidade e acabamento em peças complexas. O uso do CAA, contudo, apresenta desvantagens que exigem cautela. O custo unitário é elevado devido ao maior consumo de cimento e aditivos de alto desempenho.

Além disso, a mistura possui alta sensibilidade à dosagem, o que exige um controle de qualidade extremamente rigoroso. Pequenas variações podem resultar na perda do autoadensamento e na segregação dos materiais do concreto. Por fim, sua alta fluidez exerce uma maior pressão hidrostática nas fôrmas, demandando estruturas de suporte mais robustas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2004).

Aditivos Impermeabilizantes

Enquanto o Concreto Autoadensável (CAA) é uma inovação voltada para a otimização da execução e compacidade, a utilização de aditivos impermeabilizantes representa uma estratégia complementar crucial focada diretamente no aumento da durabilidade e da estanqueidade da estrutura (NEVILLE, 2015).

Os aditivos impermeabilizantes são produtos químicos ou minerais adicionados à mistura do concreto durante o seu preparo, com o objetivo primário de reduzir a permeabilidade e a absorção de água do material no estado endurecido (ABNT NBR 11768, 2019). Eles atuam tornando o concreto mais resistente à passagem da água e de outros fluidos, o que é vital para a proteção da armadura.

A ação desses aditivos pode ser categorizada em dois mecanismos principais, dependendo de sua composição:

- I. Aditivos por Cristalização (Mineral): Estes aditivos reagem com subprodutos da hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio (CH), formando cristais insolúveis que preenchem os poros e micro capilares do concreto. Este processo sela a rede de vazios internos, bloqueando fisicamente a passagem da água.
- II. Aditivos Hidrofugantes (Químico): Compostos por substâncias que criam uma barreira hidrofóbica (repelente à água) nas paredes dos poros e capilares. Eles alteram a tensão superficial da água, impedindo que ela penetre na microestrutura do concreto por sucção capilar. A inclusão de aditivos impermeabilizantes é particularmente relevante para o estudo do CAA por dois motivos (MEHTA; MONTEIRO, 2014):

Complementaridade da Durabilidade: O CAA já é intrinsecamente mais durável devido à sua alta compacidade e baixa relação água/aglomerante. O aditivo impermeabilizante atua como uma segunda linha de defesa, reforçando a estanqueidade da matriz e potencializando a proteção contra a corrosão da armadura, especialmente em ambientes altamente agressivos (MARQUES, 2011).

Interferência Reológica: No entanto, a incorporação desses aditivos especialmente se forem finos minerais ou tensoativos pode exigir o estudo da sua compatibilidade com os aditivos superplastificantes do CAA. É fundamental verificar se a adição do impermeabilizante altera a fluidez ou a estabilidade da mistura no estado fresco, pois isso poderia comprometer o autoadensamento.

Portanto, a análise do desempenho mecânico do CAA com aditivo impermeabilizante torna-se essencial, pois permite avaliar o equilíbrio entre a

potencial melhoria da durabilidade e a manutenção das propriedades reológicas e de resistência do concreto no estado endurecido.

Componentes do concreto autoadensável

Água

A água é um elemento essencial na composição do concreto, seu papel consiste na hidratação dos aglomerantes ativando dessa forma as reações químicas no concreto, reações que impactam diretamente na resistência e durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A dosagem de água interfere diretamente na trabalhabilidade da mistura no estado fresco e nas propriedades do concreto no estado endurecido (NEVILLE, 2011).

A qualidade da água pode ser um fator crucial na obtenção de um concreto resistente e durável, tendo em vista que a água a ser utilizada seja limpa e potável. A água de abastecimento público é considerada adequada para o uso em concreto, conforme a ABNT NBR 15900 -1 (2009). No entanto a potabilidade não é o único indicador de qualidade, pois as impurezas dissolvidas ou em suspensão na água devem ser controladas para não afetar o processo de pega, o endurecimento e o surgimento de patologias a longo prazo (HELENE, 1992).

O controle de qualidade da água também está expresso na relação água cimento (a/c), essa relação afeta diretamente a resistência e durabilidade do concreto. A relação a/c aponta uma porção mínima necessária para a hidratação completa, por outro lado o excesso de água resulta na formação de poros capilares no concreto endurecido, diminuindo sua densidade, resistência e aumentando sua permeabilidade, o que facilita a penetração de agentes agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Cimento

O cimento é o aglutinante hidráulico essencial que forma a matriz resistente do concreto. Embora materiais com propriedades ligantes fossem utilizados desde as civilizações egípcias e romanas, o desenvolvimento do cimento moderno é creditado ao construtor inglês Joseph Aspdin (ISAIA, 2017).

Em 1824, Aspdin patenteou o processo de fabricação do Cimento Portland, nomeado em referência à Portland Stone, uma rocha da Ilha de Portland, Inglaterra, cuja cor e solidez o material endurecido imitava. O processo envolvia a calcinação de calcário e argila e a posterior moagem fina.

Sua função crucial é reagir com a água em um processo chamado hidratação, formando uma pasta coesa que envolve os agregados. É essa matriz endurecida que confere a principal característica do concreto: a resistência à compressão e a durabilidade necessárias para as estruturas de engenharia civil.

Agregados

Os agregados, constituídos por materiais granulares como a areia (agregado miúdo) e a brita ou cascalho (agregado graúdo), formam o esqueleto inerte do concreto e representam a maior proporção volumétrica da mistura, geralmente entre 60% e 80% (ISAIA, 2017). Sua principal função é fornecer volume, resistência interna e contribuir para a estabilidade do material endurecido.

O agregado miúdo é essencial para preencher os vazios e facilitar a trabalhabilidade da massa, enquanto o agregado graúdo é o componente que garante a principal resistência mecânica da peça. A importância técnica dos agregados reside, ainda, no fato de que eles estabilizam o volume do concreto, minimizando as variações dimensionais causadas pela hidratação e secagem da pasta de cimento. Além disso, por serem inertes e de menor custo que o cimento, tornam a produção de concreto economicamente viável.

Por fim, a granulometria ideal e a limpeza dos agregados são aspectos cruciais de controle de qualidade. Estes fatores influenciam diretamente a área superficial das partículas e, conseqüentemente, a quantidade de pasta de cimento necessária para envolvê-los. Assim, a correta seleção dos agregados afeta, de modo decisivo, a trabalhabilidade, a densidade e, principalmente, a durabilidade do concreto final.

Aditivo superplastificante

O superplastificante é um aditivo químico incorporado à mistura de concreto para modificar e otimizar suas propriedades reológicas no estado fresco. Sua principal função é aumentar drasticamente a fluidez e a trabalhabilidade da massa sem a necessidade de adicionar água extra, como apontado nos estudos de Mehta e Monteiro (2014). Quimicamente, ele atua como um agente dispersante que neutraliza as forças eletrostáticas que causam a aglomeração das partículas de cimento, liberando a água que estava aprisionada nesses flocos.

Essa ação de dispersão gera dois grandes benefícios no desempenho do concreto. O primeiro é a melhoria da trabalhabilidade, que permite a produção de concretos altamente fluidos, como os autoadensáveis, facilitando o lançamento em formas complexas, em ferragens densas ou o bombeamento a grandes alturas, mantendo a homogeneidade da mistura.

O segundo e mais significativo benefício técnico é o aumento da resistência e durabilidade. O superplastificante viabiliza a redução da relação água/cimento, uma vez que a fluidez é mantida com menos água. Utilizar menos água na mistura resulta em uma pasta de cimento mais densa, com menor porosidade e capilaridade, conferindo ao concreto maior resistência à compressão e durabilidade superior contra a penetração de agentes agressivos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a influência dos aditivos impermeabilizantes no concreto autoadensável, foram elaborados alguns traços de CAA, sendo um traço sem

aditivo impermeabilizante e outros dois traços com aditivos impermeabilizantes sendo que foram utilizados aditivos impermeabilizantes de marcas distintas.

Em seguida foram realizados ensaios no estado fresco para avaliar a trabalhabilidade e fluidez do concreto (T500, slump flow), as fotografias 1, 2 e 3 apresentam especificações técnicas dos ensaios no estado fresco conforme a ABNT NBR 15823 (2017). E no estado endurecido foi realizado o ensaio de compressão axial dos CPs para avaliar se houve evoluções no ganho de resistência do concreto.

Fotografia 1: Classe de viscosidade plástica medida pelo ensaio T500.

Classe	t_{500} s	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS 2	> 2	

Fonte: ABNT NBR 15823 (2017)

Fotografia 2: Classe de espalhamento Slump Flow.

Classe	Espalhamento mm	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Fonte: ABNT NBR 15823 (2017)

Fotografia 3: Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.

Classe de espalhamento	Espalhamento mm	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável	Lajes Estacas e certas fundações profundas
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: ABNT NBR 15823 (2017)

A metodologia a ser seguida baseia-se no método de dosagem de Mendes (2002), adaptado por Katayama (2016), e na estrutura de comparação experimental de Perin (2024), representado na tabela 1 a quantidade de materiais utilizados.

Tabela 1 – Proporção dos materiais utilizados no trabalho de Perin.

Materiais	Sem adição de SP	100 g de SP	150 g de SP
Cimento (kg)	10	10	10
Brita 0 (kg)	10	10	10
Brita 1 (kg)	10	10	10
Agregado miúdo (kg)	20	20	20
Água (L)	5	4	4
Superplastificante (g)	0	100	150

Fonte: Perin (2024)

Seguindo o método de dosagem adotado no trabalho de Perin (2024), será adicionado aditivos impermeabilizantes na produção do concreto autoadensável, e posteriormente será realizado os ensaios no estado fresco para aprovação do concreto como um concreto autoadensável, seguindo os padrões estabelecidos pela ABNT NBR 15823 (2017).

Para a produção do Concreto autoadensável será adotado o traço 1:2:2, sendo o peso de 10 kg para cada parte de material, os materiais a serem utilizados serão o cimento portland CII F-32, 4 kg de água proporcionando um fator A/C de 0,4, areia lavada fina, brita 0 (pedrisco) e a brita 1/2, cada tipo de brita será dosado no valor de uma medida (10 kg), no entanto será adicionado ao traço 100g de aditivo superplastificante equivalente a 1% do aglomerante utilizado.

Na produção do (CAA) com aditivo impermeabilizante será utilizado o mesmo traço citado acima, no entanto será acrescentado a mistura 100 ml de aditivo impermeabilizante, equivalente a 1% da proporção do aglomerante utilizado, nos dois traços utilizados para comparação do desempenho mecânico, os materiais a serem utilizados estão representados na tabela 2.

Tabela 2 – Proporção dos materiais utilizados nos traços de CAA.

Materiais	Traço 1 sem AI (CAA-Ref)	Traço 2 (CAA + AI-A)	Traço 3 (CAA + AI-B)
Cimento (kg)	10	10	10
Brita 0 (kg)	10	10	10
Brita 1 (kg)	10	10	10
Agregado miúdo (kg)	20	20	20
Água (L)	4	4	4
Superplastificante (ml)	100	100	100
Impermeabilizante (ml)	0	100	100

Fonte: Autoria própria (2025)

Produção dos traços do CAA

A mistura será realizada em betoneira, adaptando a ordem de mistura proposta por Katayama (2016). A água total (4,0 L) será distribuída para garantir a dispersão dos aditivos, mantendo o a/c constante em todos os traços:

Concreto autoadensável sem aditivo impermeabilizante.

- I. Adicionará 10 kg da brita 0, 2,8 L de água e mistura na betoneira por 1 minuto.
- II. 5 kg de cimento, 0,4 L de água e mistura por 1 minuto.
- III. 10 kg da brita $\frac{1}{2}$, 5 kg de cimento e mistura por 1 minuto.
- IV. 20 kg de areia, e mistura por 1 minuto.
- V. Dissolver 100 ml de superplastificante em 0,8 L de água e mistura por 4 minutos.

Concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante.

- I. Adicionará 10 kg da brita 0, 2,8 L de água e mistura na betoneira por 1 minuto.
- II. 5 kg de cimento, 0,4 L de água e mistura por 1 minuto.
- III. 10 kg da brita $\frac{1}{2}$, 5 kg de cimento e mistura por 1 minuto.
- IV. 20 kg de areia, e mistura por 1 minuto.
- V. Dissolver 100 ml de superplastificante em 0,4 L de água e mistura por 1 minuto.
- VI. Dissolver 100 ml de aditivo impermeabilizante em 0,4 L de água e misturar por 4 minutos.

Para cada um dos traços do concreto será realizado os ensaios no estado fresco, os quais poderá apontar o concreto como auto adensável ou não, os ensaios a serem executados serão o Slump Flow, e o T500 que mede o tempo de escoamento até o concreto atingir o diâmetro de 500 mm. Logo após a realização dos ensaios será moldado 9 corpos de provas cilíndricos (10 cm x 20 cm) para cada tipo de concreto que passou nos ensaios de autoa, somando um total de 27 CPs.

Já no estado endurecido, os ensaios realizados serão o ensaio de compressão axial, para fazer a avaliação do desempenho mecânico principal, para isso serão ensaiados 3 CPs nas idades de 7, 14 e 28 dias. Os resultados obtidos a cada ensaio apontarão a evolução da resistência e o impacto que os aditivos impermeabilizantes causam no ganho de resistência do CAA.

Materiais utilizados na produção dos traços do CAA

Cimento

O cimento Portland escolhido como aglomerante para a produção dos diferentes traços de concreto autoadensável desse trabalho foi o CII F-32. A escolha desse tipo de aglomerante se deu pelo fato de ser um CP composto com fíler, isso significa que ele tem a adição de fíler carbonático (calcário moído) em sua composição, o que geralmente proporciona maior trabalhabilidade, oferece secagem rápida e alta resistência, proporcionando uma resistência à compressão mínima do cimento aos 28 dias de 32 MPa, e pode ser facilmente encontrado em qualquer casa de construção da região.

Para a produção dos traços do CAA, foram utilizados a mesma proporção do cimento portland sendo aplicado em cada traço 10 kg, no entanto por limitações da balança disponível no laboratório da universidade, houve a necessidade de pesar o material a cada 5 kg. No total foram utilizados 30 kg para produzir os três traços distintos do CAA.

Fotografia 4(a) e 4(b): Processo de pesagem do aglomerante.

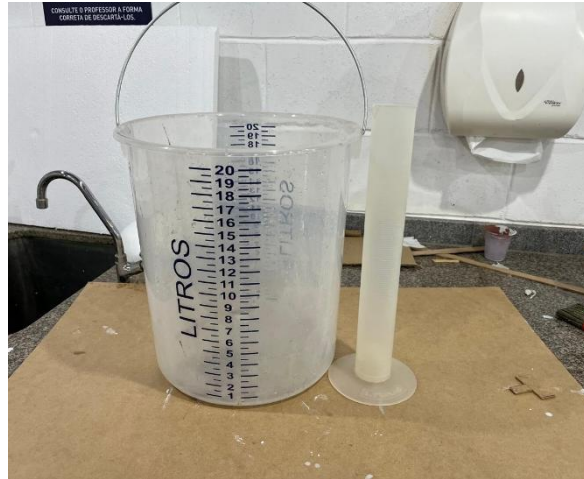


Fonte: Autoria própria (2025)

Água

A água utilizada na produção dos traços do CAA foi proveniente da rede abastecimento do Centro Universitário Integrado.

Fotografia 5: Medidores utilizados para medir as proporções de água.



Fonte: Autoria própria (2025)

Agregados

Os agregados utilizados na produção dos traços concreto autoadensável foram adquiridos em uma casa de matérias de construção da região. Foram utilizados no processo agregados miúdos e graúdos, sendo escolhido como agregado miúdo a areia fina lavada e como agregado graúdo as britas 0 (pedrisco) e a brita ½ (meia).

A areia utilizada tem a granulometria de seus grãos variantes entre 0,05mm a 0,42mm, e para cada traço do CAA foram dosados 20 kg pesados a cada 5 kg devido a limitação de peso da balança. Já as britas utilizadas na dosagem tem granulometria diametral que varia de 4,8mm a 9,5mm (brita 0) e 4,8 a 12,5mm (brita ½).

Fotografia 6(a), 6(b), 6(c) e 6(d): Processo de pesagem dos agregados.





Fonte: Autoria própria (2025)

Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi concedido por uma empresa concreteira da cidade Campo Mourão. O aditivo superplastificante é um redutor de água modificador de viscosidade, que aumenta a trabalhabilidade do concreto, dispensando a utilização de altas dosagens de água que podem comprometer a resistência do concreto.

Nos traços do concreto autoadensável foram dosados a proporção 100 ml, totalizando a utilização de 300 ml para o desenvolvimento de todo o trabalho.

Fotografia 7: Aditivo superplastificante em uma proporção de 100 ml.



Fonte: Autoria própria (2025)

Aditivos impermeabilizantes

Os aditivos impermeabilizantes utilizados na produção de dois traços do CAA foram adquiridos em uma casa de materiais de construção, são aditivos que tem a mesma proposta, sendo os dois aditivos A e B tendo ação agente por hidrofugação, porém de marcas diferentes disponível. A proporção dosada nos traços foi de 100 ml.

Tabela 3: Especificações técnicas do fabricante do aditivo impermeabilizante A.

PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS	
Densidade	1,05 g/m ³
Composição química	Silicatos
Aparência	Líquido branco
pH	12 a 13
VOC (Composto Orgânico Voláteis)	0,002 g/l
Validade	24 meses a partir da data de fabricação

Fonte: Fabricante do aditivo impermeabilizante A.

Tabela 4: Especificações técnicas do fabricante do aditivo impermeabilizante B.

PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS	
Densidade	1,000 a 1,050 g/ml
Composição química	Silicatos
Aparência	Líquido branco
pH	4,0 a 6,5
Viscosidade Brookfield	100 a 600 cPs
Validade	24 meses a partir da data de fabricação

Fonte: Fabricante do aditivo impermeabilizante B.

Fotografia 8(a) e 8(b): Aditivos impermeabilizantes em uma proporção de 100 ml.



Fonte: Autoria própria (2025)

Betoneira

A betoneira utilizada para realizar a mistura dos traços do CAA foi disponibilizada pelo Centro Universitário Integrado.

Fotografia 9: Betoneira utilizada na mistura dos traços do CAA.



Fonte: Autoria própria (2025)

Cone de Abrams

O cone de Abrams utilizado para o ensaio slump flow, que mede o espalhamento do CAA, foi disponibilizado pelo Centro Universitário Integrado.

Fotografia 10: Cone de Abrams utilizado no ensaio slump flow dos traços do CAA.



Fonte: Autoria própria (2025)

Moldes dos corpos de provas

Os moldes utilizados para moldar os corpos de provas de cada um dos traços contém medidas de 10 x 20 cm, e foram disponibilizados pelo Centro Universitário Integrado.

Fotografia 11: Moldes de corpos de provas para moldar os traços do CAA.



Fonte: Autoria própria (2025)

Corpos de provas dos traços do CAA.

Após realizar os ensaios para avaliar a fluidez dos traços dos CAA, foram moldados 9 corpos de prova de cada tipo de CAA totalizando 27 corpos de provas, esses corpos de provas foram mantidos até o dia seguinte em cura e desmoldados,

logo após foram mantidos em câmara úmida até atingir as idades de 7, 14 e 28 dias, e serão retirados da câmara úmida um dia antes do rompimento dos CPs.

Fotografia 12(a) e 12(b): Corpos de provas para ensaio de compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2025)

Prensa eletrohidráulica

Na realização do ensaio de compressão axial foi utilizada a prensa eletrohidráulica digital disponível no laboratório de construção do Centro Universitário Integrado.

Fotografia 13: Prensa eletrohidráulica digital.



Fonte: Autoria própria (2025)

RESULTADOS

Concreto autoadensável sem aditivo impermeabilizante

O traço do CAA sem aditivos impermeabilizantes apresentou no ensaio slump flow medidas de 70 cm e 72 cm de espalhamento, tendo uma média

diametral de 71 cm, e um tempo de espalhamento no ensaio T500 de 0,79 segundos.

Fotografia 14: Slump flow e T500 do CAA sem aditivo impermeabilizante.



Fonte: Autoria própria (2025)

Concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante A.

O traço do CAA com o aditivo impermeabilizante A, apresentou no ensaio slump flow medidas de 63 cm e 65 cm de espalhamento, tendo uma média diametral de 64 cm, e um tempo de espalhamento no ensaio T500 de 1,07 segundos.

Fotografia 15(a) e 15(b): Slump flow e T500 do CAA com aditivo impermeabilizante A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante B.

O traço do CAA com o aditivo impermeabilizante B, apresentou no ensaio slump flow medidas de 59 cm e 60 cm de espalhamento, tendo uma média diametral de 59,5 cm, e um tempo de espalhamento no ensaio T500 de 1,12 segundos.

Fotografia 16(a) e 16(b): Slump flow e T500 do CAA com aditivo impermeabilizante B.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ensaio de compressão axial do concreto autoadensável com e sem aditivo impermeabilizante

Os ensaios de compressão axial foram desenvolvidos em laboratório disponível no Centro Universitário Integrado. Os ensaios foram realizados em corpos de provas com idades de 7, 14 e 28 dias de cura úmida, rompendo três corpos de provas por traço de concreto autoadensável para ter uma média do ganho de resistência.

Os resultados do ensaio de compressão axial realizado aos 7 dias de idade de cura para três diferentes traços de concreto autoadensável (CAA). Observa-se que o traço de referência sem o aditivo impermeabilizante no concreto autoadensável referência (CAA-Ref), apresentou a resistência média de 8,82 MPa em ensaio. O segundo traço do concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante A (CAA+AI-A), apresentou resistência média de 17,15 MPa em seu ensaio. O terceiro traço produzido de concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante B (CAA+AI-B), apresentou resistência média de 13,11 MPa em seu ensaio, como representados na tabela 5.

Tabela 5: Resultado do ensaio de compressão axial com idade de 7 dias.

Traço 1 sem AI (CAA-Ref)		Traço 2 (CAA + AI-A)		Traço 3 (CAA + AI-B)	
CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)
1-A	7,37	2-A	16,43	3-A	12,82
1-B	9,43	2-B	17,34	3-B	13,04
1-C	9,67	2-C	17,70	3-C	13,47
Média	8,82	Média	17,15	Média	13,11

Fonte: Autoria própria (2025)

Fotografia 17: Ensaio de compressão axial com 7 dias de cura no CAA sem aditivo AI.



Fonte: Autoria própria (2025)

A tabela 6 apresenta uma média da resistência nos ensaios de compressão axial realizados aos 14 dias de idade para três diferentes tipos de traços de (CAA), onde o traço de referência do concreto autoadensável sem aditivo impermeabilizante (CAA-Ref), apresentou a resistência média de 12,61 MPa. O segundo traço de concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante A (CAA+AI-A), apresentou uma resistência média de 21,30 MPa. O terceiro traço de concreto auto adensável com aditivo impermeabilizante B (CAA+AI-B), apresentou uma resistência média de 14,89 MPa.

Tabela 6: Resultado do ensaio de compressão axial com idade de 14 dias.

Traço 1 sem AI (CAA-Ref)		Traço 2 (CAA + AI-A)		Traço 3 (CAA + AI-B)	
CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)
1-D	12,25	2-D	20,99	3-D	14,70
1-E	12,65	2-E	21,09	3-E	14,78
1-F	12,93	2-F	21,82	3-F	15,19
Média	12,61	Média	21,30	Média	14,89

Fonte: Autoria própria (2025)

Fotografia 18: Ensaio de compressão axial com 14 dias de cura no CAA com aditivo AI-B



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme a tabela 7, houve um aumento de resistência em todos os traços de (CAA) nos ensaios de compressão axial aos 28 dias de idade. Observa-se que o traço referência de concreto autoadensável sem aditivo impermeabilizante (CAA-REF), obteve uma resistência média de 14,40 MPa. O segundo traço de concreto autoadensável com aditivos impermeabilizante A (CAA+AI-A), obteve a resistência média de 24,14 MPa. O terceiro traço de concreto autoadensável com aditivo impermeabilizante B (CAA+AI-B), obteve a resistência média de 18,78 MPa.

Tabela 7: Resultado do ensaio de compressão axial com idade de 28 dias.

Traço 1 sem AI (CAA-Ref)		Traço 2 (CAA + AI-A)		Traço 3 (CAA + AI-B)	
CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)
1-G	14,94	2-G	21,24	3-G	18,90
1-H	14,47	2-H	26,08	3-H	17,90
1-I	13,80	2-I	25,11	3-I	19,55
Média	14,40	Média	24,14	Média	18,78

Fonte: Autoria própria (2025)

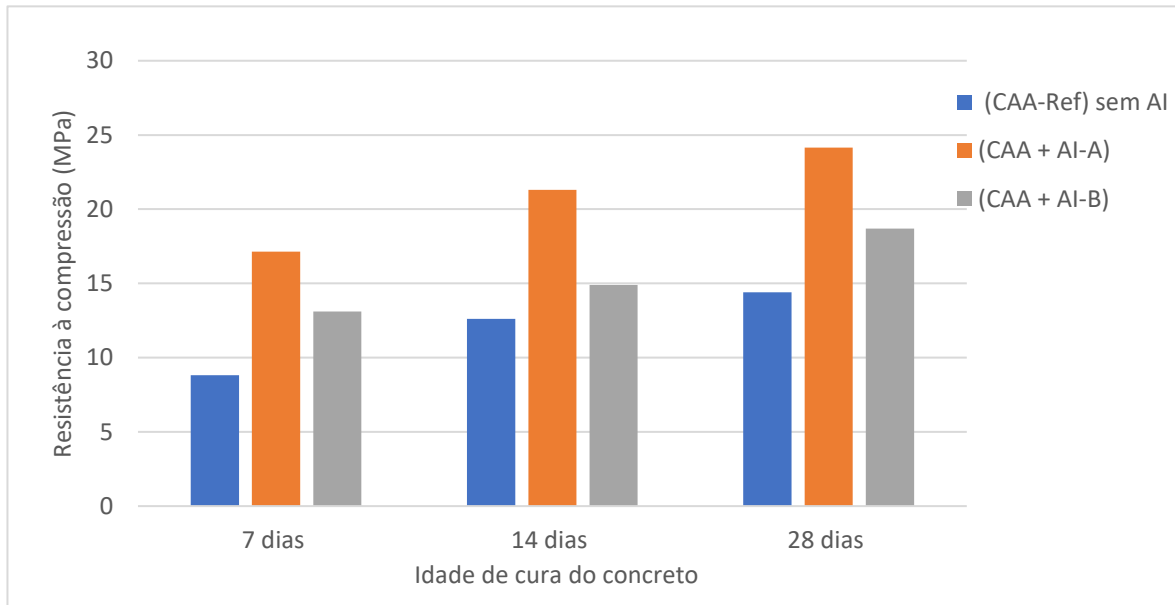
Fotografia 19: Ensaio de compressão axial com 28 dias de cura no CAA com aditivo AI-A



Fonte: Autoria própria (2025)

O gráfico 1 apresenta a evolução na média de resistência dos resultados obtidos a cada idade de cura dos traços do CAA. Os resultados do ensaio de compressão axial puderam apontar que os traços dos concretos autoadensáveis com os aditivos impermeabilizantes A e B sobressaiu em relação ao traço sem aditivo impermeabilizante.

Gráfico 1: Resistência média a compressão axial por idade.



Fonte: Autoria própria (2025)

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a incorporação de aditivos impermeabilizantes (AI) no Concreto Autoadensável (CAA) exerce uma influência direta e significativa tanto nas propriedades reológicas do estado fresco quanto no desempenho mecânico do estado endurecido.

Em relação ao autoadensamento, constatou-se que a adição de ambos os aditivos AI-A e AI-B resultou em uma redução da fluidez da mistura, evidenciada pela diminuição do Slump Flow e pelo aumento no tempo de escoamento (T500), comparado ao CAA de referência. Este comportamento é esperado devido à natureza hidrofugante dos AI e à possível interferência na ação dispersante do superplastificante. No entanto, é crucial notar que a mistura se manteve dentro dos limites da ABNT NBR 15823, preservando a característica autoadensável.

O principal achado do estudo reside no aumento de resistência à compressão axial promovido pelos aditivos impermeabilizantes em todas as idades (7, 14 e 28 dias), superando o CAA de referência. A variação de desempenho entre os traços aditivados foi o fator mais relevante, sendo o aditivo (A) significativamente superior (atingindo 24,14 MPa aos 28 dias) ao aditivo (B) 18,78 MPa. Esta diferença é atribuída à compatibilidade de pH dos produtos. O aditivo A, com pH alcalino (12 a 13), demonstrou alta compatibilidade com o ambiente da pasta de cimento (pH ≈ 13), otimizando a hidratação. Em contraste, o aditivo B, com pH ácido (4 - 6,5), provavelmente causou uma interação inibitória ou alterou a eficácia do SP, comprometendo o desenvolvimento de resistência. Além do fator pH, o ganho de resistência em ambos os casos é suportado pela ação filer dos aditivos, que contribui para a densificação e compacidade da matriz cimentícia, resultando em um material mais resistente.

Conclui-se, portanto, que a combinação entre CAA e aditivos hidrofugantes representa uma solução técnica viável e eficiente para aumentar o desempenho mecânico, mas que a seleção do aditivo deve ser criteriosa, priorizando a compatibilidade química com o sistema cimentício.

Para o aprofundamento do estudo sobre o concreto autoadensável com aditivos impermeabilizantes, recomenda-se a continuidade desta pesquisa através de estudos como, a avaliação da Permeabilidade por Capilaridade pois este ensaio é fundamental para quantificar o efeito direto do aditivo impermeabilizante (AI) na redução da absorção de água e na melhoria da estanqueidade, que é o objetivo primário destes aditivos. Estudo da durabilidade acelerada, onde possa ser realizado uma avaliação da proteção da armadura por meio do ensaio de penetração de cloretos, simulando ambientes agressivos e verificando a eficácia do AI em retardar a corrosão. Análise da interação SP e AI, aonde estudos mais aprofundados sobre a compatibilidade química e reológica entre diferentes tipos de superplastificantes e os AI, investigando como a variação de pH ou a composição dos produtos afeta o CAA no estado fresco. Caracterização microestrutural, a utilização de técnicas avançadas, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para analisar a microestrutura dos traços aditivados. Isso forneceria uma evidência científica direta da densificação da matriz ou da atuação hidrofugante, justificando o significativo ganho de resistência à compressão e o potencial aumento de durabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, acima de tudo, por ter me sustentado em cada etapa dessa longa jornada. Foram muitos os momentos em que pensei em desistir, em que o cansaço e a dúvida tentaram me parar, mas foi a tua presença, senhor, que renovou minhas forças e me mostrou que eu era capaz. Obrigado, meu Deus, por nunca me abandonar, por estar comigo em silêncio nas madrugadas de estudo, nos dias de ansiedade, e também nas pequenas conquistas do caminho. Este trabalho é fruto da tua graça.

Aos Pais: Agradecemos profundamente nossos pais, Moacir Grana Junior e Silvia Alves Moreira Grana; Alindro Viltzuk e Francielle de Jesus Pereira a quem tanto amamos e admiramos, pelo amor e apoio que sempre nos deu nessa longa trajetória.

Agradecemos a nossas esposas, Eloizi Macri e Larissa De Lima Fernandes por todo carinho, compreensão e apoio ao longo dessa jornada. E sempre que precisamos estava em nosso lado. Sua presença foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos nossos irmãos: Jeferson Henrique Grana; Kayke Viltzuk e Karoline Viltzuk agradecemos por sempre que precisamos de ajuda estava do nosso lado para nos apoiar e nos ajudar nessa jornada.

Aos nossos eternos amigos: agradecemos por estar do nosso lado ao longo desse tempo, e que ficaram muitas lembranças para nossas vidas. Peço que Deus

os abençoe e guie os seus caminhos, e que todos nós sejamos grandes profissionais.

Ao nosso orientador e professor: Gabriel Mendonça Júnior, agradecemos imensamente por todo seu apoio, paciência, incentivo, profissionalismo. Durante todos esses anos que passamos juntos, e também pela amizade construída ao longo desse tempo, onde descobrimos o verdadeiro significado de uma amizade, onde não são somente sorriso e a companhia, mas sim, a inspiração que temos quando vemos que alguém acredita e confia em você. Nossa gratidão a quem sempre fará parte de nossas vidas.

REFERÊNCIAS

1. ABNT NBR. 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
2. ABNT NBR. 15823. **Concreto Autoadensável - Parte 1: Classificação, preparo, recebimento e aceitação**. Rio de Janeiro, 2017.
3. ABNT NBR. 15900-1. **Água para amassamento do concreto: Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.
4. AMORIM, G. M.; DE SALES, K. F. P.; DE ALMEIDA, L. **A UTILIZAÇÃO DE ADITIVO SEM CONCRETOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL – GLENIUM**. 2014.
5. CAMARGO, Maria de Fátima Santos. **Pisos à base de cimento: caracterização, execução e patologias**. 2010.
6. EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. The European Federation of National Associations Representing for Concrete, 2002.
7. HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo, 1992.
8. INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO (IBI). **Manual de utilização de aditivos químicos para concreto [livro eletrônico]**: aditivos para concreto. 2. ed. São Paulo: IBI, 2021. PDF. Disponível em: <<https://ibibrasil.org.br/biblioteca-virtual/>>. Acesso em: 15 out. 2025.

9. ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017.
10. KATAYAMA, Daniela. **Estudo da influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
11. MARQUES, D. J. P. **Influência de aditivos impermeabilizantes no concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
12. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
13. MENDES, SE da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002.
14. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre, 2011.
15. NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Bookmann Editora, 2015.
16. OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003.
17. TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto Autoadensável: Propriedades e Aplicações**. São Paulo: Pini, 2004.
18. TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.