

Análise da trabalhabilidade e resistência do concreto com adição de superplastificante

Analysis of the workability and strength of concrete with the addition of superplasticizer

Análisis de la trabajabilidad y resistencia del hormigón con adicción de superplastificante

Resumo

O concreto é o segundo material mais utilizado nas construções, ficando atrás apenas da água. Com o avanço tecnológico nas edificações, faz-se necessário o emprego de concretos com características aprimoradas. Dessa maneira, com o objetivo de melhorar o desempenho do concreto, os superplastificantes têm se mostrado um componente de extrema importância devido aos efeitos gerados no compósito. Estes aditivos permitem reduzir a quantidade de água da mistura, mantendo ou aumentando a sua consistência. Portanto, influenciam diretamente na relação água/cimento, que é o fator principal na determinação das propriedades do concreto endurecido. Sendo assim, o presente artigo, estuda a influência dos superplastificantes na trabalhabilidade e na resistência à compressão dos concretos convencionais, através da comparação de diferentes dosagens de aditivo. Para isso foram feitos quatro modelos experimentais, um sem aditivo e outros três com as seguintes dosagens: 0,20%, 0,40% e 1,20%, sendo mantido constante o traço. Para cada modelo, aderiu-se o abatimento por meio do ensaio de *slump test* e foi determinado sua resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias. Diante dos resultados obtidos, notou-se um aumento elevado no abatimento do concreto e uma redução na resistência com a adição do aditivo, principalmente aos 14 dias.

Palavras-chave: concreto; aditivo; trabalhabilidade; resistência.

Abstract

Concrete is the second most used material in construction, second only to water. With technological advances in buildings, it is necessary to use concrete with improved characteristics. Therefore, to improve concrete performance, superplasticizers have proven to be an extremely relevant component due to the effects generated in the composite. These additives reduce the quantity of water in the mixture, maintaining or increasing its consistency. Therefore, they directly influence the water/cement ratio, which is the main factor in determining the properties of hardened concrete. Thus, this article studies the influence of superplasticizers on the conventional concretes workability and compressive strength by comparing different additive dosages. For this, four experimental models were made, one without additive and another three with the following dosages: 0.20%, 0.40%, and 1.20%, keeping the trace constant. For each model, the slump was measured using the slump test, and its resistance to axial compression was determined at 14 and 28 days. Given the results obtained, there was a high increase in concrete slump and a reduction in strength with the additive addition, especially at 14 days.

Keywords: concrete; additive; workability; resistance.

Resumen

El hormigón es el segundo material más utilizado en las construcciones, quedando atrás solo para el agua. Con el avance tecnológico en las edificaciones se hace necesario el empleo de hormigones con características mejoradas. De esta manera, con el objetivo

Robison Negri



Universidade Católica de Santa Catarina
robison.negri@catolicasc.org.br

André Felipe Bosco



Universidade Católica de Santa Catarina
andre.bosco@catolicasc.edu.br

Denio Gilson Ferreira

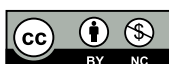


Universidade Católica de Santa Catarina
denio.ferreira@catolicasc.edu.br

Lucas Schmitz Raiser



Universidade Católica de Santa Catarina
lucas.raiser@catolicasc.edu.br



de mejorar el rendimiento del hormigón, los superplastificantes han demostrado ser un componente de extrema importancia debido a los efectos generados en el compuesto. Estos adictivos permiten reducir la cantidad de agua de la mezcla, manteniendo o aumentando su consistencia. Por lo tanto, influyen directamente en la relación agua/cemento, que es el factor principal en la determinación de las propiedades del hormigón endurecido. Siendo así, el presente artículo estudia la influencia de los superplastificantes en la trabajabilidad y en la resistencia de la compresión de los hormigones convencionales, por medio de la comparación de los diferentes dosajes de adictivo. Para eso, fueron hechos cuatro modelos experimentales, uno sin adictivo y otros tres con los siguientes dosajes: 0,20%, 0,40% y 1,20%, siendo mantenido constante el rasgo. Para cada modelo fue medido el abatimiento por medio del ensayo de slump test y determinado su resistencia a la compresión axial a los 14 y 28 días. Ante los resultados obtenidos, se percibió un aumento elevado en el abatimiento del hormigón y una reducción en la resistencia con la adicción del adictivo, principalmente a los 14 días.

Palabras clave: *hormigón; adictivos; trabajabilidad; resistencia.*

1 Introdução

O concreto é, desde sua criação até hoje, o segundo material mais utilizado em todo o mundo nas construções, ficando atrás apenas da água. Isso ocorre devido sua elevada resistência à compressão desse compósito. Além disso, sua trabalhabilidade faz com que ele seja ainda mais competitivo frente aos outros materiais, visto que se pode criar elementos das mais diversas formas. Estima-se que no mundo são consumidas três toneladas de concreto por pessoa anualmente (Rubensteien, 2012).

Dessa forma, as tecnologias acerca do concreto e seus constituintes estão em constante evolução. Um exemplo disso é a utilização de aditivos na sua composição. Os aditivos são produtos químicos que têm o objetivo de modificar as características do concreto fresco e endurecido, melhorando o seu desempenho (Rixom; Mailvaganam, 2001).

Dentre todos os tipos de aditivos, merecem destaque os redutores de água (plastificantes e superplastificantes) devido aos benefícios que conferem ao concreto durante a execução e durante a vida útil da estrutura. São consumidos anualmente cerca de 800.000 toneladas dessa classe de produtos no mundo (Aïtcin; Flatt, 2016). Sua grande aplicabilidade se dá devido ao aumento da trabalhabilidade do concreto aliado à redução de água e/ou de cimento Portland na mistura, quando dosados corretamente. A NBR 11768 (Associação Brasileira Normas Técnicas [ABNT], 2011, p.2), define essa classe de produtos como “aquele aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir seu conteúdo de água; ou como aquele aditivo que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez; ou, ainda, como aquele aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente”, sendo que, segundo a norma, a diferença entre os dois tipos de redutores se dá apenas na intensidade dos efeitos.

Sendo assim, devido às propriedades já mencionadas, Aïtcin e Mindess (2011) expõem que, do ponto de vista da resistência das estruturas de concreto armado com baixos teores de relação água/cimento, usa-se menos cimento para resistir aos esforços solicitantes, o que pode ser alcançado mais facilmente com a utilização de aditivos redutores de água, produzindo, dessa forma, concretos mais duráveis, resistentes e sustentáveis.

Neste sentido, a busca por maior compreensão da influência do uso de aditivos redutores de água, tanto na resistência à compressão axial do concreto, bem como na trabalhabilidade gerada a partir de seu uso, é de grande valia para as aplicações da Engenharia Civil. Além disso, o conhecimento do teor de dosagem de adição do produto pode possibilitar o melhor aproveitamento do aditivo e, conseqüentemente, apresentar uma redução de custo efetivo do material.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento do concreto com diferentes dosagens de aditivo superplastificante, comparando sua trabalhabilidade a partir do ensaio de *slump test*, bem com a sua resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias.

Objetivo geral

Analisar o comportamento do concreto convencional a partir de diferentes dosagens de aditivo superplastificante, quanto a sua trabalhabilidade, bem como a sua resistência à compressão axial.

Objetivos específicos

1. Executar os ensaios de caracterização dos materiais empregados na confecção dos concretos;
2. Confeccionar amostras de concreto com diferentes dosagens de superplastificante e verificar a sua trabalhabilidade através do *slump test*;
3. Ensaiar os corpos de prova quanto a resistência à compressão axial, após cura por 14 e 28 dias;
4. Comparar os resultados obtidos, para identificar a influência das diferentes dosagens do superplastificante no traço de concreto.

2 Fundamentos sobre concreto e aditivos superplastificantes

A NBR 12655 (ABNT, 2015) trata o concreto como “um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregado miúdo e graúdo, e água, com ou sem incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos) que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água)”. Seu uso ocorre nas mais diversas aplicações do setor da construção civil, sendo o compósito mais empregado na área (Rubensteien, 2012).

Entretanto, com o avanço da tecnologia e com o aumento na complexidade das edificações, faz-se necessário a utilização de concretos que possuem características melhoradas. Dessa forma, o uso de aditivos químicos incrementados ao concreto, principalmente os redutores de água, são indispensáveis.

Conforme afirma Coutinho (1997), o emprego de aditivos nas misturas não é recente, tendo em vista que no antigo império romano era comum utilizar clara de ovo, sangue, banha ou leite nos concretos e argamassas rudimentares, para melhorar a trabalhabilidade do compósito. Contudo, o uso de aditivos tecnicamente controlados no cimento Portland teve início no começo do século XX, por volta da década de 1930, com a primeira patente de fabricação e utilização de superplastificantes à base de naftaleno sulfonato, em 1938, nos Estados Unidos (Isaia, 2011). Esta inovação proporcionou a produção de concretos com baixa relação água/cimento e concretos fluidos, que são o alicerce dos atuais concretos de alto desempenho e concretos autoadensáveis.

Segundo Aïtcin e Flatt (2016) e Freitas Jr. (2017), manter constante a relação água/cimento e, ao mesmo tempo, aumentar a trabalhabilidade do concreto só é possível devido à superfície carregada positivamente do aditivo aderir aos grãos do cimento, permitindo que a carga negativa fique exposta, promovendo a dispersão dos grãos do ligante. Neville (2016), ainda, associa essa repulsão dos grãos de cimento com a utilização de aditivos, propiciando, dessa forma, melhor hidratação do cimento, que resulta no aumento da trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto.

Ainda segundo o tema, Mehta e Monteiro (2014) relatam que o uso desses aditivos representa uma das soluções encontradas para a otimização dos traços para a produção de concreto. Entretanto, a maior ou menor efetividade dos aditivos está relacionada a diversos fatores no momento da mistura, como a concentração de cada aditivo, tempo de mistura, a energia de mistura, o tipo de cimento, a temperatura do ambiente, os materiais que constituem o concreto e a porosidade dos agregados, visto que a maior absorção de água nos agregados interfere na relação água/cimento (Neville; Brooks, 2013).

De acordo com Aïtcin e Flatt (2016), a relação água/cimento é o fator principal na determinação das propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, visto que a durabilidade do produto está diretamente ligada a esse fator.

Segundo Passos e Bonato (2018), a não utilização de aditivos geralmente faz com que sejam necessárias correções de abatimento de água *in loco* para facilitar o lançamento e adensamento, o que diminui a durabilidade do concreto. Sendo assim, Maciel *et al.* (2020) verificaram que ao corrigir o abatimento do concreto com água houve uma diminuição da resistência mecânica de 7,25% aos 28 dias, enquanto ao utilizar aditivo superplastificante houve um acréscimo de 16,52% na resistência.

Além do aumento na trabalhabilidade e durabilidade, a utilização de aditivos favorece o ganho de resistência dos concretos. El-Gamal, Fawzia e Asmaa (2012) verificaram que a utilização de aditivos redutores de água à

base de lignosulfonato, em diferentes dosagens, proporciona um aumento gradativo na resistência do concreto. Segundo os autores, esse efeito está relacionado ao elevado grau de dispersão que o aditivo causa no sistema durante a hidratação, fazendo com que ocorra a diminuição do número de poros e, conseqüentemente, haja um aumento de desempenho mecânico.

Contudo, os benefícios encontrados com a utilização de aditivos superplastificantes não se restringem apenas às características mecânicas, mas também à sustentabilidade gerada a partir de seu uso, visto que esses produtos possibilitam uma redução considerável no consumo de cimento Portland e/ou água, quando dosados corretamente. Isso acontece, pois quando utilizados para fins de aumento da resistência à compressão, reduzem-se a quantidade de água adicionada e as seções mínimas portantes, reduzindo, dessa forma, o volume total da estrutura e dos materiais utilizados (Bastos, 2016).

Aïtcin e Flatt (2016) ilustram que um pilar não armado de concreto projetado para suportar uma carga L pode ser dimensionado com um concreto com resistência à compressão de 25 Mpa e outra com 75 Mpa. No primeiro caso, onde não houve a utilização de aditivo, obtiveram uma área de seção transversal três vezes maior que no segundo, e o consumo de cimento necessário foi de 300 kg/m³. Já no segundo caso, o consumo de cimento foi de 450 kg/m³, com a adição de aditivo superplastificante. Entretanto, apesar de ter havido um aumento de 50 % no consumo de cimento, devido à resistência à compressão ser três vezes maior, o volume total de concreto necessário seria três vezes menor.

Ainda sobre os benefícios de se utilizar os aditivos superplastificantes, nota-se que a baixa relação água/cimento contribui com a diminuição de manifestações patológicas na edificação, como apontado por Mofardini (2014): “a utilização dos superplastificantes está crescendo com a maior demanda de sustentabilidade, especialmente com o ponto de vista na durabilidade. Para fazer um concreto durável aos agentes e ambientes agressivos temos que reduzir a porosidade por meio da redução de água, pois com uma menor quantidade de água no sistema podemos avançar um concreto com menor permeabilidade de água e assim reduzir drasticamente a migração por cloretos e a carbonatação do concreto”.

3 Aditivos superplastificantes

A NBR 11768 (ABNT, 2011), define os superplastificantes da seguinte maneira:

Aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução do conteúdo de água de um concreto; 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. NBR 11768 (ABNT, 2011, p. 3).

Além disso a norma também distingue os aditivos em duas classes, superplastificantes tipo I e tipo II, sendo a diferença entre eles basicamente na redução mínima de água obtida com sua utilização, sendo 12% no tipo I e 20% no tipo II.

Já Yazigi (2013) define os aditivos superplastificantes da seguinte forma:

É aditivo que atua como plastificante, mas de modo muito mais intenso e geralmente durante um período de tempo limitado, após o que o concreto volta à consistência normal. Em geral, os superplastificantes são utilizados para obter concretos fluido auto-adensáveis. Esses concretos são usados no caso de concretagem de peças delgadas, verticais com grande altura, ou mesmo peças de desenho muito complexo. A variação do teor de aditivo – geralmente compreendido entre 1% e 3% – influencia o efeito sobre o concreto e, conforme o aditivo pode modificar o tempo de permanência do efeito de superplasticidade. (Yazigi, 2013, p. 284).

Os superplastificantes são produtos sintéticos obtidos por meio de técnicas de polimerização, e possuem, em sua composição principal, sais condensados de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato (Isaia, 2011).

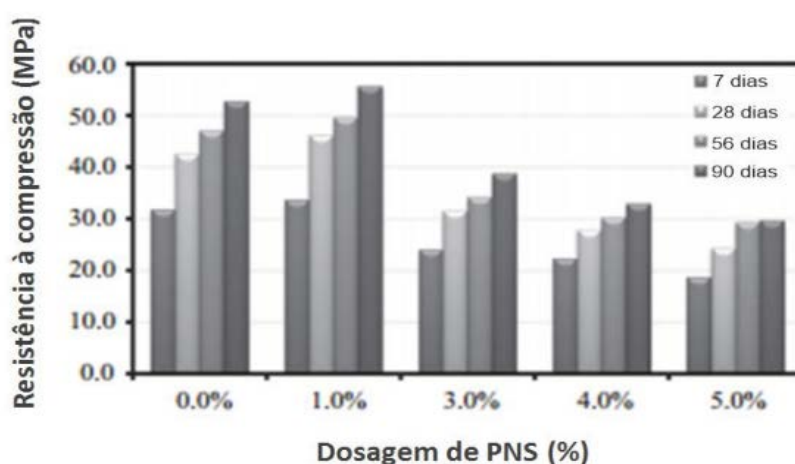
Os primeiros superplastificantes fabricados foram os PNS (Polinaftaleno sulfonatos), sendo os mais comercializados até o início dos anos 2000 (Edmeades; Hewlett, 1998). Quimicamente, os PNS são constituídos de cadeias carbônicas, obtidas a partir de uma sequência de reações de sulfonação, condensação, neutralização e filtração. Uma de suas vantagens é o fato de não alterar a estabilidade da rede de poros de concretos com

ar incorporado que estão sujeitos ao fenômeno de congelamento-degelo, justificando a grande utilização em países da América do Norte (Aïtcin; Flatt, 2016).

Sobre o mecanismo de funcionamento dos PNS, Corrêa (2010) relata que “apesar do mecanismo de reação dos PNS ser por repulsão eletrostática como nos plastificantes, as características da reação são diferenciadas, uma vez que os sulfatos com maior peso molecular têm alto efeito dispersante e plastificante e o fato de apresentarem poucos efeitos secundários, como retardamento de pega e incorporação de ar, permitem uma maior dosagem, proporcionando maior dispersão”.

Em relação ao desempenho mecânico, Topçu e Atesin (2016) analisaram a influência de um aditivo à base de PNS na resistência à compressão de argamassas de cimento Portland. Como resultado, os autores verificaram que há uma dependência do ganho de resistência com o tempo e com a dosagem do aditivo. Com 1 % do produto adicionado, observou-se um pequeno e contínuo ganho de resistência. Já nas dosagens de 3 %, 4 % e 5 %, houve queda de resistência, atrelada a problemas de superdosagem. A Figura 1 ilustra a análise feita pelos autores.

Figura 1 – Resistência à compressão em função da dosagem de aditivo à base de PNS.



Fonte: adaptado de Topçu e Atesin, 2016.

Outra formulação de aditivos muito utilizada é a dos Policarboxilatos Éster (PCE). Os PCE's são considerados a última geração de superplastificantes disponibilizados no mercado. Sua estrutura química é formada por uma cadeia principal constituída por grupos carboxílicos, e por cadeias laterais não iônicas formadas por poliésteres, atreladas à cadeia principal (Aïtcin; Flatt, 2016).

No que diz respeito ao seu mecanismo de ação, Mehta; Monteiro (2014) relatam que os PCE's inibem os sítios reativos ao longo da dispersão. Sendo assim, pela repulsão dos ésteres, pequenas barreiras são formadas entre as partículas de cimento após a adsorção na superfície da cadeia. Desse modo, como o efeito da repulsão dos ésteres é mais eficaz que a repulsão eletrostática, justifica-se a maior influência no aumento do *slump*, mesmo com dosagens menores em comparação com os plastificantes comuns.

Já quanto à hidratação do cimento, Rojas e Cincoto (2013) demonstram como a estrutura molecular dos aditivos à base de policarboxilatos interfere nessa etapa. Segundo as autoras, o retardo na hidratação ocorre devido à formação de uma camada que envolve os grãos de cimento durante o efeito de dispersão, impedindo, desta forma, o contato direto com a água e sua dissolução.

Sobre os efeitos gerados pela combinação de sulfato de sódio e PCE's na hidratação de um cimento Portland CP I, Kumar *et al.* (2012) observaram que a adição do superplastificante reduz o tamanho dos poros gerados, diminui a percolação de água e aumenta a resistência à compressão aos 28 dias.

No que diz respeito ao desempenho mecânico, outro ponto a ser observado é que a redução da relação água/cimento pode aumentar a resistência à compressão devido a diminuição da distância entre as partículas, aumentando a densidade da matriz.

A excelente dispersão das partículas de cimento na água, causada pela adição de um superplastificantes e acompanhada por uma redução na relação água/cimento, pode, em alguns casos, acelerar a taxa de hidratação do cimento e o desenvolvimento da resistência do concreto. O aumento da resistência mecânica deve-se à redução de água da mistura se mantida uma dada trabalhabilidade, pois há uma redução da distância entre as partículas de cimento e os produtos hidratados, resultando em uma matriz hidratada com maior densidade e menor porosidade. (Mehta; Monteiro, 2008, citado por Isaia, 2011, p. 359)

Kurtz (2016), comprova a argumentação anterior relacionando a resistência à compressão de três misturas de concreto, sendo uma sem aditivo e as outras duas com superplastificantes distintos. A Tabela (1) traz o resultado dos ensaios:

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de compressão axial.

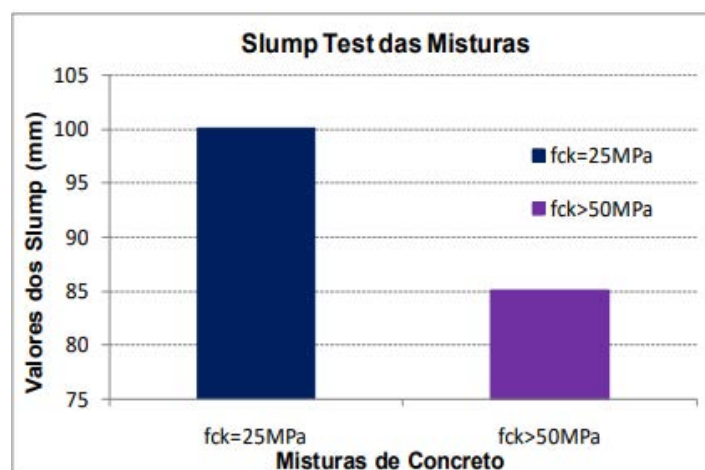
Aditivo	Fator		Resistência em MPa		
	Água/cimento	Slump	1 dia	7 dias	28 dias
Sem aditivo	0,58	10,5 cm	8,50	26,86	32,78
Sem aditivo			8,62	17,75	33,04
Naftaleno	0,51	10,5 cm	12,34	35,01	40,22
Naftaleno			12,65	35,74	41,43
Policarboxilato	0,40	17,0 cm	19,00	48,26	55,00
Policarboxilato			18,56	47,91	55,70

Fonte: adaptado de Kurtz, 2016.

Bastos (2016) também reflete sobre o tema estudando o efeito dos superplastificantes na resistência à compressão das argamassas. No estudo, o autor afirma que, em sistemas baseados em CPI, a adição de 0,4 % de aditivo PNS resultou em um aumento de 20 % na resistência mecânica aos 28 dias, se comparado ao sistema de referência; a adição de 0,4 % de aditivo PCE I resultou em 118% de acréscimo na resistência, se comparado ao sistema de referência; e a adição de 1,5 % de PCE II resultou em um acréscimo de 43 % na resistência, se comparado ao sistema de referência. A porcentagem de aditivo utilizada no trabalho foi baseada na quantidade de cimento Portland da argamassa.

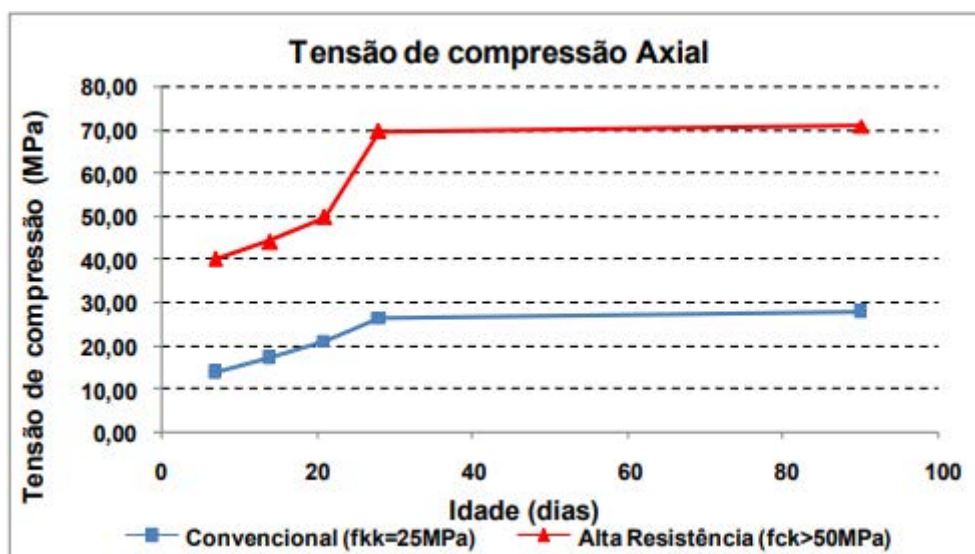
Seguindo o mesmo princípio, Fernandes *et al.* (2020) demonstram, por meio de seu estudo, a influência dos aditivos superplastificantes na produção dos concretos de alta resistência. Para isso, os autores compararam um concreto convencional com um concreto com adição de microssílica e aditivo superplastificante policarboxílico. Além de relacionar a resistência à compressão, o estudo também traz um comparativo acerca do abatimento das misturas por meio do ensaio de *slump test*. As Figuras 2 e 3 retratam o exposto.

Figura 2 – Resultado dos testes de consistência para o concreto convencional e de alta resistência.



Fonte: Fernandes et al., 2020.

Figura 3 – Comparação das tensões de compressão axial de ruptura do concreto convencional e concreto de alta resistência.



Fonte: Fernandes *et al.*, 2020.

4 Materiais e Métodos

O estudo foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Católica de Santa Catarina em Joinville, Santa Catarina. Para a produção de concreto foi utilizado como aglomerante o cimento CP II-Z-32 da linha Votorantim, areia média lavada, brita número 1, ambos comercializados por materiais de construção da cidade, água proveniente do sistema de abastecimento da rede pública de Joinville (Companhia Águas de Joinville) e aditivo superplastificante ADVA FLOW 837 desenvolvido pela GCP Applied Technologies.

A metodologia de pesquisa pode ser dividida em cinco etapas: Caracterização dos materiais, dosagem do concreto, produção e realização dos ensaios de consistência dos concretos, método de cura e ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.

4.1 Caracterização dos materiais

A fase de caracterização dos materiais foi realizada de forma direta para ambos os agregados (miúdos e graúdos), com o objetivo de caracterizar sua granulometria, massa unitária e o teor de umidade do agregado miúdo. Para tanto, realizaram-se os ensaios de distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo, de acordo com os procedimentos da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa unitária, no estado solto dos agregados, foi estimada de acordo com os critérios da norma NBR NM 16972 (ABNT, 2021). Por fim, a determinação do teor de umidade do agregado miúdo foi realizada através da secagem de uma amostra do material em estufa durante 24 horas e constância de massa, sendo o teor de umidade a porcentagem representada pela diferença de massa encontrada antes e após a secagem, como determina a NBR 6457 (ABNT, 2016).

4.2 Dosagem do concreto

O concreto estudado foi projetado para um traço de baixa concentração de cimento em relação aos agregados (376 kg/m^3), visto que se tinha por objetivo um *slump* muito pequeno para o concreto de referência. Dessa forma, determinou-se o traço em peso de 1:2:2,5:0,54, sendo cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. O traço foi mantido constante para todos os experimentos.

A variável de estudo foi a quantidade de aditivo superplastificante, como mostra a Tab. (2).

Tabela 2 – Proporção de materiais em cada experimento.

Materiais	Traço Adotado			
	Referência	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00
Agregado miúdo	2,00	2,00	2,00	2,00
Agregado graúdo	2,50	2,50	2,50	2,50
Aditivo	0,00%	0,20%	1,20%	0,40%
Água	0,54	0,54	0,54	0,54

Fonte: Autores, 2022.

A quantidade de aditivo superplastificante em cada experimento foi determinada de acordo com a faixa de intervalo dada pelo fabricante do produto, sendo recomendada a variação entre 0,20% e 1,20% em relação à massa de cimento. Desse modo, foram realizadas quatro rodadas experimentais, a primeira sem aditivo, outras duas com a quantidade mínima e máxima recomendadas, e, por fim, uma quantidade intermediária, sendo o último experimento definido durante os ensaios, em função dos resultados do *slump* obtidos para os dois experimentos anteriores.

4.3 Produção e realização dos ensaios de consistência

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de 120 litros. O lançamento dos materiais ocorreu com o equipamento ligado e na seguinte ordem: massa total do agregado graúdo, 70% da massa de água, massa total de agregado miúdo, massa total de cimento e o restante da massa de água. O método de mistura considerou o tempo de três minutos para lançamento e pré-mistura, dois minutos de descanso estático e posteriormente mais dois minutos de mistura final.

A consistência do concreto foi aferida pelo método do ensaio do índice de consistência *slump test*, conforme recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A produção do concreto foi realizada em dois dias distintos, tendo 14 dias de intervalo entre eles, controlando assim a idade de cura dos corpos de provas a serem ensaiados à compressão axial com 14 e 28 dias.

4.4 Método de cura

Os corpos de prova moldados foram acondicionados no laboratório, em local coberto, curando ao ar durante 24 horas, tendo sido, após este período, desformados, seguindo todas as orientações da norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Após a desforma, todos os corpos de prova foram curados de forma úmida, através da sua submersão em água, até o dia do ensaio à compressão.

4.5 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova

Os corpos de provas foram previamente planejados, em máquina retificadora, composta por disco de corte em alta rotação resfriado com água corrente, não tendo sido, dessa forma, capeados.

O ensaio de compressão foi realizado em prensa hidráulica da marca EMIC Serie 23 com estrutura de compressão de 2000 kN, de acordo com todas as orientações da norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram rompidos todos no mesmo dia, separados em duas remessas de acordo com a idade de cura de 14 e 28 dias.

5 Resultados e Discussões

5.1 Caracterização dos agregados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados miúdo e graúdo, referente à granulometria, módulo de finura e diâmetro máximo são apresentados nas Tab. (3) e Tab. (4).

Tabela 3 – Análise granulométrica do agregado miúdo.

Resumo da análise granulométrica do agregado miúdo					
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Varição das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2			
4,75	0,2%	0,2%	0,0%	0,2%	0,2%
2,36	1,0%	1,4%	0,4%	1,2%	1,4%
1,18	8,3%	7,3%	1,0%	7,8%	9,2%
0,6	29,1%	23,4%	5,6%	26,2%	35,4%
0,3	33,1%	31,7%	1,4%	32,4%	67,8%
0,15	23,6%	30,2%	6,6%	26,9%	94,7%
Fundo	4,8%	5,8%	1,0%	Módulo de finura	2,09

Fonte: Autores, 2022.

Tabela 4 – Análise granulométrica do agregado graúdo.

Resumo da análise granulométrica do agregado graúdo					
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Varição das % retidas <= 4 %	Média das massas retidas (%)	Massa retida acumulada (%)
	Ensaio nº 1	Ensaio nº 2			
19	5,6%	5,5%	0,1%	5,6%	5,6%
12,5	68,1%	65,9%	2,2%	67,0%	72,6%
9,5	18,8%	20,0%	1,2%	19,4%	92,0%
6,3	6,0%	6,3%	0,3%	6,2%	98,1%
4,75	1,0%	1,2%	0,2%	1,1%	99,2%
2,36	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	99,2%
Fundo	0,5%	1,1%	0,6%	Diâmetro máximo	19 mm

Fonte: Autores, 2022.

A maior parte da massa retida do agregado miúdo ficou entre as peneiras de 0,15 mm a 0,6 mm, resultando em módulo de finura de 2,09. Desse modo, segundo seu módulo de finura, conforme propõe a NBR NM 248 (ABNT, 2003), o agregado é classificado como areia fina, entretanto, se considerada a quantidade de massa retida na peneira 0,15 mm, este se aproxima da transição para uma areia média, sendo assim, espera-se um comportamento mais próximo da areia média.

Quanto ao agregado graúdo, percebeu-se uma maior retenção na peneira de 12,5 mm, resultando, dessa forma, em um diâmetro máximo característico de 19 mm. Sendo assim, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), o material pode ser classificado como brita 1.

Quanto à massa unitária dos agregados, as Tab. (5) e Tab. (6) demonstram os resultados obtidos nos ensaios para os dois agregados utilizados.

Tabela 5 – Massa unitária do agregado miúdo.

Massa unitária (Agregado miúdo)			
Amostra	Volume (cm³)	Massa (g)	Massa unitária (g/cm³)
1	5968,9	8830	1,48
2	5968,9	8538	1,43
3	5968,9	8851	1,48
Média			1,46

Fonte: Autores, 2022.

Tabela 6 – Massa unitária do agregado graúdo.

Massa unitária (Agregado graúdo)			
Amostra	Volume (cm³)	Massa (g)	Massa unitária (g/cm³)
1	5968,9	8331	1,40
2	5968,9	8483	1,42
3	5968,9	8389	1,41
Média			1,41

Fonte: Autores, 2022.

Os agregados miúdo e graúdo apresentaram massa unitária de 1,46 g/cm³ e 1,41 g/cm³, respectivamente. Portanto, segundo estabelece a NBR NM 16972 (ABNT, 2021), os materiais são classificados como sendo normais ou médios em relação à massa unitária.

Como a preparação dos concretos foi realizada em dois dias, fez-se o controle da umidade presente no agregado miúdo na primeira rodada experimental (corpos de prova rompidos aos 28 dias), sendo a umidade registrada igual a 3,6%, e, na segunda rodada (corpos de prova rompidos aos 14 dias), com umidade de 2,9%. Em ambos os dias, o teor de umidade não apresentou valores significativos, sendo caracterizados somente pela presença de umidade higroscópica, visto que os materiais utilizados se encontravam abrigados no laboratório.

5.2 Índice de consistência do concreto

Os resultados do índice de consistência obtidos nos corpos de prova destinados ao rompimento aos 28 dias, em função das dosagens experimentais, são apresentados na Tab. (7). Já na Tabela 8 são apresentados os resultados do índice de consistência dos corpos de prova rompidos aos 14 dias.

Pode-se verificar grande sensibilidade do concreto fresco em relação ao incremento de aditivo, sendo que, para a dosagem de 1,20 % de aditivo, o concreto fresco apresentou o abatimento máximo.

Tabela 7 – Índice de consistência dos experimentos rompidos aos 28 dias.

Experimento	Dosagem de aditivo (%)	Abatimento (cm)
1	0	4,75
2	0,20 %	17,5
3	0,40%	21,5
4	1,20 %	-

Fonte: Autores, 2022

Tabela 8 – Índice de consistência dos experimentos rompidos aos 14 dias.

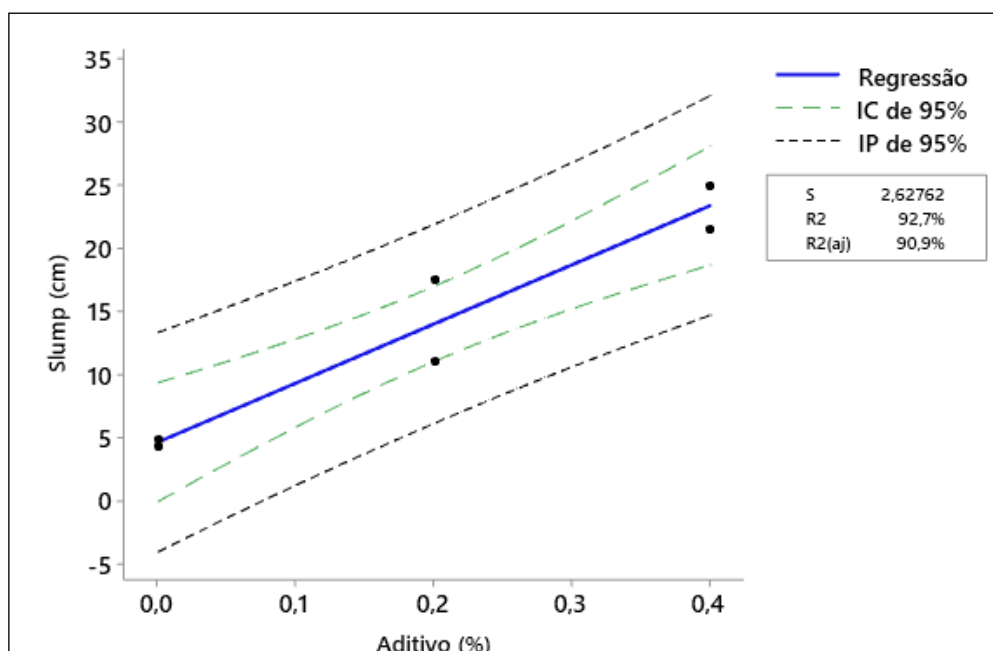
Experimento	Dosagem de aditivo (%)	Abatimento (cm)
1	0	4,2
2	0,20 %	11
3	0,40 %	25
4	1,20%	-

Fonte: Autores, 2022.

No entanto, de acordo com o modelo de regressão linear, apresentado na Fig. (4), a dosagem máxima para atingir o abatimento igual a 30 cm seria na casa do 0,55%, isto é, acima desta dosagem não seria recomendado a adição sem que houvesse uma redução na relação água/cimento.

A taxa de evolução do ganho de abatimento foi da ordem de 47 centímetros por percentual de dosagem de aditivo.

Figura 4 – Modelo de regressão linear do abatimento.



Fonte: Autores, 2022.

Conforme o princípio de atuação do presente aditivo, os grãos do cimento sofrem repulsão ao entrar em contato com o aditivo, visto que o produto, por estar carregado positivamente, ao interagir com os grãos do cimento, permite que a carga negativa fique exposta, causando a dispersão dos grãos do ligante.

O custo por centímetro de ganho no abatimento em um metro cúbico foi de 4,397 reais.

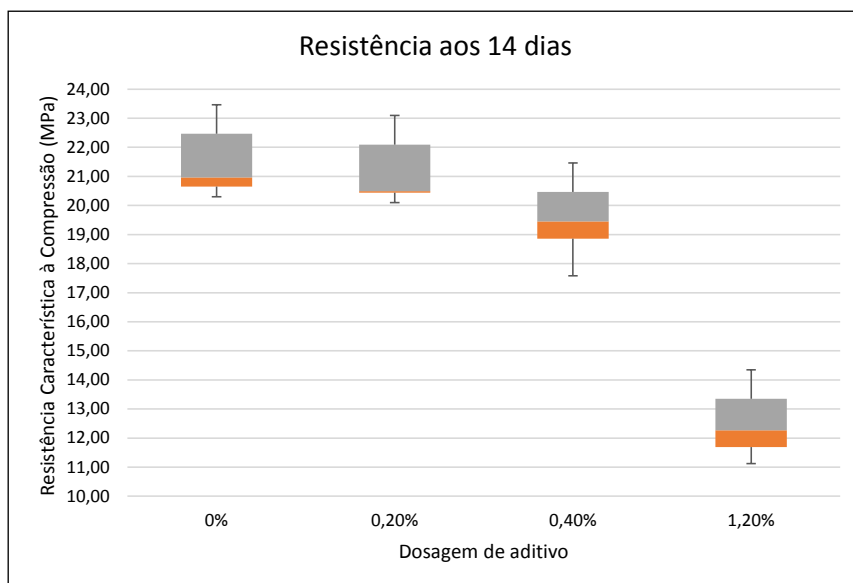
5.3 Resistência à compressão do concreto

Os gráficos das Fig. (5) Fig. (6) apresentam os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias, respectivamente.

Analisando os dados das resistências aos 14 dias, percebeu-se uma assimetria positiva entre os resultados com 0,0% e 0,20% de aditivo, o que indica uma maior dispersão dos resultados com tendência para os valores mínimos. Já nos resultados das amostras com 0,40% e 1,20% de aditivo, notou-se uma simetria indicando uma menor dispersão entre eles.

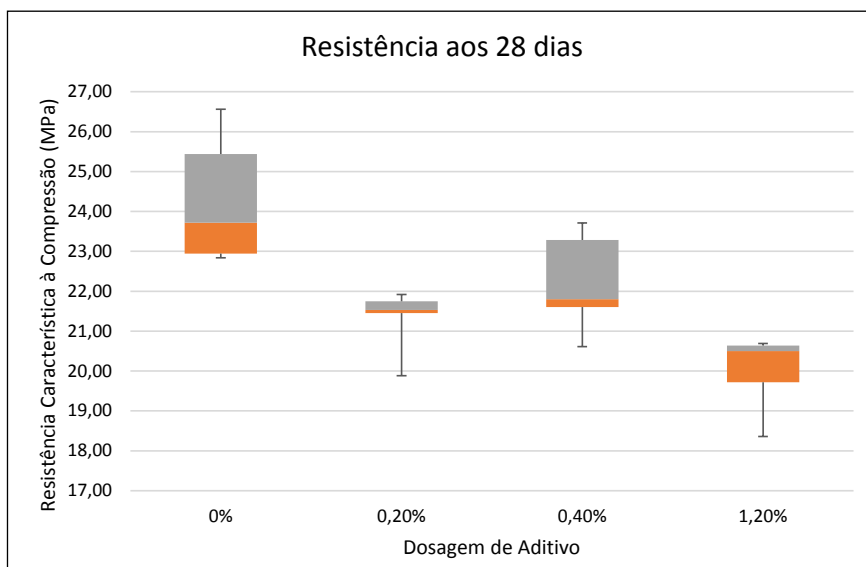
Quanto aos dados de resistência aos 28 dias, notou-se que os resultados das amostras apresentaram comportamentos diferentes quanto à dispersão. No experimento com 0,0% de aditivo, foi possível observar uma assimetria positiva e uma maior amplitude entre os dados, bem como um distanciamento do valor máximo, denotando uma tendência dos resultados para os valores mínimos e uma maior dispersão entre eles. No modelo com 0,20%, notou-se uma menor amplitude gráfica e um distanciamento do valor mínimo, o que revela uma menor dispersão entre os resultados e uma tendência para os valores máximos. No modelo com 0,40%, assim como no primeiro modelo, há uma maior amplitude dos resultados e uma assimetria positiva, denotando uma dispersão um pouco maior e uma tendência para os valores mínimos. No modelo com 1,20%, observa-se um distanciamento do valor mínimo, uma assimetria negativa e uma menor amplitude entre os resultados, revelando uma menor dispersão entre os dados e uma tendência dos resultados para os valores máximos.

Figura 5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 14 dias.



Fonte: Autores, 2022.

Figura 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

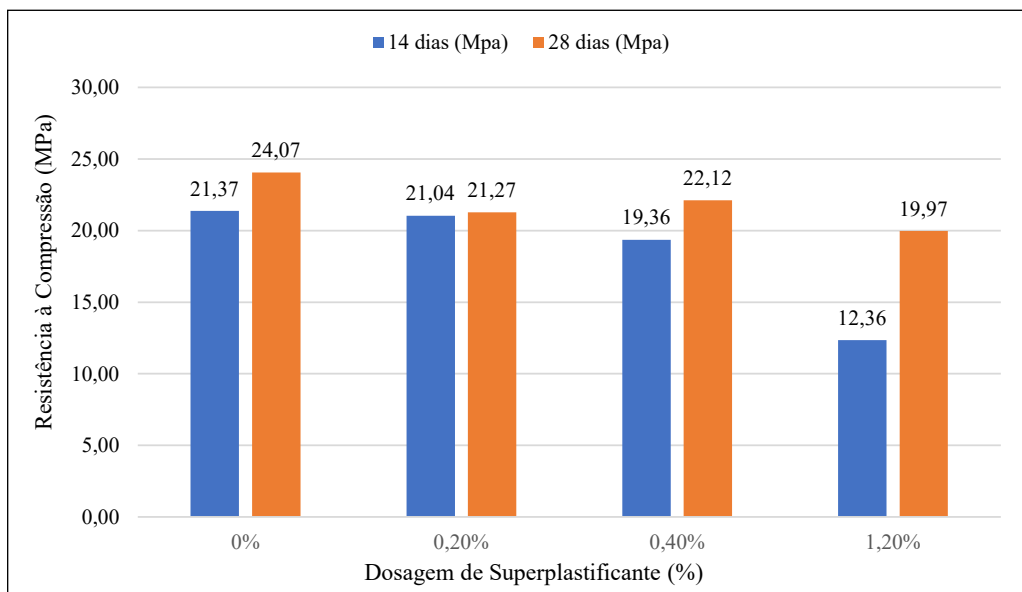


Fonte: Autores, 2022.

Os resultados das médias de resistência à compressão axial, aos 14 dias e 28 dias, são apresentados no gráfico da Fig. (7). De forma geral, pode-se observar uma redução da resistência com o aumento da quantidade de aditivo quando se mantém a relação água/cimento, principalmente aos 14 dias, devido ao retardo na hidratação do concreto. Isso possivelmente tem relação com a camada impermeabilizante gerada pelo superplastificante nos grãos do cimento, que impede seu contato direto com a água e, por consequência, sua dissolução. Entretanto, no estado endurecido, os resultados não deveriam apresentar muita diferença, visto que se manteve o traço para todos os modelos. Além disso, nota-se que aos 28 dias não houve relação direta da redução de resistência com o aumento da dosagem de aditivo, visto que as amostras com 0,20% de aditivo apresentaram menor resistência que as com 0,40%. As amostras com 1,20% de aditivo em todos os testes apresentaram uma queda mais aguda da resistência, sendo consequência de uma superdosagem do produto. O excesso de aditivo faz com que não haja consistência no material, deixando-o em estado líquido. Desse

modo, há uma segregação entre os agregados graúdos e a pasta de cimento, fazendo com que a resistência mecânica diminua, visto que os agregados graúdos têm função relevante na resistência do elemento.

Figura 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 14 e 28 dias.



Fonte: Autores, 2022.

6 Conclusão

Ao fim do trabalho, foi possível concluir que os objetivos propostos inicialmente foram alcançados. Compararam-se as propriedades de consistência e resistência à compressão do concreto convencional e do concreto com aditivo com diferentes dosagens do produto, a fim de analisar sua real influência no material.

Dessa maneira, analisando os resultados, pode-se concluir que os superplastificantes têm como função principal o aumento da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, visto que pequenas quantidades do produto já são suficientes para aumentar consideravelmente o abatimento do material. Além disso, foi possível concluir que o aumento da dosagem do produto é proporcional ao aumento do abatimento gerado e que dosagens iguais ou superiores a 1,20% são desnecessárias, visto que o compósito entra em seu estado líquido.

É possível concluir que a dosagem máxima para atingir o abatimento igual a 30 cm, nas condições estudadas seria na casa do 0,55%, não sendo recomendada a aplicação de dosagens superiores sem que houvesse uma redução na relação água/cimento.

Quanto à resistência, os resultados mostraram que não há relação direta do uso de aditivo com o aumento da resistência mecânica. Nesse sentido, conclui-se que o aumento na resistência está diretamente ligado à redução da quantidade de água e não no uso de aditivo superplastificante.

Ademais, analisando os resultados, pode-se notar que houve uma diminuição da resistência a partir de sua utilização, principalmente aos 14 dias, sendo que quanto maior a quantidade de aditivo, menor a resistência obtida. Esse fato pode ser reflexo do retardo da hidratação do concreto, obtendo-se a resistência com um tempo maior de cura.

Dito isso, quando não há redução na quantidade de água, percebem-se vantagens na utilização do aditivo quando empregado em doses baixas, visto que, dessa forma, há um ganho expressivo de abatimento e uma queda incipiente de resistência, proporcionando mais facilidade no adensamento, redução de segregações, facilidade de lançamento e melhor acabamento.

Além disso, quando há redução na quantidade de água, o aditivo também se mostra vantajoso no uso para aumento de resistência mecânica, sendo ele o responsável por proporcionar a redução da quantidade de água, fator determinante no aumento da resistência.

Entretanto, seu uso só se justifica para aplicações que exigem um concreto mais adensável como é o caso de elementos com elevada taxa de armadura, lançamentos com alturas muito grandes, recuperações estruturais, correções de abatimento etc.

Nesse sentido, não havendo necessidade de aumento de trabalhabilidade ou de resistência além do que usualmente é obtido com concretos convencionais, não se justifica o uso dos superplastificantes, visto que seu emprego elevaria o custo do concreto.

Considerando que no presente trabalho não se alterou a quantidade de água em nenhum dos experimentos produzidos, sugere-se, como complemento futuro, o aumento de resistência que pode ser alcançado a partir da redução de água com o uso de aditivo.

Além disso, para que o conhecimento técnico acerca desse assunto evolua cada vez mais, faz-se necessária a análise de outras propriedades relacionadas ao uso de superplastificantes no concreto, como o tempo de retardo gerado na hidratação, o aumento de resistência mecânica mediante a redução de água, a diminuição de manifestações patológicas a partir de concretos mais adensáveis, a redução de cimento Portland gerada com o uso de superplastificantes, e demais temas que possam vir a contribuir nesse sentido.

Referências

- AÏTCIN, P. C.; FLATT, J. R. **Science and Technology of Concrete admixtures**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
- AÏTCIN, P. C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. London: Spon Press, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 11768**: aditivos para concreto de cimento Portland. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16972**: agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 6457**: amostras de solo — preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 12655**: concreto – controle, preparo e recebimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento tronco cone: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BASTOS, A. P. O. **Análise da Influência de Aditivos Superplastificantes no Comportamento de Pastas de Cimento Portland com e sem Adição de Fíler Calcário**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/159631>. Acesso em: 08 set. 2022.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 1. p. 135-184.
- CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CP III-40**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://poscivil.uff.br/estudo-do-desempenho-dos-aditivos-plastificantes-e-polifuncionais-em-concretos-de-cimento-portland-tipo-cpii-40/>. Acesso em: 23 ago. 2022.

- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. v. 1. 610 p.
- EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement admixtures. *In*: HEWLETT, P. C. (ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4th. ed. Oxford: Elsevier Science e Technology Books, c1998. p. 841-905.
- EL-GAMAL, S. M. A.; FAWZIA, M. AI-N.; ASMAA, O. AI-B. Effect of superplasticizers on the hydration kinetic and mechanical properties of Portland cement pastes. **Journal of Advanced Research**, Amsterdã, v. 3, n. 2, p. 119-124, 8 maio 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.008>
- FERNANDES, S. C. et al. Produção de concreto de alta resistência com utilização de superplastificante e adição de microssílica. **Reserach Journal**, Manaus, v. 9, n. 12, p. 1-14, 28 dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11380>
- FREITAS JUNIÓR, J. A. **Aditivos e adições minerais para concreto**. 2017.
- ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Editora Arte Interativa, 2011. v. 1.
- KUMAR, M.; PRATAP, N. SANJEY, K. BAHADUR, N. Combined effect of sodium sulphate and superplasticizer on the hydration of fly ash blended Portland cement. **Materials Research**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 177-183, apr./june 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000200010>
- KURTZ, C. **Aditivos químicos redutores de água para concreto de cimento portland**. Florianópolis: Kurtz Empreendimento, 2016. 21 p.
- MACIEL, L. D.; COELHO, A. R.; PEREIRA, H. R. S. Estudo das propriedades do concreto convencional com aditivo ou adição de água para correção de consistência. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1211>
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.
- MONFARDINI, L. **Hiperplastificantes e superplastificantes para concreto: uma expansão sustentável**. **Revista Construchemical**, São Paulo, n. 16, p. 10-18, 2014. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.construchemical.com/edicao/16/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. Acesso em: 8 maio 2012.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.
- RIXOM, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical Admixtures for Concrete**. 3rd. ed. Taylor & Francis, 2001.
- ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 267-283, july/sept. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000300016>
- RUBENSTEIN, M. Emissions from the Cement Industry. **State of the Planet**, [s. l.], 09 may 2012. Climate. Disponível em: <http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/> Acesso em: 23 agosto. 2022.
- TOPÇU, Í. B.; ATESIN, Ö. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 120, p. 189-197, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112>
- YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. 12. ed. São Paulo: Sinduscon, 2013. p. 282-284

Sobre os autores

Robison Negri

Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná; Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade do Estado de Santa Catarina; Especialista em Saneamento Básico e Ambiental; Graduado em Engenheiro Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina; Experiência profissional nas áreas de Construção Civil e Infraestrutura, atuando principalmente nas seguintes especialidades: Construção Civil, Estradas, Saneamento Básico, Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Atualmente é servidor concursado da Prefeitura Municipal de Joinville (DEFESA CIVIL) e Professor de Nível Superior da Universidade Católica de Santa Catarina (CATÓLICA-SC), além de Sócio Proprietário da Empresa Ambient Engenharia e Consultoria Ltda.

André Felipe Bosco

Engenheiro Civil, formado pelo Centro Universitário Católica de Santa Catarina, com vasta experiência em fundações em estaca pré-moldada e hélice contínua.

Denio Gilson Ferreira

Graduado em Engenharia civil pelo Centro Universitário - Católica SC. Técnico em logística pelo SENAI SC. Experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção. Vivência em execução de obras portuárias. Atualmente atuando no setor Bancário brasileiro.

Lucas Schmitz Raiser

Engenheiro civil graduado pelo Centro Universitário Católica de Santa Catarina, com experiência em projetos e acompanhamento de obras de edificações uni e multifamiliar.

Aceito em: 12/12/23

Avaliado em: 06/06/23