

Influência de aditivos superplastificantes a base de policarboxilato na resistência a compressão e propriedades no estado fresco de um cimento Portland tipo I

Effect of carboxylate-based superplasticizers on compressive strength and fresh state properties in an Ordinary Portland Cement

Samanta Carolina Schwambach Scheeren(1); Paula de Lima Salum(2); Ana Paula Kirchheim(3); Erich David Rodríguez(4)

1 Graduanda de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Brasil.

E-mail: samantascheeren@gmail.com

2 Mestre em Engenharia Civil. UniRitter Laureate International Universities. Brasil.

E-mail: paulalimasalum@gmail.com

3 Doutora em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Brasil.

E-mail: anapaula.k@gmail.com

4 Doutor em Engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Brasil.

E-mail: erichdavidrodriguez@gmail.com

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 4, n. 2, p. 129-141, Jul.-Dez. 2017 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Nov. 23, 2017; Aceito: Nov. 28, 2017]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2017.v4i2.2293>

Endereço correspondente / Correspondence address

Ana Paula Kirchheim
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Av. Osvaldo Aranha, 1150 - Centro Histórico,
Porto Alegre - RS, 90010-281

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*
Editor-chefe: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

O cimento Portland (CP) tem uma produção mundial estimada em 12 bilhões t/ano, sendo um dos materiais de maior consumo como consequência do aumento na população e crescimento urbano. Com o objetivo de melhorar o desempenho do concreto, os aditivos redutores de água e superplastificantes têm se convertido em um componente de elevada importância devido aos seus efeitos desde um ponto de vista técnico (trabalhabilidade e resistências mecânicas) e econômico. Estes aditivos permitem diminuir o consumo de CP nas dosagens de concreto e portanto reduzir custos de produção, assim como melhorar critérios de sustentabilidade. O clínquer de CP é um material composto por diferentes fases onde o aluminato tricálcico (C_3A) afeta a trabalhabilidade antes do início de pega. No CP, os superplastificantes são adsorvidos nas partículas de cimento reduzindo a cinética de hidratação do C_3A . Acerca disso, o presente artigo, apresenta as interações de um CP com dois tipos de superplastificantes a base policarboxilato com função de abertura (elevada fluidez) e manutenção (prolongado tempo de ação). A partir de dados gerados em calorimetria isotérmica, identificou-se, com a inserção de diferentes teores de aditivos, o deslocamento do pico de hidratação, com aumento no tempo de dormência, bem como um aumento na liberação de calor. Isso implica que as interações entre os aditivos e o cimento acontecem nas primeiras horas de hidratação e modificam as taxas de dissolução, nucleação e crescimento das fases, tendo um efeito na resistência. Em relação ao espalhamento e à perda de abatimento dos sistemas, os resultados indicaram aumento na fluidez com incorporação de aditivo, conforme esperado.

Palavras-chave: Aditivo. Superplastificante. Policarboxilato.

Abstract

The global production of Portland cement (PC) is estimated in 12 billion t/y and therefore is one of the most consumed materials due to population growing and more extended urban areas. The organic admixtures, mainly water reducers and superplasticizers play an important role in concrete performance from a technical, economic and environmental point of view. These organic admixtures lead to a reduction of cement consumption within the mix designs and cheaper and more environmental friendly concrete can be produced. The clinker of PC is constituted with different phases, where the tricalcium aluminate (C_3A) has a strong effect in the workability in fresh state. In the PC the superplasticizers are adsorbed on the cement particles reducing the hydration kinetic of the C_3A . Therefore, this article shows the interactions of a CP with two different carboxylate-type admixtures. Organic admixtures with high fluidity and extended action were assessed. According to the data collected from isothermal calorimetry a peak displacement of hydration was identified, with increase in induction period, as well as an increase in the heat released. This reveals that the complex interactions between the admixtures and the cement are taking place during hydration and modify the rates of dissolution, nucleation and growth of the hydrated phases with the use of superplasticizers. In relation to the slump loss of systems, the results indicated an increase in scattering for all systems with admixture incorporation, as was expected.

Keywords: Admixture. Superplasticizer. Polycarboxylate.

1 Introdução

De uma mistura com proporções adequadas de calcário e argila, em uma composição química bem definida de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , queimada à aproximadamente 1450°C , obtém-se o cimento Portland, um material inorgânico multicomponente e multifásico (JOLICOEUR; SIMARD, 1998). Essa queima dá origem ao clínquer e permite a formação das fases: silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; alita ou C_3S , como é conhecido na química do cimento), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; belita ou C_2S), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; ou C_3A) e ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; ou C_4AF) (AÏTCIN; MINDESS, 2011). As fases do clínquer de cimento Portland apresentam determinadas propriedades quando reagem quimicamente em contato com a água, sendo influenciadas de acordo com as proporções e suas características, que, por sua vez, estão relacionadas com a matéria prima utilizada na produção do clínquer de cimento Portland (AÏTCIN; MINDESS, 2011). A composição química das fases presentes no clínquer e as diferenças em sua estrutura cristalina influenciam fatores como a cinética de hidratação e a reatividade com a água, assim como as características microestruturais dos produtos de hidratação formados (JOLICOEUR; SIMARD, 1998). Dessas fases, o C_3A e o C_3S são as mais reativas do clínquer de cimento Portland (AÏTCIN; FLATT, 2016). Os silicatos cálcicos (C_3S e C_2S) durante sua hidratação formam o silicato cálcico hidratado (C-S-H) que desempenha um papel dominante na determinação das propriedades mecânicas, físicas e químicas do concreto (GARTNER et al., 2017).

De acordo com Aïtcin e Flatt (2016), a tecnologia do concreto fez progressos consideráveis devido à utilização de aditivos. Entretanto, um determinado aditivo pode apresentar desempenhos distintos com diferentes cimentos Portland (MARCHON; FLATT, 2016). Como os aditivos variam bastante em sua composição, é importante reconhecer que as propriedades do concreto podem ser modificadas pelo uso desses materiais de natureza orgânica, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014), tornando-se imprescindível a pesquisa como base de conhecimento sobre como determinados materiais irão se apresentar de acordo com as misturas realizadas.

Segundo Aïtcin e Mindess (2011), do ponto de vista da resistência em estruturas de concreto de cimento Portland com baixos teores água/cimento, menos cimento e agregados são usados para sustentar uma determinada carga, o que pode ser mais facilmente alcançado com o uso de aditivos redutores de água e, com isso, produzir concretos mais duráveis, resistentes e sustentáveis.

Dentre os aditivos superplastificantes, em termos de capacidade de redução de água, os aditivos a base de polímeros sintéticos como policarboxilatos (PCE), podem reduzir até 40% da água das misturas, estando entre os mais utilizados para esta finalidade (NKINAMUBANZI *et al.*, 2016).

Massazza *et al.* (1981) comentam que, os superplastificantes são adsorvidos por produtos formados durante a hidratação do C_3A , afetando a reologia das pastas cimentícias podendo reduzir ou aumentar a viscosidade da mistura. O aumento no teor de C_3A do cimento Portland poderá levar à uma maior adsorção de superplastificante policarboxilato (PCE), requerendo, assim, que se aumente a concentração de PCE, a fim de atingir a saturação (ZINGG *et al.*, 2009). De acordo com Ferrari *et al.* (2017), a cinética de hidratação, na presença de um superplastificante PCE, tem dependência significativa sobre a quantidade inicial de aluminatos presentes no cimento, podendo ser observada a perda de trabalhabilidade da mistura.

Em vista dos pontos apresentados, toda melhor compreensão acerca das interações dos materiais cimentícios com aditivos e de como isso pode levar à um consumo mais específico, pode significar avanços para uma construção mais sustentável.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de dois aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos sobre a cinética de hidratação de cimento Portland, relacionando as propriedades das pastas em estado fresco com as propriedades em estado endurecido. As técnicas experimentais utilizadas neste trabalho avaliam a liberação de calor de hidratação correspondente aos resultados dos ensaios de calorimetria isotérmica, a resistência à compressão uniaxial e ao diâmetro de espalhamento obtido pelo método de mini slump.

2 Procedimentos Metodológicos

2.1 Caracterização dos materiais

Os dois aditivos utilizados são de base policarboxilato com função de manutenção e de abertura. Os aditivos são apresentados como aditivos de elevadíssima redução de água, proporcionando manutenção da plasticidade por períodos prolongados, estando classificados na ABNT: NBR 11768:2011 como aditivo SP II. Os teores de aditivos se mostram como os pontos fundamentais para o programa experimental, pois esta é a variável que determinará as variações nos traços, sendo as porcentagens adotadas 0,4 e 0,8%, próximas aos intervalos propostos pelos fabricantes para o uso dos produtos.

O cimento utilizado nesta pesquisa apresenta 4,43% de gipsita natural como fonte de sulfato de cálcio e foi submetido à análise da distribuição granulométrica das partículas sem um granulômetro à laser, modelo Cilas 1180, através o método de análise Mie, com coeficiente de refração igual a 1.6. O diâmetro médio foi de 13,49 μ m, o diâmetro a 10% foi 2,76 μ m e, a 90 %, 28,69 μ m. A proporção das fases do cimento foi calculada através do método de Rietveld e está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Proporção das fases do cimento utilizado

Fases	Porcentagem (%)
C ₃ S	74,20
C ₂ S	7,16
C ₄ AF	4,94
C ₃ A	8,86
Óxido de cálcio	0,35
Hidróxido de cálcio (portlandita)	1,84
Óxido de Magnésio	2,64
Sulfato de potássio	0,00
Sulfato de cálcio (Anidrita)	0,00

A Tabela 2 indica as proporções de clínquer, gipsita, água e aditivo para cada um dos sistemas definidos. De acordo com o método de mistura utilizado nos ensaios, e que será apresentado a seguir, os sistemas deveriam somar 100g de material seco para cada mistura, explicando, assim, os pesos utilizados.

Tabela 2. Composição dos sistemas

Sistema	Clínquer	Gipsita	Água	Aditivo	Aditivo	Aditivo
Unidade	[g]	[g]	[g]	Tipo	(%)	[g]
CR	95,7	4,3	40	-	-	-
CPMAN_04	95,7	4,3	40	Manutenção	0,4	0,4
CPMAN_08	95,7	4,3	40	Manutenção	0,8	0,8
CPABE_04	95,7	4,3	40	Abertura	0,4	0,4
CPABE_08	95,7	4,3	40	Abertura	0,8	0,8

2.2 Técnicas e Procedimentos

2.2.1 Calorimetria de Condução Isotérmica

Em condições de temperatura constante, a técnica de ensaio da calorimetria isotérmica fornece diretamente a taxa de energia produzida nas reações de hidratação do cimento. A temperatura de estabilização do calorímetro modelo TAM Air permaneceu em 25 °C e todos os materiais e instrumentos utilizados foram manipulados e mantidos em sala climatizada com temperatura de 25 °C ±1,5 °C.

A preparação da pasta foi externa e seguiu um procedimento pré-determinado, envolvendo períodos de mistura manual e mecanizada, com auxílio de aparelho elétrico à uma velocidade de 10.000 rpm. Para cada sistema, a mistura seguia os passos abaixo:

- I – clínquer mais gipsita secos – agitação manual por 30 segundos;
- II – adição do material seco ao recipiente de mistura com adição da água;
- III – mistura manual por 30 segundos com auxílio de barra metálica;

IV – adição de aditivo (nos sistemas que levavam aditivo);

V – encaixe do recipiente ao aparelho misturador – 20 segundos;

VI – misturador elétrico – 1 minuto e 10 segundos.

Após o processo de mistura, as amostras foram inseridas nas ampolas de vidro e seguiram para o calorímetro em que os dados de desenvolvimento das curvas de liberação de calor foram medidos por 48 horas. As medições realizadas pelo calorímetro são disponibilizadas em Watt por grama de cimento ao longo do tempo e, também, apresenta o resultado integrado, representando o calor cumulativo total durante o ensaio, em Joules por grama cimento.

2.2.2 MINI SLUMP

Segundo Kantro (1980), o teste de mini slump foi desenvolvido para avaliar a influência de aditivos redutores de água sobre a trabalhabilidade de pastas de cimento Portland, ilustrando e comparando o efeito relativo das diferentes misturas. O mini slump também tem utilidade na avaliação da perda de trabalhabilidade ao longo do tempo para as combinações de misturas desejadas, sendo um método simples, que facilita a avaliação da efetividade dos aditivos nas misturas.

No ensaio de mini slump, um molde cônico ou cilíndrico é cuidadosamente preenchido com a pasta de cimento e, em seguida, levantado verticalmente a uma velocidade constante. A diferença de altura entre o molde e o material acumulado após seu espalhamento sobre uma superfície é definida como slump, sendo que a medida do diâmetro final do material espalhado serve como medida alternativa para estimativa das tensões de cisalhamento da amostra.

Para o ensaio realizado neste trabalho, foi utilizado um modelo cônico em acrílico, disposto sobre uma superfície de vidro nivelada e livre de vibrações, com auxílio de papel milimetrado, para centralização do cone em todas as repetições. Cada sistema, foi ensaiado 4 vezes ao longo de 120 minutos, com intervalos de 30 minutos entre cada repetição. Antes de cada inserção do material no cone, o mesmo método de mistura foi empregado, pelo mesmo tempo do procedimento de mistura já apresentado anteriormente para calorimetria isotérmica. Para evitar a influência das condições externas, o ensaio foi realizado em câmara úmida, com temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para as medições dos diâmetros de espalhamento das amostras, foi utilizado paquímetro digital.

2.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial

Para o ensaio de resistência à compressão uniaxial foi utilizada uma prensa EMIC DL 20000, com célula de carga de 200 kN, precisão de 1 N e passo de 0,5 mm/min, conforme o sugerido por Longhi *et al.* (2016).

O ensaio desenvolveu-se com corpos de prova cúbicos de 20 20 20 mm, moldados em formas acrílicas, sendo realizado nas idades de 3 e 28 dias, com 5 cubos para cada idade, totalizando 50 cubos moldados para este trabalho. Após a moldagem as formas permaneciam em ambiente com temperatura controlada de 25 °C, envoltas em plástico-filme por 48 horas. Posteriormente, os cubos eram desmoldados e armazenados em recipientes com água saturada com cal a temperatura ambiente até a data da ruptura. Para regularizar as superfícies, presumindo uma maior regularidade das faces, os cubos foram lixados com lixa #100.

3 Resultados e Discussões

3.1 Calorimetria Isotérmica

A Figura 1A apresenta o fluxo de calor para os sistemas, separados de acordo com as dosagens de 0,4% e 0,8% sobre o peso de material seco. Com o teor de 0,4% do aditivo base policarboxilato de manutenção, observa-se que a primeira liberação de calor apresentou queda em relação ao pico de dissolução da referência, baixando de ~25 mW/g para ~16mW/g. Com o aumento no teor de aditivo de manutenção para 0,8%, os comportamentos apresentados no teor 0,4% foram acentuados, com a diminuição de, aproximadamente, 60% de liberação de calor no pico inicial em relação ao sistema referência sem aditivo.

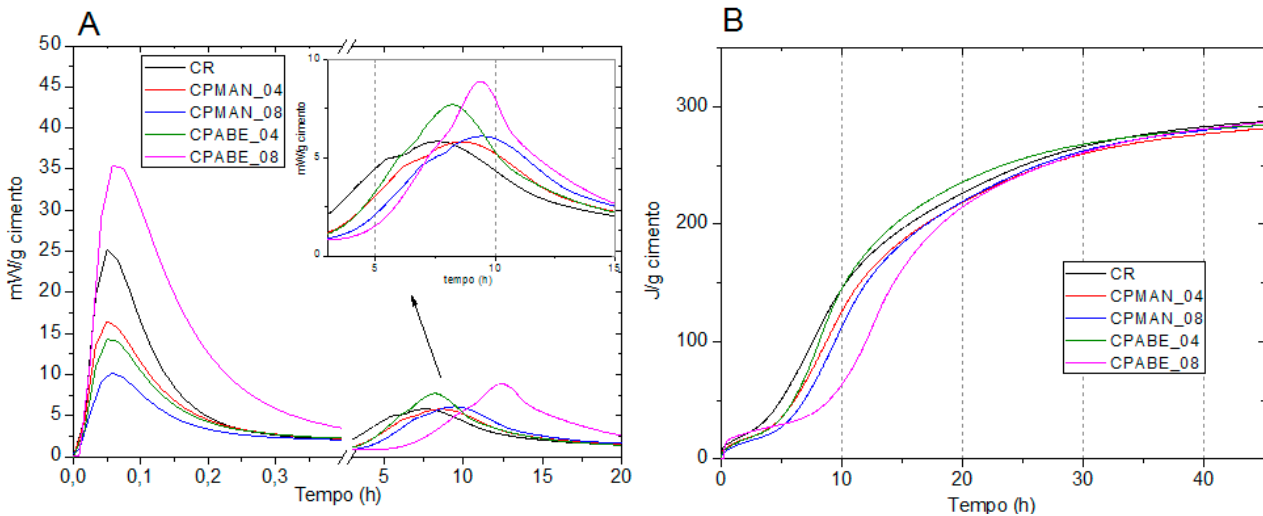
Com relação ao calor acumulado, em J/g cimento, conforme apresentado na Figura 1B, para os sistemas estudados não há apresentação de deslocamento considerável ao longo do tempo. Ao final do ensaio (48 h), todos os sistemas atingiram em torno de 300 J/g de liberação de calor total.

Ainda de acordo com a Figura 1A, para o teor 0,4% do aditivo de abertura, uma queda de cerca de 40% foi observada no pico inicial. Com o incremento no teor de aditivo para 0,8%, o cimento apresentou variações consideráveis, com aumento na liberação de calor de ~40% no primeiro pico, em relação aos valores da pasta de referência que reportou 25,2mW/g.

Analisando o momento do pico de hidratação, foi possível observar a intensificação desse pico causada na presença do aditivo de abertura, percentualmente, representa aumentos sempre acima de 30% em relação ao pico de referência. Para o teor de 0,4% do aditivo de manutenção, pode ser observado um retardo no pico de calor, de uma hora em relação à referência, sem diferença significativa na liberação de calor. O aumento o teor de aditivo de manutenção representou atraso de mais uma hora no pico em relação à primeira hora de atraso, já provocada pelo teor de 0,4%, totalizando, aproximadamente, duas horas de retardo nas reações de hidratação do clínquer para 0,8% desse aditivo.

Para o teor 0,4% do aditivo de abertura, o clínquer apresentou variação de liberação de calor de, aproximadamente, 32%, passando de 5,82mW/g para 7,69mW/g, com atraso de ~0,6h em relação à referência. Com o incremento no teor de aditivo para 0,8%, o clínquer apresentou variações consideráveis, com aumento na liberação de calor de ~52%, em relação aos valores de referência. O segundo pico teve atraso de cerca de 1,78h. Assim, foi possível correlacionar o retardo da hidratação desses sistemas com o aumento dos teores de aditivo.

Figura 1. (A) Fluxos de calor comparativos entre os sistemas de referência e contendo aditivos de manutenção e de abertura com um teor 0,4% e teor 0,8%;
(B) calor acumulado, em J/g



Apesar de diferenças nos tempos de retardo, para os sistemas avaliados, na presença de aditivos, neste ensaio, observou-se atraso no segundo pico, corroborando com o apresentado por Kong *et al.* (2016), que declaram que, no uso de superplastificantes base policarboxilato o aparecimento do pico de calor de hidratação é atrasado.

O ensaio de calorimetria isotérmica apresentou retardo no pico de hidratação para todos os sistemas. Em relação à liberação de calor no pico de hidratação, o aditivo de manutenção não revelou alterações significativas ao se manter próximo aos valores de referência, sem teor de aditivo. Para o aditivo de abertura, a intensificação do segundo pico pôde ser observada nos sistemas, sendo que sua intensificação foi influenciada pela duplicação do teor de aditivo.

De acordo com Marchon e Flatt (2016), o uso de aditivos superplastificantes normalmente desloca o pico de hidratação principal, ao prolongar o período de indução, sendo que este pode não ser o único efeito. As mudanças podem levar a uma característica calorimétrica totalmente diferente, podendo alterar, também, a liberação máxima de calor e/ou deslocar o pico de depleção de sulfato, fatores observados nas análises realizadas neste trabalho. Isso implica que as interações complexas entre

os aditivos e o cimento estão ocorrendo durante a hidratação e podem modificar substancialmente as taxas de dissolução, nucleação e crescimento das fases.

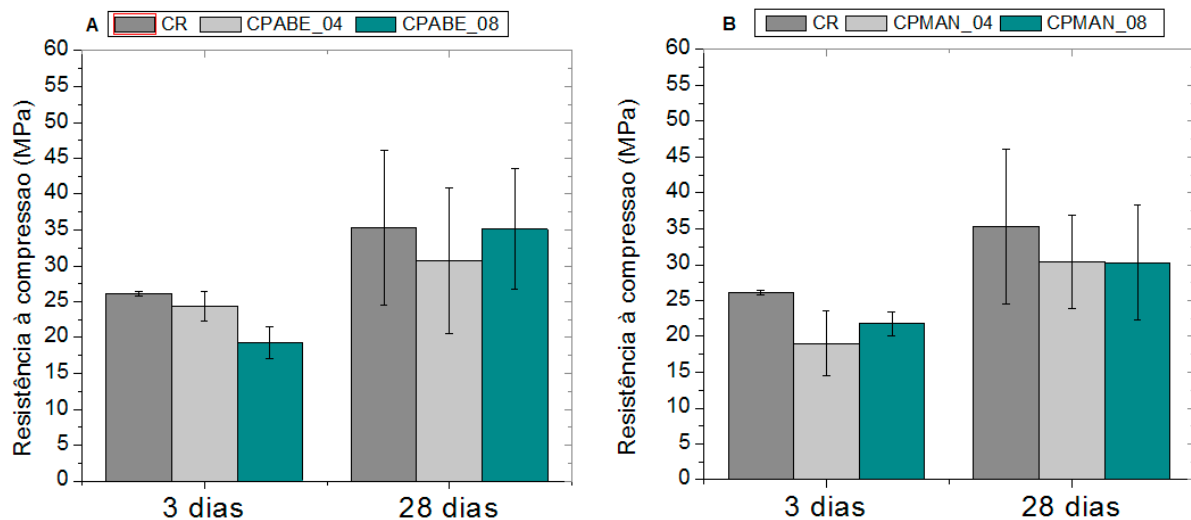
3.2 Resistência à compressão

A fim de verificar a relação entre os valores obtidos, se existe uma diferença significativa entre as médias, aplicou-se a análise de variância (ANOVA). A análise de variância compara médias de diferentes amostras para verificar se as médias são iguais ou não, observando assim se as diferenças amostrais observadas são reais, causadas por diferenças significativas nas populações observadas ou causais, decorrentes de mera variabilidade amostral.

A Figura 2 apresenta o comportamento da resistência à compressão dos sistemas com clínquer na presença dos aditivos, para os teores de 0%, 0,4% e 0,8%.

Na interação dos sistemas com clínquer e com o aditivo superplastificante de abertura, na figura 2A, aos 28 dias, para o teor de 0,4%, há diferença entre a média atingida e a média da referência, em que a queda na resistência foi de ~13%, com 30,7 MPa. Já para o teor de 0,8%, a resistência à compressão não apresenta alteração em comparação com o sistema referência, com 35 MPa.

Figura 2. Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial comparativo entre os aditivos utilizados: (A) sistema de referência e aditivo de manutenção; (B) sistema de referência e aditivo de abertura.



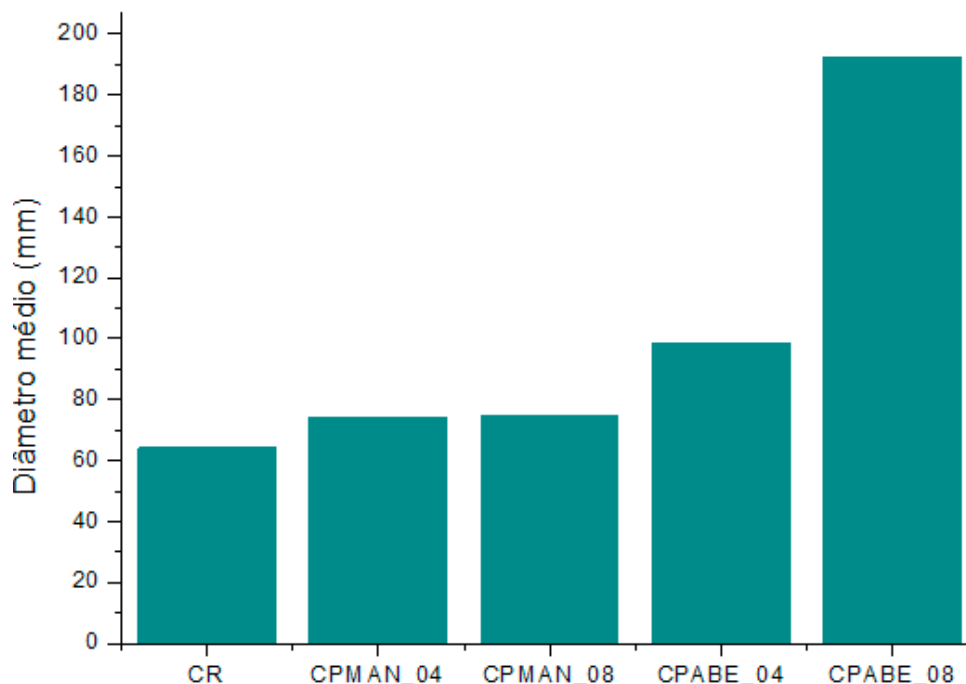
Para os sistemas com aditivo de manutenção, diagrama B, tanto para o teor de 0,4%, quanto para 0,8%, foi observada uma queda significativa na resistência em torno de 13%, atingindo 30,3 MPa, em comparação com os 35,3 MPa atingidos pelo sistema de referência, com teor 0%, aos 28 dias.

3.3 Mini Slump

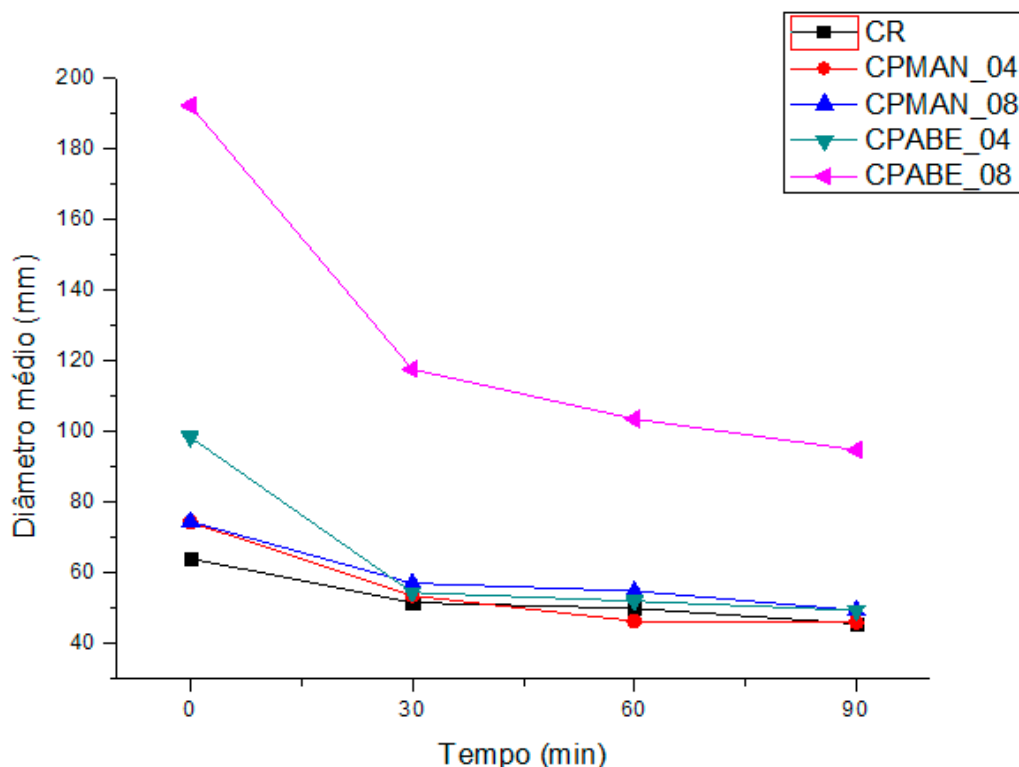
Para este ensaio, novamente foi aplicada a análise de variância (ANOVA). Para os dados de espalhamento, verificou-se, com 95% de confiança, que as médias diferem significativamente. Também foi observado que o parâmetro de maior influência no comportamento dos sistemas ao longo do tempo foi, como esperado, o próprio tempo de ensaio. Em seguida, a presença ou não de aditivo, de acordo com o aditivo utilizado, apresentou influência sobre os sistemas.

A Figura 3 apresenta o diagrama do diâmetro médio de espalhamento no tempo 0 minutos para todos os sistemas. Observando os resultados obtidos, foi possível verificar que, conforme esperado, a presença de aditivos aumentou a fluidez nos casos avaliados. Contudo, a utilização do aditivo de manutenção não apresentou influência significativa no espalhamento dos sistemas, nos dois teores. Sua adição aumentou o diâmetro de espalhamento dos sistemas em 16% para os dois teores, em relação ao sistema de referência, que não possui teor de aditivo.

Figura 3. Resultado de espalhamento inicial para os diferentes aditivos químicos incorporados



Para os sistemas com aditivo de abertura, os resultados indicaram maior eficiência no espalhamento, que foi potencializado com o aumento do teor de aditivo de 0,4% para 0,8%. O diâmetro de espalhamento da mistura com teor de 0,4% atingiu 53% de aumento, partindo de 64,02 cm de diâmetro, no sistema de referência e chegando à 98,39 cm. Para o teor de 0,8%, o diâmetro médio atingiu 192,17cm, gerando aumento de, aproximadamente, 200%.

Figura 4. Análise de espalhamento ao longo do tempo para o sistema referência e aditivos

Ao analisar o comportamento da fluidez dos sistemas ao longo do tempo (Figura 4), foi observado que a inclusão de aditivo de manutenção gera uma variação branda na fluidez da pasta e, ao final do período de 90 minutos, a manutenção do espalhamento foi menor do que a da pasta referência. O uso do aditivo de abertura, para o teor 0,4%, se assemelhou aos sistemas com aditivo de manutenção e referência ao final do ensaio, atingindo, em média, 47,6cm de espalhamento. Com isso, foi observada variação significativa apenas no teor 0,8% do aditivo de abertura, que, apesar da queda de 50% no espalhamento inicial, ainda apresentou maior fluidez para o sistema, com 94,7cm de espalhamento após 90 minutos.

4 Considerações finais

No ensaio de calorimetria isotérmica diferentes comportamentos podem ser observados para cada aditivo analisado, sendo o deslocamento do pico de hidratação em função da dosagem de aditivo um fator comum para o aditivo de manutenção e o de abertura. O pico de hidratação apresentou-se intensificado para os sistemas com aditivo de abertura, o que não pode ser admitido para os casos de utilização do aditivo de manutenção, que mostrou variações pouco expressivas frente às análises realizadas.

O desempenho dos aditivos superplastificantes no ensaio de compressão uniaxial apresentou valores de queda na resistência aos 28 dias, e, apenas o sistema com maior teor do aditivo de abertura, esse comportamento não foi verificado.

O ensaio de espalhamento demonstrou a baixa influência do aditivo de manutenção para ambos os teores, não apresentando aumento significativo na fluidez dos sistemas, bem como na manutenção dessa fluidez. O aditivo de abertura apresentou maior influência no espalhamento inicial dos sistemas com os dois teores utilizados. Sendo que para um teor maior, mesmo apresentando queda na manutenção da fluidez, ainda foi possível observar valores de espalhamento superiores aos demais sistemas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, Brasil) e ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS) por possibilitarem a realização desta pesquisa. Um agradecimento especial também é feito à FAPERGS, que através do programa PROBIC, possibilitou o auxílio financeiro do autor principal e ao CNPQ (Edital Universal e Produtividade em Pesquisa) pelo apoio financeiro para realização da parte experimental desta pesquisa.

Referências

- AÏTCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert J. (Ed.). **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing, 2015.
- AÏTCIN, Pierre-Claude; MINDESS, Sidney. **Sustainability of Concrete**. Spon Press, 2011
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011a.
- GARTNER, Ellis; MARUYAMA, Ippei; CHEN, Jeffrey. A new model for the C-S-H phase formed during the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 95-106, 2017.
- JOLICOEUR, Carmel; SIMARD, Marc-André. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 2-3, p. 87-101, 1998.
- KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, Orlando, v. 2, 1980.
- KONG, Fan-rong et al. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 545-553, 2016.
- LONGHI, Márlon A. et al. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 265-272, 2016.
- MARCHON, D., FLATT, R.J. **Mechanisms of cement hydration**. Science and Technology of Concrete Admixtures. Elsevier, p. 129-146, 2016.
- MASSAZZA, Franco; COSTA, Umberto; BARRILA, Alessandro. Adsorption of superplasticizers on calcium aluminate monosulfate hydrate. **Special Publication**, v. 68, p. 499-514, 1981.
- MEHTA, PovindarKumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. Ibracon, 2014.
- NKINAMUBANZI P.-C.; MANTELLATO, S.; FLATT, R. J. **Superplasticizers in practice**. Science and Technology of Concrete Admixtures, Woodhead Publishing Limited, p. 350-377, 2016.
- ZINGG, Anatol et al. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C 3 A amounts. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 153-162, 2009.