

## Concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e incorporação da casca do arroz e metacaulim

### Self-compacting concrete with low cement consumption and incorporation of rice husk and metakaolin

Fernanda Karolline de Medeiros<sup>1</sup>, Marcos Alyssandro Soares dos Anjos<sup>2</sup>,  
Maria das Vitorias Vieira Almeida de Sá<sup>3</sup>, Evilane Cássia de Farias<sup>4</sup>,  
Raquel Ferreira do Nascimento<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Rua Jairo Vieira Feitosa, 1770, CEP: 58840-000, Pereiros, Pombal, Paraíba, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, Avenida Primeiro de Maio, 720, CEP: 58015-435, Jaguaribe, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Avenida Senador Salgado Filho, 3000, CEP 59078-970, Lagoa Nova, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

<sup>4</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, RN-120, Km 2, CEP 59460-000, Novo Juremal, São Paulo do Potengi, Rio Grande do Norte, Brasil.

e-mail: fernanda\_karolline@hotmail.com, marcos.alyssandro@gmail.com, vitoria@ct.ufrn.br, evilane.farias@ifrn.edu.br, raquelfn96@hotmail.com.

#### RESUMO

O processo de produção de concreto gera um significativo impacto ambiental por ser um dos maiores consumidores de matéria-prima, como areia, pedra e água. Entretanto, o maior impacto é causado pela produção do cimento Portland, material indispensável ao concreto. A diminuição do consumo de cimento para se produzir materiais cimentícios é um importante aliado para a sustentabilidade das construções. Assim, o presente estudo avalia as propriedades reológicas, físicas, mecânicas e de difusão de íons cloreto em concreto autoadensável (CAA) com a incorporação de altos teores de pozolana da casca de arroz (PCA) e metacaulim (MK) em misturas terciárias. Para tanto, foram analisadas duas composições de concretos autoadensáveis com substituição de 40% e 50% de cimento por misturas terciárias com 20% de PCA e 20% de metacaulim e com 30% de PCA e 20% de metacaulim, respectivamente, sendo analisada ainda um CAA de referência com consumo de cimento de 450 kg/m<sup>3</sup>. Foram realizados ensaios de caracterização do CAA em estado fresco (slump flow test com T500, anel J, funil V e caixa L), além de absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e migração de cloretos em regime não estacionário nos CAA após 28 dias de cura. Os resultados evidenciaram que a sinergia das misturas pozolânicas proporcionou desempenhos mecânicos e de durabilidade superiores ao CAA de referência, produzindo concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento de elevada resistência e durabilidade frente a cloretos.

**Palavras-chave:** Concreto Autoadensável. Sustentabilidade. Pozolana da casca de arroz. Metacaulim. Baixos teores de cimento.

#### ABSTRACT

The concrete production process generates a significant environmental impact because it is one of the largest consumers of raw materials such as sand, stone and water. However, the greatest impact is caused by the production of Portland cement, a material indispensable to concrete. The reduction of cement consumption to produce cement materials is an important ally for the sustainability of buildings. Thus, this study evaluates the rheological, physical, mechanical and chloride ion diffusion properties in self-compacting concrete (CAA) with the incorporation of high levels of rice husk pozzolan (PCA) and metakaolin (MK) in tertiary mixtures. For this purpose, two compositions of self-adensable concrete were analyzed with substitution of

40% and 50% of cement by tertiary mixtures with 20% of PCA and 20% of metakaolin and 30% of PCA and 20% of metakaolin, respectively, and a reference CAA with a consumption of 450 kg/m<sup>3</sup> of science was also analyzed. CAA characterization tests were performed in fresh state (slump flow test with T500, J ring, V funnel and L box), besides water absorption, void index, specific mass, compression resistance and chloride migration in non-stationary regime in CAA after 28 days of cure. The results showed that the synergy of the pozzolanic mixtures provided mechanical performances and durability superior to the reference CAA, producing self-adensable concrete with low cement consumption of high resistance and durability against chlorides.

**Keywords:** Self-compacting concrete. Sustainability. Pozzolan of rice husk. Metakaolin. Low levels of cement.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de concreto tem papel importante para a sustentabilidade das construções uma vez que mais de 10 bilhões de toneladas são produzidas a cada ano, sendo a indústria de cimento (um dos principais componentes do concreto) responsável pela emissão de cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera [1].

Assim, a ampla utilização do concreto na construção civil tem impactado significativamente o consumo de energia e qualidade ambiental. Felizmente, o surgimento de concreto sustentável, muitas vezes produzido com resíduos alternativos ou materiais reciclados, oferece grandes oportunidades para melhorar a sustentabilidade do concreto [2].

Diante desse contexto, a fim de tentar amenizar os impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, muitos trabalhos têm estudado alternativas de dosagens com incorporação de resíduos em concretos [3-6]. Entre esses estudos, encontram-se também abordagens a cerca de concretos autoadensáveis (CAA) [7-12] buscando produzi-los com baixos teores de cimento ou com a utilização de adições minerais. O estudo desenvolvido por BARBOZA e ALMEIDA FILHO [12] indica que o concreto autoadensável com baixo consumo de cimento pode oferecer viabilidade econômica e desempenho técnico superior, provando que é possível reduzir o consumo de cimento em até 25% e manter ou até aumentar a resistência à compressão do CAA aos 28 dias.

A principal diferença entre o concreto normalmente vibrado e o concreto autoadensável são as características reológicas superiores do último. O CAA deve ter alta fluidez e estabilidade da mistura, proporcionando assim três características-chave: fluxo ou a capacidade de preencher espaços, a capacidade de passar restrições e a capacidade de resistir à segregação [13].

Além de areia, agregados graúdos e cimento Portland comum ou composto, os materiais necessários para produzir CAA incluem superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais finas [14]. Seus materiais constituintes são responsáveis pela sua capacidade de se autoadensar, sendo essa obtida com o equilíbrio entre alta fluidez e moderada viscosidade. Devido sua elevada fluidez, o CAA precisa de um adequado controle da sua tendência à segregação. A resistência à segregação do CAA é resultado de uma adequada viscosidade, sendo as adições minerais finas, pozolânicas ou não, recomendadas nesse controle. Dessa forma, o concreto autoadensável necessita de uma maior quantidade de finos quando comparado com o concreto convencional [11].

A adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades no estado fresco e endurecido. Os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água [15]. O uso de adições minerais finas aumenta a capacidade da mistura, dificultando a penetração de agentes externos agressivos, melhorando a zona de transição.

O metacaulim (MK) é uma adição mineral com alta atividade pozolânica [16]. É composta por argila caulínica de alta pureza calcinada em 650-800°C para aumentar a atividade pozolânica [14]. Segundo DAL MOLIN [17], quando a caulinita é submetida às temperaturas de calcinação, ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura cristalina, ocasionando a destruição do seu arranjo atômico. Forma-se, então, um componente amorfo e de grande instabilidade química, denominado metacaulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H e C<sub>4</sub>AH<sub>x</sub>. O metacaulim consegue remover o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, o qual está associado a uma fraca durabilidade. A sílica e alumina presentes no metacaulim numa forma ativa iram, reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, promovendo assim a sua remoção e respectiva melhoria da durabilidade [18].

Muitas das utilizadas atualmente são as provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas, como a sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto forno, além dos resíduos das cinzas das cascas de arroz. A pozolana da casca de arroz (PCA), material altamente pozolânico, é resultante da combustão da casca de arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras de arroz como fonte calorífica na geração de calor e vapor necessá-

rios nos processos de secagem e parbolização dos grãos [4]. Em muitos países produtores de arroz, uma quantidade significativa do PCA é enviada para aterros sanitários sem qualquer adição de valor [19]. Cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, produz aproximadamente 40 kg de cinza [14].

A utilização da PCA como adição, para a produção de concretos, influencia benéficamente tanto os aspectos relacionados à resistência mecânica, como os relacionados à durabilidade. Análises de DRX da pozolana da casca de arroz realizadas por CHOPRA *et al.* [20] e CORDEIRO *et al.* [21] obtiveram resultados de um material composto principalmente de sílica amorfa, com uma menor parcela de sílica cristalina observada na forma de cristobalita. A PCA, devido ao seu tamanho fino (3-10  $\mu\text{m}$ ), atua principalmente como um filer, material pozzolânico e modificador de viscosidade no concreto. A PCA se comporta como um material pozzolânico devido à sua extrema fineza superficial e alto teor de sílica [22]. A PCA reage com hidróxido de cálcio e produz C-S-H adicional. O efeito filer e atividade pozzolânica da PCA resulta no refinamento da estrutura dos poros da matriz e da zona de transição. Diversos estudos [20, 21, 23] comprovam que a adição de PCA no concreto proporciona aumento ou manutenção da resistência à compressão, refinamento dos poros e diminuição da penetração de íons cloreto devido à sua boa atividade pozzolânica, principalmente em teores de 20%. Ganesan, Rajagopal e Thangavel [24] concluíram que o cimento comum pode ser substituído por pozolana da casca de arroz em porcentagens de até 30% sem qualquer efeito adverso sobre as propriedades de resistência e permeabilidade.

GARRETT, CARDENAS e LYNAM [25] estudaram a resistência à compressão e efeitos de corrosão ao usar água salgada em pastas de cimento com adição de PCA e bagaço da cana-de-açúcar nas proporções de 10%, 20% e 30% de cada resíduo em substituição ao cimento, além de produzirem uma mistura de referência com relação água/cimento de 0,45. Água salgada na concentração da água do mar, 35 g NaCl/L, foi usada como água de mistura para introduzir um ambiente mais corrosivo para realização dos testes de corrosão e para analisar se o uso da água do mar resultaria ganhos de resistência à compressão. Os resultados revelam que as pastas com substituição de 20% de cinzas de casca de arroz ou 10% de cinzas de bagaço de cana proporcionam ganhos de resistência à compressão e resistência à corrosão semelhante à pasta de referência. A porosidade medida pela absorção da água aumentou com o aumento da quantidade de substituição, embora haja correlação positiva entre a porosidade e a razão água/cimento.

PELISSER, VIEIRA e BERNARDIN [13] estudaram composições de CAA com baixos teores de cimento, com adição de MK e cinzas volantes (misturas binárias e ternárias) para avaliar suas propriedades reológicas e mecânicas. Tendo definido uma resistência de 25 MPa, foi obtida uma composição com consumo de cimento de 222 kg/m<sup>3</sup> (+49,4 kg de cinza volante e metacaulim). Os resultados mostram que é viável produzir CAA de baixa resistência, com a fluidez necessária e o consumo reduzido de aglomerante, quando são utilizadas adições minerais de metacaulim e cinzas volantes.

GILL e SIDDIQUE [26] avaliaram a durabilidade e as propriedades microestruturais de CAA constituído de metacaulim e pozolana da casca de arroz. Substituíram o cimento por metacaulim em três proporções diferentes de 5%, 10% e 15% e os agregados finos por pozolana da casca de arroz na proporção de 10%. Testou-se a resistência à compressão e propriedades de durabilidade como a absorção de água, a porosidade e a resistência à sulfatos. Os resultados mostram que o uso de MK e PCA afetou positivamente a resistência à compressão dos CAA estudados, além de se mostrarem promissores na redução da absorção de água, porosidade e penetração de íons cloreto, quando comparados com a mistura de referência.

KANNAN e GANESAN [27] produziram dezessete misturas de CAA com pozolana da casca de arroz e metacaulim, sendo 12 traços com PCA ou MK com uma porcentagem de 0 a 30%, ao passo de 5%, quatro traços com uma combinação de PCA e MK com um intervalo de 10%, 20%, 30% e 40% e com um CAA de referência com 400kg/m<sup>3</sup>. Os resultados mostraram que o CAA produzido com a PCA e uma combinação de PCA e MK mostraram uma melhora considerável na durabilidade, quando comparados com o concreto de referência. No entanto, o desempenho do CAA produzido com MK foi insatisfatório quando submetido ao ambiente ácido. As misturas com um teor mais elevado de MK e PCA + MK exibiram resistência a penetração de íons cloreto muito melhor, devido aos elevados teores de alumina do metacaulim (43,75%), que proporcionou um aumento na fixação dos cloretos no concreto, através da formação do cloroaluminato de cálcio.

KAVITHA *et al.* [28] produziram quatro misturas de CAA, uma de referência com consumo de 500 kg/m<sup>3</sup> e as demais substituindo parcialmente cimento por teores de 5%, 10% e 15% de MK. As propriedades de durabilidade dos CAA foram investigadas por meio da medição da absorção de água, do ataque de sulfato e da penetração de íons cloreto. Os autores concluíram que o MK consome uma maior quantidade de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento devido a reação pozzolânica, o que resultou em um concreto mais durável. Os resultados mostram que o aumento da quantidade de MK resulta em redução considerável na penetração de íons cloreto. O CAA contendo 10% de MK apresentou excelente durabilidade para o ataque

de sulfato, penetração de cloreto e permeabilidade da água.

Visando contribuir com o avanço das análises, este artigo apresenta um estudo experimental sobre a influência da redução do cimento através da substituição do mesmo por elevados teores de metacaulim e pozolana da casca do arroz, em conjunto, que totalizam reduções de 40% e 50% do cimento em relação ao CAA de referência, proporcionando a produção de composições de CAA com consumos de cimento da ordem de 220 a 260 kg/m<sup>3</sup>.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP-V ARI RS). Este tipo de cimento foi escolhido com a finalidade de que os concretos produzidos não obtivessem influência de outros tipos de adições pozolânicas além das pesquisadas. Todo o cimento empregado foi proveniente de um único lote de produção.

Para composição dos traços com adições, foram utilizados o Metacaulim (MK) produzido no município de Ipojuca-PE e a pozolana sílica da casca de arroz (PCA) disponibilizada pelo Grupo Pilecco Nobre, localizado no município de Alegrete/RS.

Foram selecionadas brita granulítica e areia natural quartzosa, materiais esses cedidos por uma empresa produtora de concreto localizada na região metropolitana de Natal-RN.

Para as misturas foi utilizado o aditivo hiperplastificante GLENIUM®160 SCC (SCC 160). O mesmo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução de água, tornando o concreto com melhores características de trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. A água utilizada na produção das misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento de Natal/RN.

### 2.2 Métodos

#### 2.2.1 Caracterização física dos materiais

Foram realizados os ensaios de granulometria à laser para o cimento e as adições utilizadas. Para o agregado miúdo e graúdo, o ensaio de granulometria foi realizado em conformidade com o prescrito pela NBR NM 248 [29]. As massas unitária e específica dos mesmos foram obtidas conforme o descrito pela NBR NM 52 [30].

Para avaliação das misturas terciárias foi produzido um traço de CAA de referência com 450 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto e dois traços com substituição da massa do cimento de 40% e 50% por pozolana da casca de arroz (PCA) e metacaulim (MK). As duas composições apresentam 20% de metacaulim, sendo diferenciadas pela adição de 20 e 30% de PCA. Estes CAA são denominados como concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento (CAA-BCC).

A definição dos traços partiu da dosagem de argamassas autoadensáveis [31] e de outros estudos prévios realizados pelo grupo de pesquisa em materiais sustentáveis do IFRN/IFPB/UFRN, utilizando a premisa de composição de um traço de CAA de referência com 450 kg/m<sup>3</sup> e relação água/pó de 0,44. A partir desse, realizou-se a substituição do cimento em massa em percentuais de 40% e 50%. Em seguida foi calculado o novo traço em relação ao consumo de cimento para as composições com redução e utilizando as massas específicas dos materiais. A relação água/pó das composições foi mantida constante, com o intuito de avaliar a influência das adições nas propriedades dos CAA no estado fresco e endurecido.

O programa de ensaios foi desenvolvido com o objetivo de analisar se a incorporação de elevados volumes de adições minerais no CAA é capaz de manter ou melhorar seu desempenho mecânico e durabilidade aos 28 dias quando comparado a um CAA produzido com materiais convencionais sem pozolanas.

#### 2.2.2 Ensaios estado fresco

Para verificar as características de autoadensabilidade dos concretos, foram realizados os ensaios slump flow test, slump flow t<sub>500</sub> test e o ensaio do anel “J”, todos conforme as prescrições da NBR 15823 [32].

### 2.2.3 Absorção de água, porosidade total e massa específica

Os ensaios foram realizados aos 28 dias, sendo utilizadas três amostras de CAA cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura em cada idade. Os ensaios foram realizados após período de cura, e em conformidade com a NBR 9778 [33]. A partir dos resultados obtidos foram calculadas a porosidade total ( $P_t$ ), a absorção por imersão ( $Ab_{IMERSÃO}$ ), a massa específica da amostra saturada ( $ME_{SAT}$ ) e a massa específica real ( $ME_{REAL}$ ).

### 2.2.4 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias foram executados de acordo com a NBR 5739 [34], sendo ensaiados três corpos de prova (10 x 20 cm) para cada composição. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em cura por imersão em água a temperatura de  $22 \pm 2$  °C, onde ficaram até a idade estabelecida para ensaio. Antes dos ensaios os corpos de prova foram retificados para regularização da face superior e inferior (caso necessário). Para realização do ensaio, utilizou-se a prensa elétrica-hidráulica com capacidade de 100 kN e precisão de 0,1 kN.

### 2.2.5 Migração de cloretos em regime não estacionário

A determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no concreto por meio do ensaio de migração em regime não estacionário foi realizado de acordo com descrito pelo documento normativo LNEC E – 463 [35].

Para execução do ensaio aplica-se à fatia do corpo de prova de diâmetro 100x50mm, entre os topos circulares, um potencial elétrico externo, forçando os íons cloro externo a migrarem para o interior da fatia, conforme as Figuras 1 e 2. Após determinado período de ensaio, parte-se a fatia por tração comprimindo-a diametralmente e pulveriza-se as seções retangulares obtidas com uma solução de nitrato de prata. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mede-se a profundidade de penetração. Com base nesta medição, calcula-se o coeficiente de difusão dos cloretos.

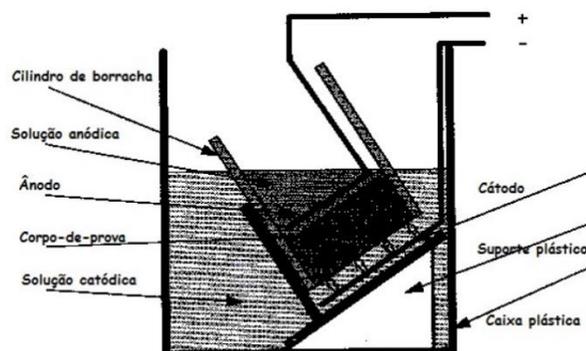


Figura 1: Ensaio para determinação do coeficiente de difusão dos cloretos – esquema do método LNEC E-463.

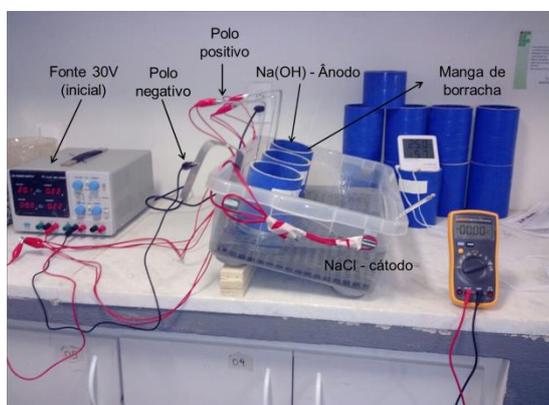


Figura 2: Ensaio para determinação do coeficiente de difusão dos cloretos – ensaio montado no laboratório de durabilidade do IFRN.

Os CAA foram analisados aos 28 dias com dois corpos de prova para cada idade, ensaiando duas fatias de uma amostra e uma de outra, totalizando três fatias para cada traço. O valor da difusão dos cloretos, para cada composição, foi obtido pela média aritmética dos valores individuais das três amostras ensaiadas em cada idade.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado a partir da Equação 1:

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

Onde:

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2c_d}{c_o} \right)$$

D: o coeficiente de difusão em regime não estacionário, m<sup>2</sup>/s;

z: o valor absoluto da valência do íon, para os cloretos, z = 1;

F: constante de Faraday, F = 9.648x10<sup>4</sup> J/(V.mol);

U: valor absoluto da voltagem aplicada, V;

R: constante dos gases perfeitos; R=8,314J/(K.mol)

T: valor médio das temperaturas inicial e final no anólito (graus Kelvin);

L: espessura do provete, m

X<sub>d</sub>: valor médio da profundidade de penetração, m;

T: duração do ensaio, segundos;

erf<sup>-1</sup>: inverso da função erro;

c<sub>d</sub>: concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor, c<sub>d</sub> ≈ 0.07N para concreto com cimento CEM I;

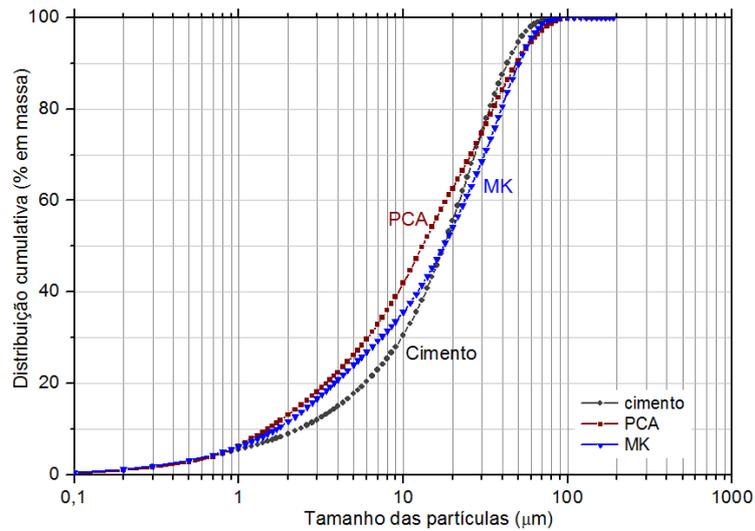
c<sub>o</sub>: concentração de cloretos no católito, c<sub>o</sub> ≈ 2N;

O valor da difusão dos cloretos, para cada composição, foi obtido pela média aritmética dos valores individuais das três amostras ensaiadas em cada idade.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

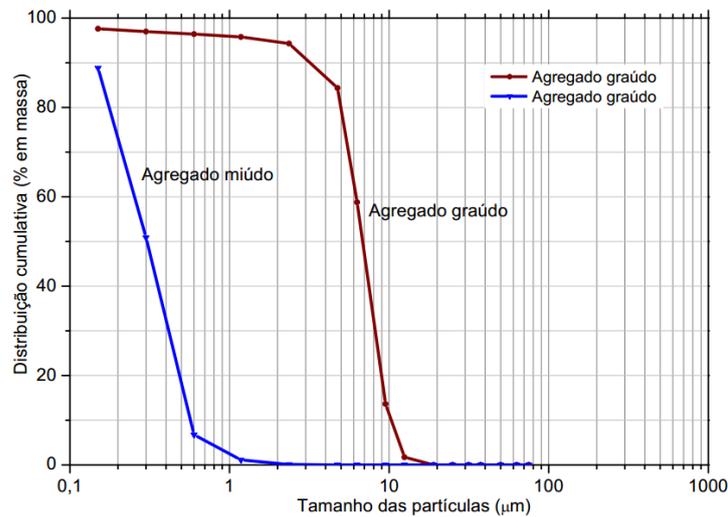
#### 3.1 Caracterização física

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas do cimento, do PCA e do metacaulim, sendo possível observar uma semelhança na distribuição dos finos utilizados na pesquisa.



**Figura 3:** Distribuição granulométrica do cimento e adições.

A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica da areia e da brita utilizadas.



**Figura 4:** Distribuição granulométrica dos agregados.

O módulo de finura, a massa unitária do agregado solto e a massa específica dos agregados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Propriedades físicas dos agregados.

CARACTERÍSTICA	AGR. MIÚDO (AM)	AGR. GRAÚDO (AG)	UNIDADE
Dimensão máxima característica	1,18	12,5	milímetros (mm)
Módulo de finura	1,48	5,79	
Massa unitária do agregado solto	1640	1490	Quilograma por metro cúbico (kg/m³)
Massa específica	2620	2625	Quilograma por metro cúbico (kg/m³)

### 3.2 Análise das composições

A EFNARC [36] orienta o projeto de mistura e dá uma indicação da gama típica de constituintes do CAA em

massa e em volume, embora deixe claro que estas proporções não limitam as misturas de CAA, podendo muitas vezes estar fora desta faixa para um ou mais componentes. Com base nisso, foram calculados os parâmetros descritos para o teor de cada componente dos CAA, comparando com as faixas indicadas pela EFNARC [36], conforme apresentado na Tabela 2.

Percebe-se, conforme os resultados apresentado na Tabela 2, que a relação água/finos para os CAA estudados excede os valores determinados pela EFNARC [36] de 0,85 a 1,10, com o objetivo de manutenção da relação água/finos e comportamentos de autoadensabilidade das composições com altos teores de adições, considerando a maior demanda de água ocasionada também pelo clima quente da região Nordeste do Brasil. Para os CAA com adições, a relação água/finos apresentou valores bem próximos ao limite especificado pela EFNARC [36] e por COPPOLA [37] que indica que esta relação tenha valor máximo até 1,20. Para o CAA de referência, a relação volumétrica de água/finos fornece número mais elevado motivado pelo maior valor da massa específica do cimento em relação às adições utilizadas, que influenciou no incremento da quantidade de agregados e consequentemente uma maior demanda de água para o atendimento das composições em massa.

**Tabela 2:** Composição das misturas de CAA e parâmetros EFNARC.

	REFCAA	PCA20MK20	PCA30MK20	EFNARC [36]	UNIDADE
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	451,1	265,6	220,4	-	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
PCA	0	88,5	132,2	-	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
MK	0	88,5	88,1	-	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
Agreg. Miúdo	739,8	725,9	722,8	-	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
Agreg. Graúdo	974	956	952	750-1000	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
água	198,5	194,8	191,7	150-200	Litro por metro cúbico (l/m <sup>3</sup> )
Relação água/pó	0,44	0,44	0,44	-	
Aditivo SP	1,91	4,56	6,61	-	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
Aditivo	0,423	1,03	1,5	-	Porcentagem (%)
Finos	451,1	442,6	440,7	380-600	Quilograma por metro cúbico (kg/m <sup>3</sup> )
Pasta	346,4	358,7	361,5	300-380	Litro por metro cúbico (l/m <sup>3</sup> )
Argamassa	55	55	55	-	Porcentagem (%)
AM	43,2	43,2	43,2	48-55	Porcentagem em massa do total de agregado (%)
Razão água/finos (	1,34	1,19	1,13	0,85-1,1	Litro por metro cúbico (l/m <sup>3</sup> )

As quantidades de finos, pasta, água e agregado graúdo dos CAA estudados foram mantidos dentro dos valores determinados pela EFNARC [38]. O percentual de agregado miúdo em relação à massa total de agregados foi mantida constante, embora abaixo das recomendações da EFNARC [38], pois um dos parâmetros para a determinação das composições foi o teor de argamassa seca do traço que foi de 55%.

### 3.3 Ensaios de caracterização no estado fresco

Os ensaios no estado fresco classificam os CAA quanto a fluidez em SF1 a SF3, medido pelo tempo necessário para atingir 500 mm no ensaio de espalhamento, slump flow test (T500), e quanto a viscosidade aparente em VS1/VF1 a VS3/VF3 que é medido pela dupla classificação de tempos de espalhamento e escoamento no funil V. Neste trabalho limitou-se apenas a classificação dessas composições, não sendo foco manter todas elas com a mesma classificação, uma vez que a intenção é avaliar a influência das adições na resistência à compressão e na difusão de íons cloreto. Portanto o parâmetro para normalizar as composições foi a relação água/pó, igual em todas as composições, e o slump flow fixado em  $700 \pm 50$  mm, o que proporciona uma excelente habilidade de preenchimento [39]. A maior dificuldade de projetar misturas de CAA é o equilíbrio de diferentes propriedades que depende de mecanismos distintos como ter alta fluidez e estabilidade com habilidade de passante, o que requer alto volume de pasta e uso de materiais adequados como adições minerais e aditivos superplastificantes [40].

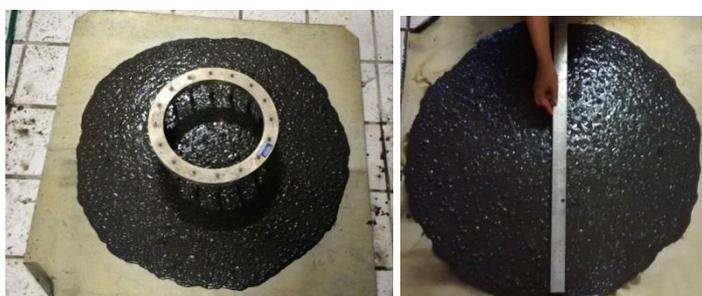
Assim como o comportamento notado no estudo desenvolvido por PELISSER, VIEIRA e BERNARDIN [13], os concretos apresentaram boa coesão, sem presença de exsudação e segregação com fluidez moderada, conforme mostra a Figura 5, comportamento provocado principalmente pela presença de altos teores de adições com partículas pequenas ( $451 \text{ kg/m}^3$ ), que agem como bloqueadores de poros, aumentando o contato sólido-sólido.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5:** Ensaios de slump flow e anel J. (a) REFCAA (b) PCA20MK20 (c) PCA30MK20.

As propriedades de fluidez, capacidade de enchimento, viscosidade e habilidade passante dos CAA foram determinadas pelos ensaios de Espalhamento,  $T_{500}$ , Funil “V” e Anel “J”. Na Tabela 3 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e suas classificações segundo a NBR 15823 [32].

**Tabela 3:** Propriedades no estado fresco.

ENSAIOS	REF CAA	PCA20MK20	PCA30MK20	UNIDADE
Slump-flow	730	650	788	milímetros (mm)
Slump-flow $T_{500}$	2,0	3,9	3,2	segundos (s)
Anel “J”	612	597	755	milímetros (mm)
Tempo após 30s	2,4	23,5	16,0	segundos (s)
Classe de fluidez	SF2	SF1	SF3	
Classe de viscosidade	VS1/VF1	VS2/VF2	VS2/VF2	

Como era esperado, a composição com maior quantidade de adições (PCA30MK20), necessitou de um maior teor de aditivo para manter a fluidez desejada, medida através do slump flow, fixado em  $700 \pm 50$  mm. Para as composições com 40% e 50% de substituição, os teores de aditivo utilizados sobre a massa dos finos foram de 1,2% e 1,50% respectivamente. Enquanto que o CAA de referência necessitou de apenas 0,42% de aditivo. Portanto, a substituição do cimento por elevados teores de adições influenciou na plasticidade dos CAA, aumentando a viscosidade e com isso a maior necessidade de aditivo superplastificante com a mesma relação de água/pó utilizada em todas as composições.

Nenhum dos CAA estudados apresentou segregação após os ensaios ou durante a parada da mistura, no entanto durante os testes preliminares para determinação do teor de aditivo a ser adicionado, realizado nas argamassas dessas composições, foi possível constatar que o uso de aditivos superplastificante além do necessário pode causar o fenômeno de exsudação, mesmo com a presença de altos teores de adições.

### 3.4 Absorção de água, porosidade total e massa específica

Os resultados da determinação dos índices físicos no estado endurecido dos CAA estudados estão apresentados na Tabela 4. O principal resultado deste ensaio é a determinação do índice de vazios ou porosidade total ( $P_t$ ), que determina a porcentagem de poros abertos e interconectados. Os resultados da porosidade total podem ser utilizados como indicador de durabilidade, quando estes valores são de até 7% são de boa qualidade e de 15% qualidade média [39, 41]. GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL [24] também verificaram aumento no percentual de absorção de água aos 28 dias de cura dos concretos estudados, justificado pela finura do PCA e pela natureza higroscópica do cimento, comportamento que foi revertido aos 90 dias de cura do concreto.

Verifica-se que os CAA estudados têm baixos índices de porosidade total, mesmo com consumos de cimento da ordem de 220 a 265  $\text{Kg/m}^3$ , valores de consumo estes abaixo do limite recomendado pela NBR 12655 [42] para a classe de agressividade II, na qual a maioria dos concretos estruturais são projetados. Logo, tem-se aqui no resultado de porosidade total, que os CAA com baixo teores de cimento podem apresentar durabilidade semelhante a CAA com elevados consumos de cimento como o da composição de referência ( $450 \text{ Kg/m}^3$ ), uma vez que a estrutura porosa dos concretos é um importante parâmetro para avaliar a durabilidade dos concretos.

**Tabela 4:** Propriedades físicas dos CAA.

PROPRIEDADES FÍSICAS	IDADE (dias)	REF CAA	PCA20MK20	PCA30MK20	UNIDADE
$Ab_{\text{IMERSÃO}}$ (%)	28	2,55	3,07	2,39	Porcentagem (%)
$P_t$ (%)	28	5,94	6,98	6,21	Porcentagem (%)
$ME_{\text{SAT}}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	28	2,39	2,34	2,66	Gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/m}^3$ )
$ME_{\text{REAL}}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	28	2,48	2,45	2,77	Gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/m}^3$ )

O aumento da massa específica dos CAA com adições indica o aumento de compacidade desses concretos contendo adições e pode ser explicada pela morfologia e menor tamanho das partículas das adições e pela maior densificação da matriz cimentícia causada pelas reações pozolânicas e pelo efeito fíler.

### 3.5 Resistência à compressão axial

Segundo NEVILLE [43], a resistência à compressão dá uma ideia geral da qualidade do concreto, pois esta propriedade está diretamente relacionada com a microestrutura da pasta de cimento hidratada. Os resultados das médias das resistências à compressão dos corpos de prova rompidos aos 28 dias de idade dos CAA estão expressos na Figura 6, bem como as suas respectivas relações de eficiência de resistência à compressão por kg de cimento utilizada em cada composição.

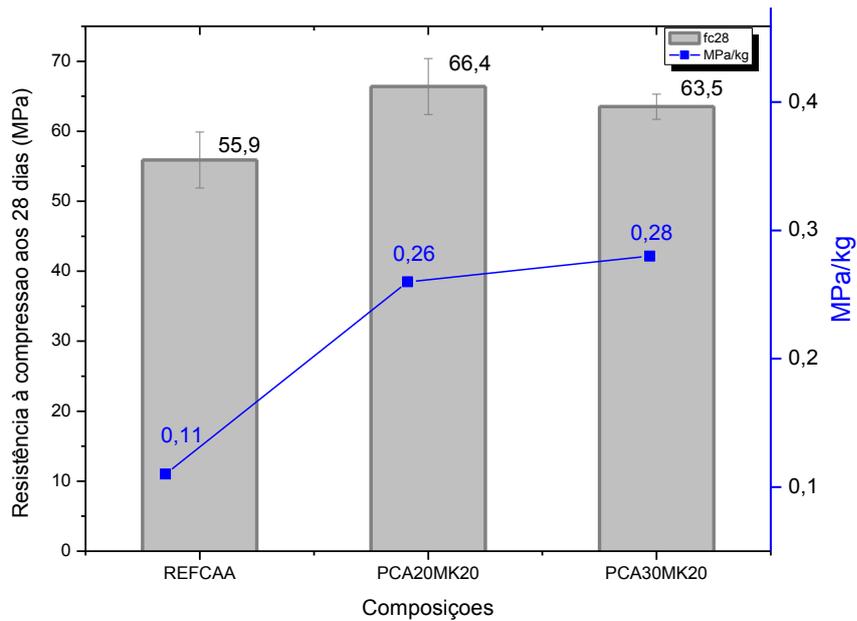


Figura 6: Resistências à compressão aos 28 dias.

Os CAA com baixos teores de cimento apresentaram maiores resultados de resistência à compressão aos 28 dias, quando comparados ao CAA de referência, sendo os incrementos de 18,7% e 13,5% para os concretos autoadensáveis PCA20MK20 e PCA30MK20, respectivamente. Os acréscimos de resistência das composições com adições podem ser justificados pela elevada reatividade do metacaulim e da PCA. GILL e SIDDIQUE [26], ao substituírem o cimento por metacaulim em três proporções diferentes de 5%, 10% e 15% e os agregados finos por pozolana de casca de arroz na proporção de 10%, verificaram que o uso de MK e PCA afetou positivamente a resistência à compressão, aumentando em 27%, 42% e 48% aos 28, 90 e 365 dias, respectivamente, em relação à mistura de controle. KANNAN e GANESAN [27] observaram que os melhores resultados dos ensaios de resistência a compressão aos 28 dias foram obtidos com substituição do PCA, MK e de combinação dos dois, nas proporções de 15%, 20% e 30%, respectivamente. Valores de substituição abaixo ou acima dos citados diminuíram a resistência aos 28 dias.

Nota-se ainda que são alcançadas elevadas resistências com os CAA com baixos consumos de cimento (CAA-BCC), definindo-se baixo consumo de cimento como sendo aqueles cujos valores são menores que  $260 \text{ kg/m}^3$ , mínimo exigido para concretos estruturais pela NBR 12655 [42] para classe de agressividade I. Os CAA das misturas terciárias PCA20MK20 e PCA30MK20 apresentam resistências superiores a classe de agressividade IV, ou seja, maior que 40 MPa, mesmo não atendendo aos requisitos de consumo de cimento e relação água-cimento mínimo exigido para essa classe de agressividade, quais sejam  $360 \text{ kg/m}^3$  e 0,45 respectivamente. Desta forma, estes resultados sugerem que esta norma não representa bem todos os tipos de concreto, sobretudo os CAA e os CAA-BCC. As recentes inovações em concretos possibilitam produzir concretos com qualidade superior e consumos de cimento muito menores.

Esses consumos de cimento menores podem ser expressos por uma relação de eficiência dada pela quantidade de resistência promovida por cada kg de cimento. Nota-se que os CAA-BCC estudados neste trabalho apresentam relações de 0,26 MPa/kg e 0,28 MPa/kg, para as composições PCA20MK20 e PCA30MK20 respectivamente, enquanto que o REFCAA apresenta relação de apenas 0,11 MPa/kg. Alguns

estudos que avaliaram CAA com baixo nível de cimento usaram consumos de cimento de 150 a 250 kg/m<sup>3</sup>, associado a pozolanas naturais, cinzas volantes, pó calcário e sílica ativa, como finos totais até 600 kg/m<sup>3</sup>, estas adições minerais combinadas promovem resistências após 28 dias entre 20 a 65 MPa, dependendo do consumo de cimento, tipo de adição mineral, compactação da mistura e temperatura de cura [44- 46]. Neste contexto verifica-se a eficiência das composições PCA20MK20 e PCA30MK20 que utilizam materiais regionais e de menor impacto ambiental que o cimento Portland.

BARBOZA e ALMEIDA FILHO [12] estudaram o impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento. No estudo foram encontrados valores de consumo de cimento para as quatro dosagens analisadas relativos à resistência à compressão aos 28 dias com valores entre 7,91 kg/m<sup>3</sup>/Mpa, para o CAA de referência, e 5,87 kg/m<sup>3</sup>/Mpa para o CAA com baixo consumo de cimento. No presente estudo, é possível encontrar consumos de cimento relativos à resistência à compressão aos 28 dias variando de 8,07 kg/m<sup>3</sup>/MPa para o REFCAA e 3,47 kg/m<sup>3</sup>/Mpa para o PCA30MK20, demonstrando um excelente desempenho em termos de consumo de material cimentício.

As melhorias de resistência dos concretos com o emprego de adições pozolânicas são promovidas pela densificação da matriz da pasta, devido às reações com o hidróxido de cálcio e formação de C-S-H adicional, e maior compacidade da zona de transição. Na zona de transição há também a redução da porosidade capilar e redução do teor de hidróxido de cálcio, aumentando então a quantidade de silicato de cálcio hidratado secundário próximo ao agregado [28].

### 3.6 Difusão de íons cloretos

A migração de cloretos no concreto está relacionada com o transporte dos íons cloro de uma zona mais concentrada para uma menos concentrada. Este transporte ocorre na fase líquida, por movimento de íons em solução na fase aquosa intersticial.

O cálculo do coeficiente de difusão efetivo é feito a partir do fluxo em regime permanente. O período para atingir o fluxo permanente é muito longo, o que inviabiliza o controle de qualidade e dosagem de concretos, por isso na prática se realiza ensaios acelerados aplicando-se um campo elétrico externo, como o especificado no LNEC E 463.

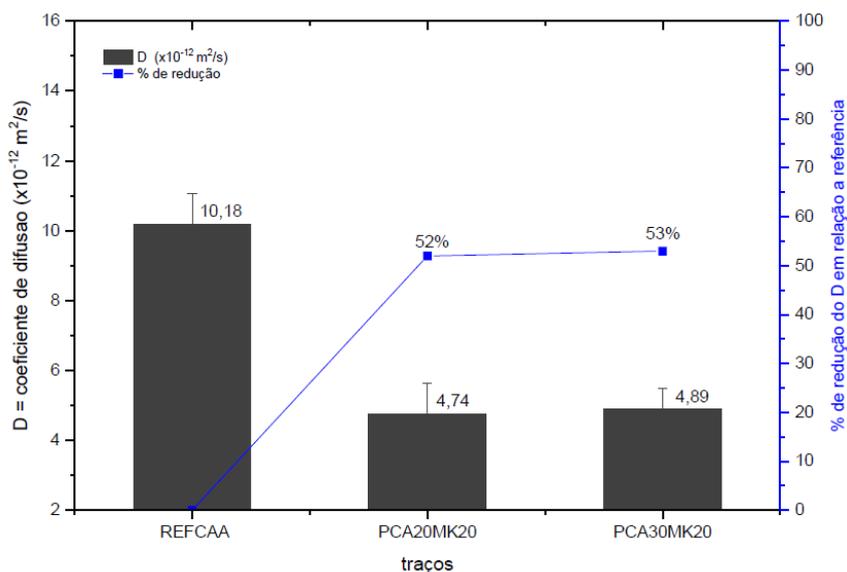
A difusão de íons cloreto sofre a influência de diversos parâmetros. Como principais destaca-se a relação água/cimento, tipo e teor de adição mineral, idade e condições de hidratação e temperatura. As Figuras 7 e 8 apresentam a medida da profundidade de penetração de cloretos, medida através da aspersão de nitrato de prata e os coeficientes de difusão de íons cloreto medidos de acordo com a equação A. Estas medidas procuraram avaliar a influência do tipo e teor de adições minerais utilizadas em substituição ao cimento Portland para produzir CAA com baixos teores de cimento, já que os outros fatores intervenientes foram mantidos constantes.

Após medição das profundidades de penetração dos íons cloreto (Figura 7), os resultados dos coeficientes de difusão dos cloretos por regime não estacionário mostram o aumento da resistência à penetração dos cloretos nos concretos com as adições, conforme mostra a Figura 8.



**Figura 7:** Medição das profundidades de penetração dos íons cloreto.

Os CAA com baixos teores de cimento em misturas terciárias contendo metacaulim aumenta a fixação dos cloretos nos CAA, favorecendo a formação de cloroaluminato de cálcio, conhecido como sal de Friedel, devido ao alto teor de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) presente em sua composição. Dessa forma, o metacaulim possibilitou a diminuição da quantidade de cloretos livres que penetraram através do concreto.



**Figura 8:** Coeficiente de difusão dos cloretos aos 28 dias.

Os CAA com baixos teores de cimento (PCA20MK20 e PCA30MK20) proporcionaram uma redução de 53,5% e 52% respectivamente, no coeficiente de difusão de íons cloreto em relação ao REFCAA. Essas significativas reduções podem ser explicadas pela presença do metacaulim e pela atividade pozolânica da PCA e pelo efeito filler, que proporcionam refinamento dos poros e contribuem significativamente para a melhoria da matriz da pasta e da zona de transição e resultam em maior dificuldade da passagem dos íons cloreto por difusão. KAVITHA *et al.* [28] verificaram que o aumento do conteúdo em MK resulta em redução notável na penetração de íons cloreto, atribuindo tal fenômeno à formação de C-S-H secundário durante a reação pozolânica do MK com os produtos de hidratação do cimento, resultando no refinamento dos poros e redução da permeabilidade do concreto. Da mesma forma, os resultados do estudo desenvolvido por GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL [24] evidenciam que os coeficientes de difusão do cloreto de amostras de concreto misturado PCA diminuem continuamente com aumento do teor de PCA até 25% de substituição. Em 30% e 35% de PCA, há um aumento no coeficiente de difusão, porém esses valores também são menores em comparação com o concreto de referência, sendo a redução de 28% no coeficiente de difusão do cloreto para 30% de porcentagem de substituição do cimento por PCA.

A adição de mais pozolana da casca do arroz, em substituição ao cimento, realizada na formulação PCA30MK20 não altera os coeficientes de difusão, devido ao efeito de diluição, já que o metacaulim é que tem maior contribuição na mitigação ao ataque por íons cloreto.

Da análise dos resultados é possível verificar que todas as composições apresentam um comportamento significativamente melhor que o da composição de referência, o que permite evidenciar que a inclusão de grandes volumes de adições traz claros benefícios à durabilidade dos concretos quanto ao ataque por cloretos. De acordo com CELIK *et al.* [45] com base na penetração de cloreto através dos testes de migração, quando os coeficientes de difusão (D) são abaixo de  $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , os concretos apresentam muito alta resistência à penetração, o que é o caso das formulações PCA20MK20 e PCA30MK20, já a composição de referência tem moderada resistência a cloretos.

KANNAN e GANESAN [27] observaram que a permeabilidade ao íon cloreto do CAA com adições de PCA, MK e PCA + MK diminuiu até 15%, 30% e 40%, respectivamente. Assim, as misturas com um teor mais elevado dessas adições exibiram melhor resistência a penetração de íons cloreto, em decorrência dos elevados teores de alumina do metacaulim que proporcionaram um aumento na fixação dos cloretos no concreto, através da formação do cloroaluminato de cálcio. GILL e SIDDIQUE [26] perceberam redução na penetração de íons cloreto em todas as idades estudadas, havendo até 35% menos penetração de íons cloreto em 28 dias e 73% menos penetração de íons cloreto em 90 dias, para a composição com 10% de MK e 10% de PCA.

Com a substituição de 40 e 50% do cimento por MK e PCA, os CAA com baixos teores de cimento apresentaram significativa melhora em relação ao CAA de referência. Tal fato reafirma a eficácia do uso das adições em estudo quando utilizadas em substituição parcial ao cimento para produzir CAA com baixo consumo, promovendo aos concretos maior compacidade, menor porosidade, e maior resistência à penetração

dos agentes agressivos, notadamente o ataque por cloretos, que é principal fonte agressiva aos concretos colocados nas regiões costeiras do Brasil.

#### 4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados experimentais deste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A capacidade de autoadensabilidade de misturas ternárias de CAA com baixos teores de cimento e elevados teores de MK e PCA foram alcançadas, no entanto a demanda de aditivo superplastificante foi consideravelmente maior nesses CAA.

- Os CAA com misturas ternárias de cimento, metacaulim e pozolana da casca do arroz com consumos inferiores a  $260 \text{ kg/m}^3$  apresentaram resistência à compressão e de durabilidade frente a cloretos superior ao CAA de referência com consumo de cimento de  $450 \text{ kg/m}^3$ .

- A incorporação de elevados teores de PCA e MK nos CAA tem significativa interferência nas propriedades do concreto no estado fresco, aumentando a coesão e diminuindo a fluidez do concreto, o que pode ser contornado pela adequada dosagem dos finos e do aditivo superplastificante.

- As adições proporcionaram uma maior relação de eficiência entre resistência alcançada por cada kg de cimento utilizado nas misturas, denotando maior sustentabilidade dos CAA com baixo teor de cimento.

- As misturas terciárias (PCA e MK) mostram que a otimização das proporções de cada componente promove uma sinergia adequada para mistura minimizando o uso do cimento Portland através da substituição por materiais suplementares de menor emissão de  $\text{CO}_2$ .

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao IFRN, UFRN e IFPB, por todo o apoio necessário à realização dos ensaios. Ao CNPQ pelo apoio financeiro através do projeto Universal nº 482418/2013-3 e à CAPES e FUNCERN pela concessão de bolsas de pesquisa.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MEYER, C., "The greening of the concrete industry", *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, pp. 601-605, 2009.
- [2] JIN, R., CHEN, Q., SOBOYEJO, A., "Survey of the current status of sustainable concrete production in the US", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 105, pp. 148-159, 2015.
- [3] CORINALDESI, V., MORICONI, G., "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, pp. 2869-2876, 2009.
- [4] ISAIA, G., FURQUIM, P., GASTALDINI, A., "A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions", *Construction and Building Materials*, v. 36, pp. 597-603, 2012.
- [5] BACARJI, E., *et al.*, "Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers", *Construction and Building Materials*, v. 45, pp. 1-10, 2013.
- [6] SILVA, C.M.M.A.E., CAPUZZO, V.M.S., "Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios", *Matéria*, v. 25, n. 1, 2020.
- [7] ADEKUNLE, S., *et al.*, "Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers", *Cement and Concrete Composites*, v. 62, pp. 125-133, 2015.
- [8] ANJOS, M.A., CAMÕES, A., JESUS, C., "Eco-Efficient Self-Compacting Concrete with Reduced Portland Cement Content and High Volume of Fly Ash and Metakaolin", *Key Engineering Materials*, pp.172-181, 2015.
- [9] CELIK, K., *et al.*, "Mechanical properties, durability and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder", *Cement and Concrete Composites*, v. 56, pp. 59-72, 2015.
- [10] LING, S., KWAN, A., "Adding limestone fines as cementitious paste replacement to lower carbon footprint of SCC", *Construction and Building Materials*, v. 111, pp. 326-336, 2016.
- [11] SANTOS, R.F.C., CASTRO, A.L., GONÇALVES, K.M., "Produção de concreto autoadensável incorporado com resíduo da indústria de cerâmica vermelha", *Matéria*, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.

- [12] BARBOZA, L.S., ALMEIDA FILHO, F.M., “Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão”, *Matéria*, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.
- [13] PELISSER, F., VIEIRA, A., BERNARDIN, A.M., “Efficient self-compacting concrete with low cement consumption”, *Journal of Cleaner Production*, v. 175, pp. 324–332, fev. 2018.
- [14] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3 ed., São Paulo, IBRACON, 2014.
- [15] TUTIKIAN, B.F., DAL MOLIN, D.C., *Concreto auto-adensável*, 2 ed, São Paulo, Pini, 2008.
- [16] LI, Q., *et al.*, “Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: A comparative study”, *Construction and Building Materials*, v. 101, pp. 184–192, dez. 2015.
- [17] DAL MOLIN, D.C.C., *Adições Minerais*. In: *Isaia, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, v. 1, Cap. 08, pp. 261–310, 2011.
- [18] CAMPOS, P.G.S., “Betões eco-eficientes com elevados teores de adições minerais”. Tese M.Sc., Portugal, Universidade do Minho, 2012.
- [19] SATHURSHAN, M., *et al.*, “Untreated rice husk ash incorporated high strength self-compacting concrete: Properties and environmental impact assessments”, *Environmental Challenges*, v. 2, jan. 2021.
- [20] CHOPRA, D., SIDDIQUE, R., “Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash”, *Biosystems Engineering*, v. 130, pp. 72-80, 2015.
- [21] CORDEIRO, G., *et al.*, “Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes”, *Construction and Building Materials*, v. 29, pp. 641-646, 2012.
- [22] MEHTA, P.K., FOLLIARD, K.J., “Rice husk ash – a unique supplementary cementing material”. In: *Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Athens, Greece, pp. 407-430, 1995.
- [23] GASTALDINI, A., *et al.*, “Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash”, *Construction and Building Materials*, v. 54, pp. 369-377, 2014.
- [24] GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K., “Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 8, pp. 1675–1683, ago. 2008.
- [25] GARRETT, T.D., CARDENAS, H.E., LYNAM, J.G., “Sugarcane bagasse and rice husk ash pozzolans: Cement strength and corrosion effects when using saltwater”, *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 1–2, pp. 7–13, fev. 2020.
- [26] GILL, A.S., SIDDIQUE, R., “Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash”, *Construction and Building Materials*, v. 176, pp. 323–332, jul. 2018.
- [27] KANNAN, V., GANESAN, K., “Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, v. 51, pp. 225-234, 2014.
- [28] KAVITHA, O.R., *et al.*, “Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin”. *Applied Clay Science*, v. 124, pp. 143-149, 2016.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.
- [31] ARAÚJO, T.F., *et al.*, “Argamassas autonivelantes com substituição parcial do cimento por altos teores de resíduos e adições minerais para concreto autoadensável”. In. *56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 56*, Natal, 2014.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 15823-1: Concreto autoadensável, Rio de Janeiro, 2010.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.
- [35] LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, LNEC 463, Betões: Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa, 2004.
- [36] EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. Guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, UK pp. 1-32, 2002.
- [37] COPPOLA, L. “Mix Proportioning of Self-Compacting Concretes”. *Indústria Italiana del Cemento*, pp. 152-163, 2001.
- [38] EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. Specification and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, 2005.

- [39] SAFIUDDIN, M., WEST, J., SOUDKI, K., “Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash”, *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 9, pp. 708-717, 2010.
- [40] SEDRAN, T., DE LARRARD, F., “Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model”, *Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7*, 1999. pp. 321-332.
- [41] HEARN, N., HOOTON, R.D., NOKKEN, M.R., “Pore structure, permeability, and penetration resistance characteristics of concrete”. In: (*Ed.*). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*: ASTM International, 2006.
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, Rio de Janeiro, 2015.
- [43] NEVILLE, A.M. *Properties of Concrete*, 4 ed, Pearson Education Limited, Essex, England 1995.
- [44] CELIK K., *et al.*, “A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high volume natural pozzolan or high-volume fly ash”, *Construction and Building Materials*, v. 67, pp. 14-19, 2014a.
- [45] CELIK K., *et al.*, “High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete”, *Cement and Concrete Composites*, v. 45, pp. 136-147, 2014b.
- [46] DINAKAR, P., BABU, K.G., SANTHANAM, M. “Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes”, *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 10, pp. 880-886, 2008.

#### ORCID

Fernanda Karolline de Medeiros	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2639-2260">https://orcid.org/0000-0003-2639-2260</a>
Marcos Alyssandro Soares dos Anjos	<a href="https://orcid.org/0000-0001-9563-2534">https://orcid.org/0000-0001-9563-2534</a>
Maria das Vitorias Vieira Almeida de Sá	<a href="https://orcid.org/0000-0002-8324-7599">https://orcid.org/0000-0002-8324-7599</a>
Evilane Cássia de Farias	<a href="https://orcid.org/0000-0001-7446-042X">https://orcid.org/0000-0001-7446-042X</a>
Raquel Ferreira do Nascimento	<a href="https://orcid.org/0000-0003-0286-9845">https://orcid.org/0000-0003-0286-9845</a>