

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CAA AO ATAQUE DE ÍONS CLORO: ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO

Vandick Sampaio de Oliveira, Fernanda Nepomuceno Costa, Silas de Andrade Pinto

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/Laboratório de Materiais de Construção, Rua Rui Barbosa, 710, Centro – 44380-000 – Cruz das Almas-BA, Brasil, vandicksampa@gmail.com, fernandacosta@ufrb.edu.br, silasandrdepinto@gmail.com

Resumo

A importância do concreto como material de construção destaca a relevância da análise de seu desempenho. O concreto autoadensável (CAA) é um material que se destaca na construção civil por sua capacidade de preencher formas sem necessidade de compactação externa, devido à sua fluidez e resistência à segregação. Nesse contexto, essa pesquisa enfatiza a importância da análise de durabilidade do concreto, especialmente em relação à migração de cloretos, que pode comprometer a integridade das estruturas. Realizada na UFRB, a investigação utilizou o CAA produzido com areia natural parcialmente substituída por areia de britagem. Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, porosidade aparente e migração de cloretos. Os resultados mostraram que o CAA produzido superou as expectativas nos resultados de resistência à compressão e apresentou variações na porosidade aparente entre as amostras. Essas variações influenciam a migração de íons cloro, com o estudo concluindo que a distribuição de poros pode afetar o desempenho do concreto em termos de durabilidade.

Palavras-chave: Migração. Cloreto, Durabilidade.

Área do Conhecimento: Engenharia Civil

Introdução

O concreto é um material de construção amplamente utilizado em todo o mundo. A análise de desempenho de todo concreto é de extrema importância, pois o mesmo comprova sua trabalhabilidade, resistência e durabilidade para se obter garantia de serviço, qualidade e segurança na construção de edificações, se tornando assim essencial. Mesmo que a dosagem, a mistura e a escolha dos materiais constituintes sejam feitas de maneira correta, o resultado final da concretagem depende da qualidade de compactação, pois um adensamento realizado de forma ineficiente pode resultar em falhas de concretagem, comprometendo o desempenho dos elementos estruturais (Siqueira, 2020).

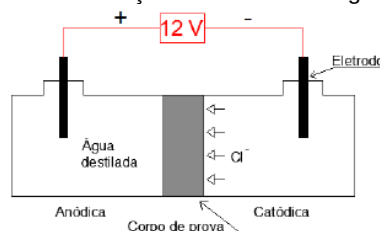
De acordo com Tutikian e Molin (2008), o estudo sobre o concreto autoadensável (CAA) adquire relevância no setor da construção civil, visto que apresenta atributos que permitem a redução de etapas nas técnicas construtivas, uma delas é a sua capacidade de se moldar nas fôrmas por conta do seu peso próprio e preencher os espaços destinados a ele, sem necessidade de vibração ou compactação externa de qualquer natureza.

Para um concreto ser considerado autoadensável deve apresentar três aspectos importantes: ser resistente a segregação, possuir habilidade passante e fluidez (EFNARC, 2002). Segundo Tutikian e Molin (2008), resistência a segregação é a capacidade do CAA percorrer, ou não, por obstáculos sem perder a fluidez e a coesão. A habilidade passante é capacidade de o CAA escoar pelas fôrmas sem segregar nem interromper o fluxo. E a fluidez é propriedade que se define como a capacidade do CAA de fluir dentro das fôrmas preenchendo todos os espaços, levando o concreto por toda extensão.

Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2024) Edificações Habitacionais – Desempenho - parte 1: Requisitos Gerais, analisar a durabilidade é um dos aspectos importantes a garantir requisitos para o desempenho desejado de uma edificação ao longo do tempo, a mesma se extingue quando deixa de atender as funções que lhe foram atribuídas, seja pela redução do desempenho devido a atuação de agentes de degradação ou por redução da sua vida útil de projeto (VUP).

De acordo com Helene (1993), essa técnica visa identificar a migração de íons de cloro no interior do concreto, em função do aparecimento de campo elétrico decorrente da deflagração das pilhas de corrosão eletroquímica, o qual tende a concentrar os cloretos nas regiões anódicas intensificando o processo de corrosão. Segundo Pinto (2016), este ensaio tem como princípio a aplicação de uma diferença de potencial entre duas células, uma negativa, contendo solução de íons cloreto (célula catódica) e a outra positiva, contendo água destilada (célula anódica), o que possibilita o transporte dos cloretos da célula catódica para a célula anódica, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Esquema para a realização do ensaio de migração de cloretos.



Fonte: Autores.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a durabilidade de concretos, em equipamento de baixo custo, avaliando a migração de cloretos, sendo empregado o concreto autoadensável (CAA), produzido a partir de um traço referência disponibilizado por uma concreteira.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) – Campus de Cruz das Almas, no laboratório de Materiais de Construção Civil. Sendo empregado o CAA, avaliou-se suas propriedades utilizando um traço referência disponibilizado por uma empresa fornecedora de concreto situada na Bahia, com o intuito de analisar o seu comportamento e desempenho substituindo parcialmente a areia natural (AN) pela incorporação de areia de britagem (AB). O estudo inicialmente fundamentou-se na revisão bibliográfica, com o propósito de corroborar a importância da análise de durabilidade em concretos quanto a ação dos íons cloro, posteriormente foi realizado a caracterização dos materiais; realização dos ensaios nos estados fresco e endurecido do CAA estudado; e a coleta e correlação dos resultados obtidos no ensaio de migração de cloretos.

A composição do CAA incluiu: cimento Portland CP-V-ARI, fornecido pela empresa doadora dos materiais e fabricado pela Intercement; areia natural (agregado miúdo), extraída de uma jazida em Alagoinhas; brita de 12,5 mm (agregado graúdo), proveniente de extração em pedra localizada em Feira de Santana; água da concessionária local no município de Cruz das Almas; e areia de britagem (AB), extraída em Feira de Santana, empregada na substituição parcial de areia natural (AN) num traço referência.

Os aditivos utilizados foram o polifuncional MIRA SET 148, fabricado pela GCP Applied Technologies, redutor de água para concreto, e o superplastificante POWERFLOW 1108, produzido pela MC-Bauchemie Brasil, indicado para grandes reduções na quantidade de água na produção do concreto. Para o ensaio de migração de cloretos na célula anódica utilizou-se água destilada e deionizada e na célula catódica a solução utilizada foi o cloreto de sódio (NaCl) a uma concentração de 1M.

Avaliou-se as propriedades do CAA em um único traço referência (Figura 2) comercializado por empresa fornecedora de concreto industrializado, localizada na região do recôncavo baiano, com o intuito de analisar o seu comportamento e desempenho substituindo parcialmente a areia natural (AN) pela incorporação de areia de britagem (AB).

Foram moldados 15 exemplares cilíndricos de 10x20 cm de CAA a partir do traço referência seguindo as recomendações e exigências da NBR 5738 (ABNT, 2015), e pensando em facilitar a desforma após 24 horas foi utilizado desmoldante. Posteriormente, com 10 dias de cura imersa em reservatório com água e cal, 4 corpos de prova foram cortados, utilizando-se uma lâmina de corte elétrica, sendo obtidas, assim, amostras com espessura média de 30 mm. As amostras foram imersas em água por 24 horas para atingirem completa saturação, conforme sugerido por Santos (2006) e

adotado por Ribeiro (2010). Esse procedimento assegura que o transporte de cloretos seja exclusivamente governado pelo fenômeno da difusão.

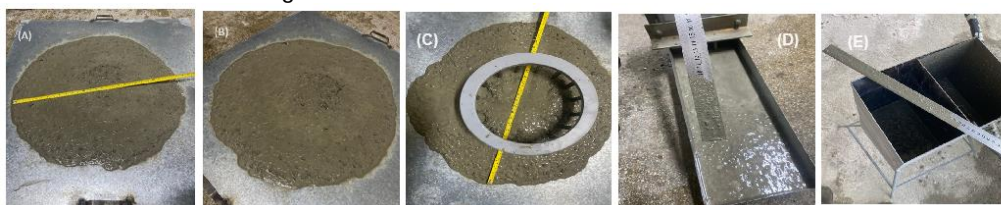
Figura 2 - Traço referência utilizado na produção do CAA.

Nome do Traço	Referência	CP V	AN	AB	Brita	a/c	Mira Set 148	Powerflow 1108
T-REF	Traço unitário	1	2,12	0,53	2,27	0,56	1,5 l/m ³	2,35 l/m ³
	Consumo	10,86 kg	23,04 kg	5,76 kg	24,30 kg	-	45ml	70ml

Fonte: Autores.

Os ensaios no estado fresco são cruciais para garantir que o concreto autoadensável possua as propriedades necessárias para uma função adequada e desempenho desejado, e são regidos pela NBR 15823 (ABNT, 2017), Partes de 1 a 6. No presente estudo foram utilizados os ensaios de espalhamento (Slump Flow); viscosidade plástica aparente sob fluxo livre (t500); índice de estabilidade visual (IEV); habilidade passante sob fluxo livre (Anel J) e habilidade passante sob fluxo confinado (Caixa U e Caixa L), conforme a Figura 3.

Figura 3 – Ensaios realizados no estado fresco.



Fonte: Autores.

Em seguida, para os ensaios de resistência à compressão axial utilizou-se 8 corpos de prova, foram executados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), para as idades de 14 horas, 1, 7 e 28 dias, sendo rompidos para cada idade analisada dois corpos de prova. Além disso também foi realizado o ensaio de porosidade aparente nas 4 amostras cilíndricas que foram utilizadas no ensaio de migração, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio de migração de cloretos no presente estudo selecionou-se o equipamento sugerido por Andrade (1993), o qual baseava-se no cálculo do coeficiente de difusão no estado estacionário, e estudos posteriores que utilizaram os ensaios de migração de cloretos para cálculo do coeficiente de difusão no estado não-estacionário, e especialmente devido à consistência demonstrada em estudo anterior (Ribeiro, 2010) que utilizaram esse método, confirmando-o assim como uma alternativa à ASTM C 1202.

Utilizou-se os seguintes materiais para confecção do equipamento (Figura 4): Conexões “Tê” em PVC com diâmetro nominal de 100 mm; Tubo em PVC para esgoto com diâmetro nominal de 100 mm; CAP em PVC para esgoto com diâmetro nominal de 100 mm; Anel de vedação borracha esgoto com diâmetro nominal de 100 mm; Cola de silicone; Cola Epóxi; Eletrodo em aço inoxidável; Fonte universal à aplicação de uma tensão média de 12 volts; Suporte de madeira; Termo Higrômetro digital.

No ensaio de migração de cloretos foram utilizadas 4 diferentes amostras cilíndricas de concreto autoadensável com espessura de 3 cm, extraídas da parte central de corpos de prova utilizando uma serra elétrica industrial. A amostra de concreto foi posicionada entre as duas células, funcionando como uma membrana. Nesse método, o deslocamento dos íons cloro através do corpo de prova é provocado pela corrente elétrica gerada devido à diferença de potencial de 12 volts, aplicada por uma fonte de corrente contínua através dos eletrodos em aço inoxidável presentes em cada célula.

O ensaio consistiu na realização de medidas sucessivas diariamente na célula anódica, com auxílio do Condutivímetro Digital Portátil TDS tipo caneta. No uso de uma planilha automatizada para tratamento e interpretação dos resultados obteve-se valores de teor de cloretos (Cl⁻). Ao decorrer do ensaio de migração de cloretos, existe um período inicialmente para que os íons cloro saturam a amostra de concreto e provoquem a sua passagem para a célula anódica, denominado “time-lag (τ)”.

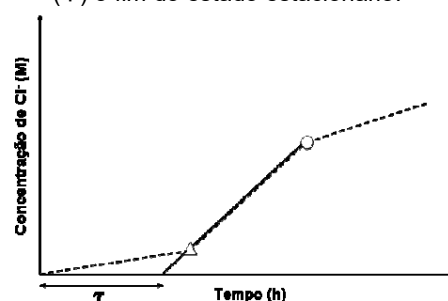
O *time-lag* é obtido através da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o estado estacionário com o eixo do tempo (abscissas), como apresentado na Figura 5.

Figura 4 – Equipamento de baixo custo para avaliar a migração de cloretos em concretos.



Fonte: Autores.

Figura 5 – Determinação do time lag (τ), (Δ) o início e (Φ) o fim do estado estacionário.



Fonte: Ribeiro.

Obtido os valores de *time-lag* e o gráfico padrão obtido para cada amostra analisada foram determinados os valores de fluxo de íons e coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s) e não-estacionário (D_{ns}) ao fim do ensaio de migração de cloretos.

Resultados

A Tabela 1 sumariza os parâmetros de caracterização física dos agregados miúdos e graúdos utilizados na produção do CAA no presente estudo. Os resultados mostraram que a areia de britagem tem um diâmetro máximo característico maior do que o da areia natural e, consequentemente, um maior módulo de finura. Observa-se uma diferença significativa no teor de materiais pulverulentos entre a areia de britagem e a areia natural, resultando em um aumento na quantidade de finos na mistura. A areia de britagem apresenta um teor de maior em comparação à areia natural, o que pode influenciar diretamente nas propriedades da mistura final.

Tabela 1 - Característica físicas dos agregados utilizados.

Propriedade	Areia de Britagem	Areia Natural	Brita 12,5mm
Massa específica (kg/dm³)	2,73±0,01	2,64±0,01	2,79±0,01
Massa unitária (kg/dm³)	1,66±0,0021	1,62±0,0025	1,39±0,0030
Teor de material pulverulento (%)	12,42±0,37	2,19±0,15	0,5±0,11
Dimensão máxima	4,75	2,36	12,5
Módulo de Finura	3,9	2,4	6,62

Fonte: Autores.

Determinou-se a resistência à compressão axial dos concretos nas idades 14 horas, 1, 7 e 28 dias. Figura 6. No ensaio de porosidade aparente (Figura 7), foram ensaiadas 4 amostras de concreto com idade de 277 dias, sendo neste intervalo de tempo empregadas ao ensaio de migração de cloretos

Nas figuras 8 e 9 são apresentados a evolução da concentração de cloretos na solução presente na célula anódica em função do tempo e os valores obtidos durante o ensaio de migração de cloretos respectivamente.

Figura 6 – Resultado de Resistência a compressão axial em corpos de prova.

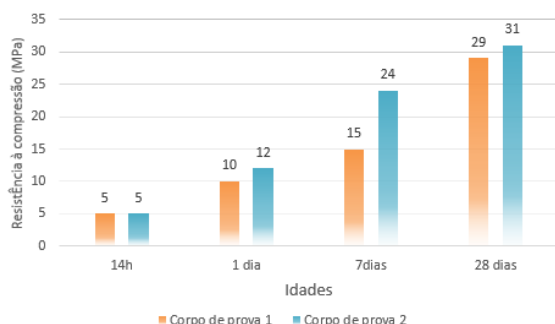
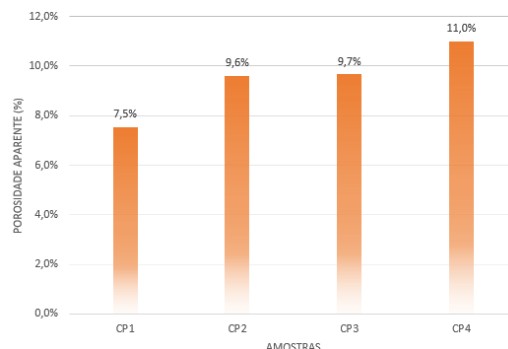
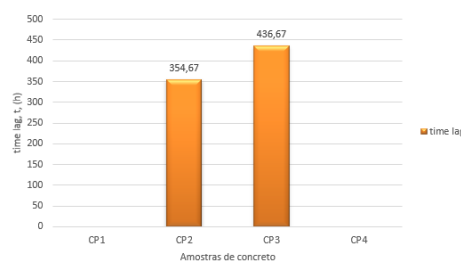
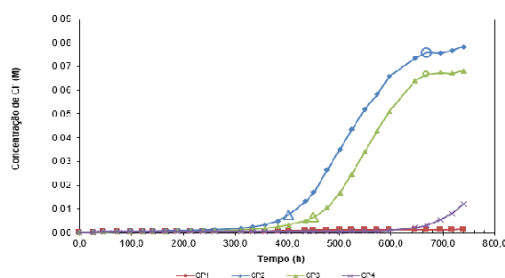


Figura 7 – Porosidade aparente para cada amostra de concreto analisada.



Fonte: Autores.

Figura 8 – (a) Evolução da concentração de cloretos na solução presente na célula anódica em função do tempo. (b) Valores de “time lag” (τ), estimados a partir de ensaios de migração de cloretos em função as amostras de concreto.



Fonte: Autores.

Figura 9 – Resultados obtidos para o “time lag”, fluxo e coeficientes no estado estacionário e não estacionário para as amostras de concreto analisadas.

Amostras	Time lag (τ) (h)	Fluxo de íons cloro (J_{Cl}) (10^{-5} mol/s.cm ²)	D_s (10^{-5} cm ² /s)	D_{Ns} (10^{-5} cm ² /s)
CP1	-	-	-	-
CP2	354,67	2,74	4,29	2,49
CP3	436,67	2,74	4,29	2,02
CP4	-	-	-	-
Curva média (CP2:CP3)	366,67	2,74	4,30	2,41

Fonte: Autores.

Discussão

No que se refere à resistência mecânica do CAA, o concreto dosado apresentou uma resistência à compressão maior que a esperada, pois o valor de resistência à compressão ficou acima do esperado para o traço referência, apresentou-se resistência mecânica superior a 25 MPa com 28 dias.

Para os resultados alcançados de porosidade aparente, os CP2 e CP3 apresentaram valores equivalentes, enquanto o CP1 apresentou valor inferior as demais amostras, como provável justificativa uma melhor compactidade do corpo de prova, conseqüente de um melhor empacotamento das partículas na mistura. Enquanto o CP4, atingiu porosidade aparente superior as outras amostras, valores demonstrados.

Com relação aos valores de *time lag*, o CP1 não apresentou tendência de inflexão na curva de concentração de cloretos não chegando ao estado estacionário até o fim do ensaio, tendo em vista que seu valor probabilístico de *time lag* seja superior ao de encerramento do ensaio, pois como apresentado sua porosidade aparente obteve valor inferior as demais amostras. O CP4 apesar de possuir uma leve

inflexão em sua curva, houve vazamento na solução na célula catódica, o que comprometeu os resultados vindo a serem desconsiderados. Logo não foram obtidos os parâmetros para as mostras CP1 e CP4.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos do CAA demonstraram que o concreto possui propriedades necessárias no estado fresco, visando a garantia de seu desempenho, proporcionando que o mesmo possa ser utilizado eficientemente em aplicações complexas e em áreas densamente armadas.
- A diferença entre as porosidades aparentes pode ser explicada pela quantidade de poros nas diferentes amostras de corpo de prova, possivelmente ocasionado por uma maior ou menor distribuição dos agregados na pasta e na mistura.
- Os resultados obtidos para os corpos de prova validados mostraram que as proposições teóricas utilizadas para modelar os estados não estacionário e estacionário apresentaram consistência experimental.
- Para os corpos de prova, observou-se uma probabilidade de aumento no “time-lag” (τ) do CP1, à medida que a porosidade seja inferior as demais, haja uma diminuição da quantidade relativa de poros ou da porosidade total. Tal fenômeno poderia explicar a diminuição do fluxo de íons nesta amostra.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR 15823-3**: Concreto Autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante Métodos do anel J. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR 15823-4**: Concreto Autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho parte 1: Requisitos gerais. NBR 15575-1, Rio de Janeiro, 2024.
- BRANDÃO, M. C. S. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica da incorporação de areia de britagem em substituição parcial da areia natural para a produção de CAA a partir de um traço de uma usina**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.
- EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. United Kingdom, 2002.
- RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 5(2), 137-152, 2012.
- SIQUEIRA, T. P. L. **Uso de finos de rocha granítica (FRG) e areia de britagem, produzidos na Região Metropolitana de Salvador (RMS), para a produção de concreto autoadensável**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2020.
- TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D., **Concreto Autoadensável**. São Paulo: Pini, 2008.

Agradecimentos

Ao grupo de pesquisa em Valorização de Resíduos na Construção Civil da UFRB (Valora Civil), à FAPESB e PIBIC no amparo e fomento nas pesquisas e às empresas Massa Fort Concreto e MCBauchemie pela doação dos materiais.