

## Capacidade de transporte de íons cloreto em concretos com adições minerais usadas no Brasil

M. S. Freitas<sup>1\*</sup> , G. R. Meira<sup>1,2</sup> 

\* Autor de Contato: [mariasilvajn@email.com](mailto:mariasilvajn@email.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.603>

Recebido: 06/05/2022 | Correções recebidas: 29/11/2022 | Aceito: 13/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

### RESUMO

O objetivo desse trabalho é estudar a capacidade de transporte de íons cloretos em concretos com adições de metacaulim e cinza volante. Para tanto, foram realizados ensaios de resistividade elétrica superficial e difusão de íons cloreto (NT Build 443). Como resultado, observou-se que o uso das adições empregadas foi eficiente para retardar o ingresso de íons cloreto, reduzindo o coeficiente de difusão de cloretos -  $D_{ns}$  e aumento na resistividade elétrica superficial -  $\rho$  nos materiais estudados. A relação geral entre  $D_{ns}$  e  $\rho$  para os concretos estudados pode ser expressa por  $D_{ns} = 2,7E-7*\rho^{-0,475}$  e a relação entre os cloretos acumulados no concreto e a resistividade elétrica superficial pode ser expressa por  $Cl_{acum} = 4,09-0,20945\rho$ .

**Palavras-chave:** concreto; cloretos; adições; difusão; resistividade.

**Citar como:** Freitas, M. S., Meira, G. R. (2023), "Capacidade de transporte de íons cloreto em concretos com adições minerais usadas no Brasil", Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 61 – 79, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.603>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Paraíba – UFPB, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Departamento de Construção Civil, João Pessoa, Brasil.

### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora M. S. Freitas contribuiu com a ideia original com 50%, experimentação (100%), metodologia de trabalho (40%), redação e discussão dos resultados (70%); o autor G. R. Meira contribuiu com ideia original em 50%, metodologia de trabalho com 60%, discussão dos resultados com 30%, supervisão e orientações para o trabalho com 100%.

### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

## Transport capacity of chloride ions in concretes with mineral additions used in Brazil

### ABSTRACT

The objective of this work is to study the chloride ions transport capacity in concretes with additions of metakaolin and fly ash. For this purpose, tests of surface electrical resistivity and chloride ion diffusion (NT Build 443) were performed. As a result, it was observed that the use of the adopted additions was efficient to delay the ingress of chloride ions, reducing the diffusion coefficient of chlorides -  $D_{ns}$  and increasing the surface electrical resistivity -  $\rho$  in the studied materials. The general relationship between  $D_{ns}$  and  $\rho$  for the studied concretes can be expressed by  $D_{ns} = 2,7E-7*\rho^{-0,475}$  and the relationship between chlorides accumulated into concrete and surface electrical resistivity can be expressed by  $Cl_{acum} = 4,09-0,20945\rho$ .

**Keywords:** concrete; chlorides; additions; diffusion; resistivity.

## Capacidade de transporte de íons cloruro em hormigões com adições minerais usadas em Brasil

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la capacidad de transporte de iones cloruro en hormigones con adiciones de metacaolín y ceniza volante. Para ello, se realizaron pruebas de resistividad eléctrica superficial y difusión de iones cloruro (NT Build 443). Como resultado, se observó que el uso de las adiciones empleadas fue eficiente para retrasar la entrada de iones cloruro, reduciendo el coeficiente de difusión -  $D_{ns}$  y aumentando la resistividad eléctrica superficial -  $\rho$  en los materiales estudiados. La relación general entre  $D_{ns}$  y  $\rho$  para los hormigones estudiados puede expresarse mediante  $D_{ns} = 2,7E-7*\rho^{-0,475}$  y la relación entre los cloruro acumulados en el hormigón y la resistividad eléctrica superficial puede expresarse mediante  $Cl_{acum} = 4,09-0,20945\rho$ .

**Palabras clave:** hormigón; cloruro; adición; difusión; resistividad.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progresso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da questão ambiental, o uso de adições minerais em matrizes cimentícias se intensificou nos últimos anos. No Brasil, além da adição nos cimentos de produção nacional, pode-se verificar o seu emprego diretamente nas dosagens de concreto. De acordo com a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018), as adições podem ser do tipo pozolânica, carbonática ou escória granulada de alto forno. Destas combinações, podem ser produzidos cimentos que atendem a requisitos específicos como baixo calor de hidratação e alta resistência a sulfatos, mas ainda não se encontra, no mercado brasileiro, cimentos com foco específico na resistência à penetração de íons cloreto, sendo este, um dos principais causadores de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado (Meira e Ferreira, 2019).

A deterioração precoce de estruturas acometidas pela corrosão de armaduras, em especial aquela desencadeada pelos íons cloreto, levou ao desprendimento de grandes esforços de pesquisas em nível global, com ênfase a partir dos anos 1980 (Andrade, 1997; Cady, 1985; Dal Molin, 1988; Helene, 1993; Cabral, 2000; Meira, 2004). Parte dessas pesquisas teve o objetivo de entender o transporte dos cloretos na matriz cimentícia e, como consequência, buscar alternativas para retardar o transporte dos íons cloreto até a armadura, aumentando assim o tempo de vida de útil das estruturas.

Um dos meios de mitigar o transporte dos íons cloreto no concreto é trabalhar com materiais que aumentam a resistência do concreto ao ingresso desse agente agressivo, quer seja pelo refinamento da rede porosa da matriz, quer seja pela maior capacidade de fixação dos cloretos nessa matriz (Figueiredo *et al.*, 2014; Mendes, 2009; Thomas *et al.*, 2012; Zibara *et al.*, 2008).

Considerando que os principais meios de transporte dos íons cloreto, do meio externo para o interior do concreto, são a absorção capilar e difusão iônica (Helene, 1993) e que, na maioria dos casos, o transporte por difusão prevalece nas camadas mais internas do concreto (Stanish *et al.* 1997; Ferreira 2015) os ensaios de difusão iônica tem sido empregados com regularidade para avaliar a resistência das matrizes cimentícias à penetração dos íons cloreto (Al-Sodani *et al.*, 2021; Costa e Appleton, 2007; Hansen *et al.*, 2016; Maes *et al.*, 2013).

Ensaio naturais e acelerados de difusão ou migração tem sido utilizado para estudar a resistência de diferentes matrizes cimentícias ao ingresso de íons cloreto. A quantificação da taxa com que o processo de difusão ocorre é geralmente expressa através de um coeficiente de difusão. O coeficiente de difusão ( $D$ ), no entanto, é resultado da solução da 2ª lei de Fick e assume alguns pressupostos que ensejam limites em relação ao fenômeno real (Crank, 1975).

A Figura 1 apresenta dados do coeficiente de difusão coletados para mesma idade de cura que mostram o impacto da porosidade dos concretos na capacidade de transporte de cloretos, indicando que a redução da porosidade tem efeito acentuado na resistência à penetração de cloretos. Por outro lado, a Tabela 1 mostra o impacto do teor de aluminatos -  $C_3A$  na capacidade de transporte de matrizes com porosidades semelhantes, indicando que a formação dos cloroaluminatos também tem papel importante na redução da capacidade de transporte de cloretos das matrizes cimentícias. Embora os ensaios de difusão tenham sido empregados com regularidade para avaliar a resistência à penetração de cloretos de matrizes cimentícias há algum tempo na Europa, América do Norte e outras regiões, no Brasil, esses ensaios ainda não são empregados com regularidade. Por outro lado, o tempo demandado na realização desses ensaios fez com que alternativas fossem buscadas nos últimos anos. Nesse contexto, se insere o ensaio de resistividade elétrica superficial, que é um ensaio de aplicação instantânea e tem boa relação com o ensaio de difusão de íons cloreto. Esse tipo de aplicação do ensaio de resistividade elétrica superficial pode ser observado de forma mais presente na última década nos trabalhos publicados pela pesquisadora Carmen Andrade (Andrade, 2018; Andrade *et al.*, 2014; Andrade e D'Andrea, 2011). A Figura 2, exemplifica a boa relação entre o ensaio de resistividade elétrica superficial e a difusividade de íons cloreto.

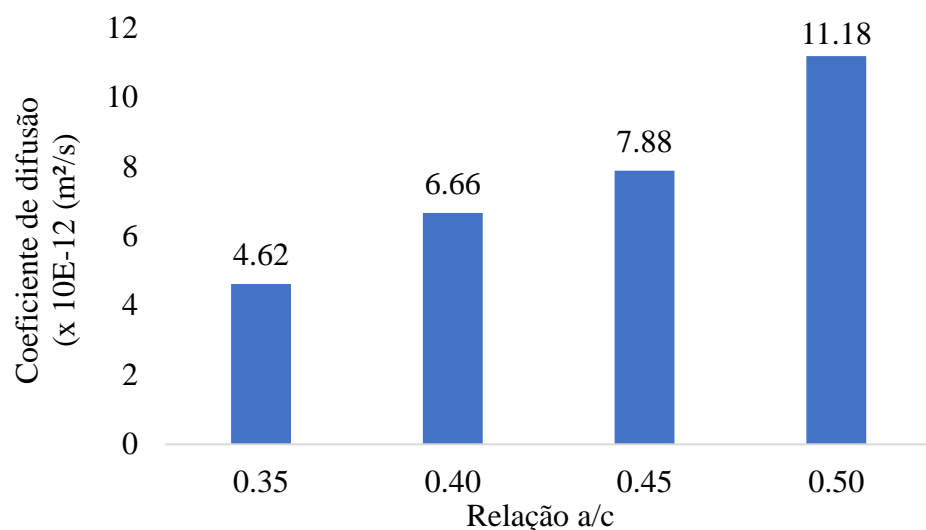


Figura 1. Relação entre relação a/c e coeficiente de difusão de concretos  
Fonte: Valipour *et al.* (2013)

Tabela 1. Relação entre teor de aluminatos e tempo de iniciação da corrosão em distintos teores de C<sub>3</sub>A de concretos

Teor de C <sub>3</sub> A	Relação a/c	% de cloretos livres	Tempo de iniciação da corrosão (dias)
2%	0,5	86%	96
9%		58%	163
11%		51%	180
14%		33%	228

Fonte: Rasheeduzzafar, *et al.* (1990)

As adições minerais ativas (pozolanas) são conhecidas por proporcionarem, ao concreto, refinamento ao sistema de poros e, algumas delas, possibilitarem maior capacidade de ligação de íons cloretos a matriz cimentícia (Moffatt e Thomas, 2018; Meira, 2017). Geralmente o uso de adições pozolânicas ativas como cinza volante, metacaulim, sílica ativa e cinza da casca de arroz resultam na redução da porosidade da matriz e, dependendo da sua composição também incrementam a capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia (Al-Sodani *et al.*, 2021; Thomas *et al.*, 2012), auxiliando na redução da velocidade de transporte do agente agressivo.

Considerando que, cada uma dessas adições apresenta impacto singular no comportamento do concreto frente ao transporte de íons cloreto em função da sua atividade pozolânica e da sua composição química, elas podem conduzir a desempenhos variados de estruturas de concreto expostas a ambientes marinhos.

Diante disto, este estudo avalia a capacidade de transporte de íons cloretos em concretos produzidos com adições pozolânicas produzidas no Brasil, em especial cinza volante e metacaulim, considerando ensaios de difusão natural de íons cloretos e de resistividade elétrica superficial em ambiente de laboratório.

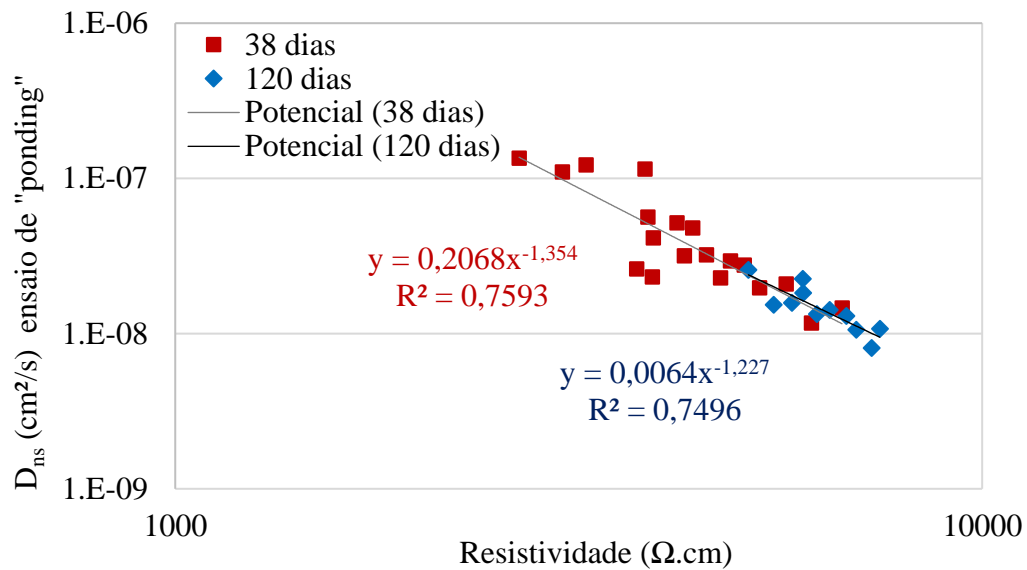


Figura 2. Relação entre resistividade elétrica e difusividade de íons cloreto  
 Fonte: Andrade *et al.* (2014)

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Concretos com relação água/ligante de 0,45 e 0,55 foram empregados no presente estudo. Para cada relação água/ligante, empregaram-se misturas com cimento de alta resistência inicial – CP V ARI, metacaulim – MK, cinza volante – CV compondo as dosagens apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dosagens de concreto empregadas no presente trabalho

Mistura	CP V ARI (Kg)	MK (Kg)	CV (Kg)	Relação a/agl	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)	Aditivo (%)
REF_055	367	-	-	0,55	837	977	202	-
CP V_MK_055	330	37	-	0,55	837	977	202	0,3
CP V_CV_055	275	-	92	0,55	837	977	202	0,3
REF_045	464	-	-	0,45	754	939	213	0,3
CP V_MK_045	417	47	-	0,45	754	939	213	0,4
CP V_CV_045	348	-	116	0,45	754	939	213	0,2

Foram trabalhadas seis misturas de concreto, sendo: REF a dosagem de referência; MK com 10% do cimento substituído por metacaulim e CV com 25% do cimento substituído por cinza volante. Substituições essas realizadas em massa.

O agregado miúdo foi uma areia média de leito de rio com diâmetro máximo ( $D_{m\acute{a}x}$ ) de 4,75 mm e módulo de finura de 2,76. O agregado graúdo foi uma brita granítica com  $D_{m\acute{a}x}$  de 19 mm e módulo de finura de 7,14. Quanto aos finos (cimento e pozolanas), o diâmetro médio ( $D_{m\acute{e}d}$ ) encontrado foi de 8,27  $\mu m$  para o CP V ARI, 14,83  $\mu m$  para o metacaulim e 39,23  $\mu m$  para cinza volante obtido pelo ensaio de difração à laser, pelo método seco, na faixa de 0,10  $\mu m$  a 500  $\mu m$ .

A Figura 3 mostra a distribuição granulométrica dos agregados e dos finos empregados. Observa-se que a cinza volante apresenta uma granulometria superior ao CP V ARI e ao MK. Neto (2018), trabalhado com cinzas da mesma região, para obter finura próxima ao cimento realizou uma moagem por 10 min e obteve  $D_{m\acute{e}d}$  de 27,18  $\mu m$ . Neste estudo, foi utilizada a cinza do mesmo

modo que foi recebida, não foi realizado processo de fragmentação, resultando em granulometria superior aos demais finos. O aditivo empregado foi um superplastificante, a base de policarboxilato, livre de cloretos.

Além do ensaio de granulometria foram realizados os ensaios de fluorescência de raios-X (FRX) para todos os finos e de difração de raios-X (DRX) para as adições pozolânicas, cujos resultados estão expostos nas Tabela 3 e Figura 4, respectivamente.

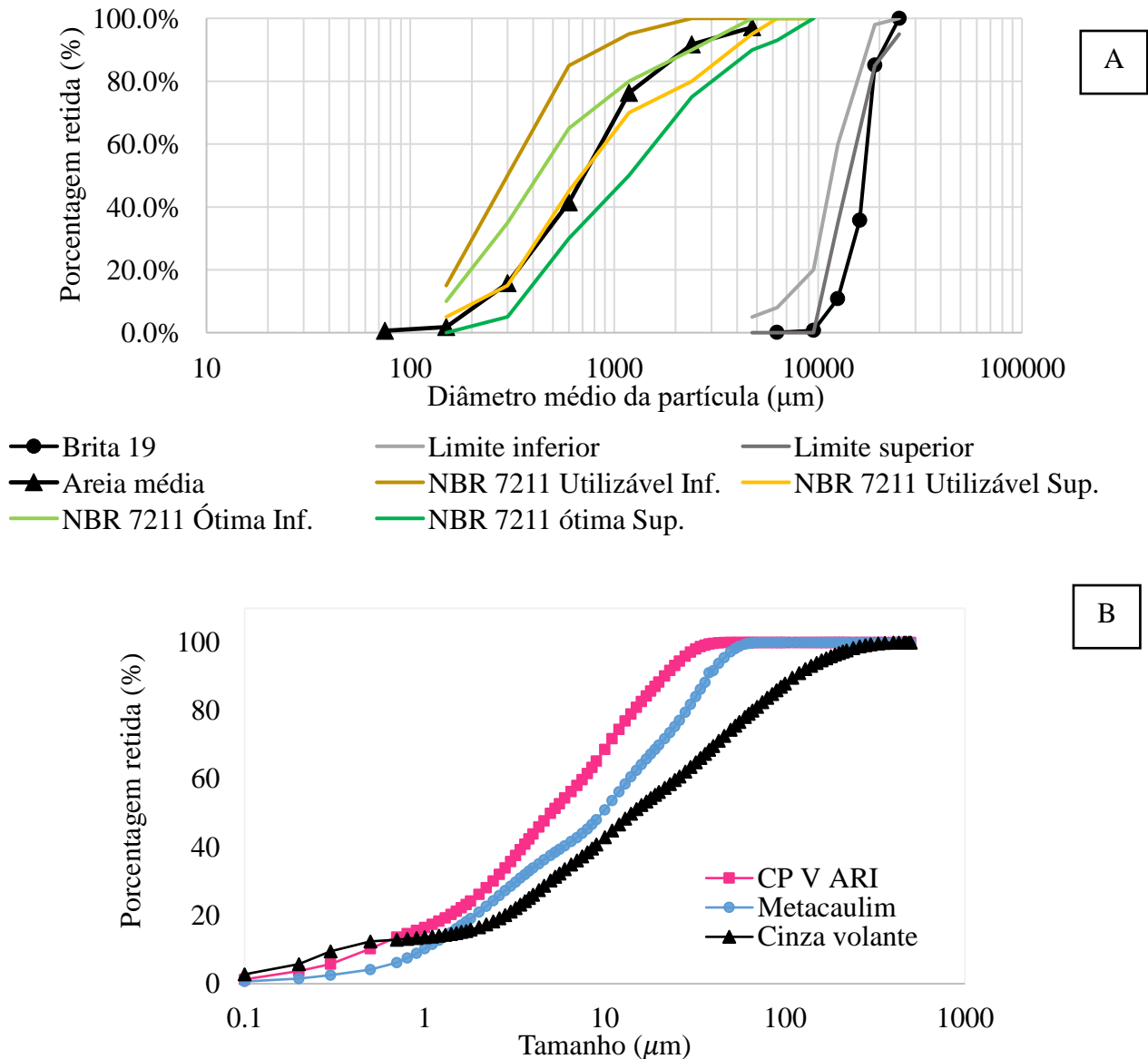


Figura 3. Distribuição granulométrica dos agregados (A) e cimento e adições (B)

Na Figura 4 (A), observam-se os picos cristalinos de Quartzo, Mulita, Hematita e Calcita, com um halo amorfo entre 15° e 30° indicando haver certa quantidade de materiais reativos. Na Figura 4(B), foram identificados picos de Quartzo, Bornita e Diamonite, com um halo amorfo discreto entre 20° e 30°. Embora o MK tenha apresentado halo amorfo menor do que a CV, conforme ensaio da norma brasileira NBR 5751 (ABNT, 2015), a atividade pozolânica do MK foi significativamente superior à da CV. Segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) o material é considerado pozolânico quando o somatório dos óxidos de silício, alumínio e ferro é maior ou igual a 70%. De acordo com os dados apresentados na Tabela 3 o resultado desse somatório foi de 89,41 % para cinza volante e 95,31%

para o metacaulim. Esse aspecto, aliado à menor finura do MK, é uma explicação para o resultado da pozolanicidade do MK ter sido superior a CV.

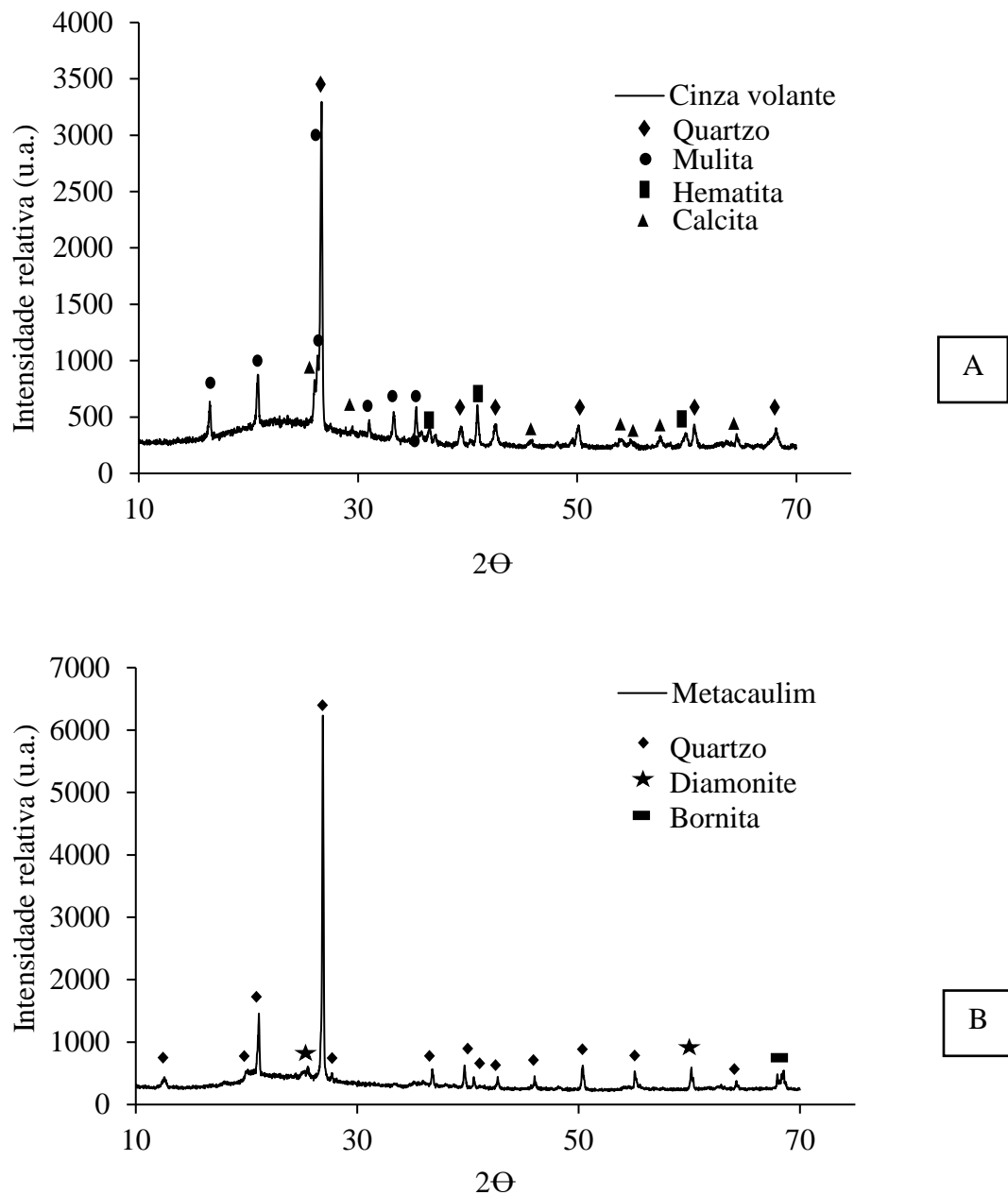


Figura 4. Difratoograma de raios-X das adições pozolânicas (A) cinza volante, (B) metacaulim

Tabela 3. Composição química dos finos

Amostras	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	SrO (%)	ZnO (%)	ZrO <sub>2</sub> (%)	total
CP V ARI	75,44	12,56	5,10	4,23	2,11	0,15	0,15	0,06	0,03	100
Metacaulim	0,82	49,74	6,79	38,78	1,27	0,05	0,05	0,26	0,26	100
Cinza volante	3,08	52,57	9,10	27,74	5,54	0,05	0,05	0,09	0,22	100

Para cada dosagem avaliada foram moldados 16 corpos de prova – CP cilíndricos com dimensão



de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Cinco dessas amostras foram usadas para realização dos ensaios de difusão de íons cloreto, seguindo os procedimentos da norma NT BUILD 443 (1995), 6 CP foram usados para o ensaio de resistência à compressão (ABNT - NBR 7215, 2019), 2 CP foram usados para o ensaio de absorção de água por imersão (ABNT - NBR 9778, 2005) e 3 CP foram usados para o ensaio de resistividade elétrica superficial, pelo método de Wenner. Os CP foram desmoldados após 24 h de moldagem, identificados e, curados por 28 dias, em ambiente com temperatura de  $25 \pm 2$  °C e umidade relativa superior a 95%.

Após a cura, os CP foram preparados para serem expostos ao meio agressivo, com a presença de íons cloreto, seguindo os procedimentos especificados na NT Build 443. Na Figura 5 foi esquematizado o procedimento de preparo dos CP e local de exposição aos cloretos.

Os CP foram partidos ao meio para atenderem a dimensão exigida em norma, 100 mm de diâmetro por 100 mm de altura (b), em seguida foram saturados em solução de hidróxido de sódio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] com cerca de 3 g/l, até atingir uma massa estável; quando atingida a estabilização de massa, as amostras foram pintadas com resina epóxi (c), deixando livre apenas a superfície superior do corpo de prova, permitindo a difusão unidirecional dos íons cloreto. Após a etapa de preparação, as amostras foram imersas em uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 2,8 M ( $165 \text{ g/l} \pm 1$ ) (d) e temperatura de  $23 \pm 2$  °C por 90 dias.

Ao final desse período, amostras em pó foram extraídas dos CP para obtenção de perfis de cloretos. Essas amostras foram extraídas na profundidade de: 0-1 mm, 1-3 mm, 3-5 mm, 5-8 mm, 8-12 mm, 12-16 mm, 16-20 mm, 20-25 mm e 25-30 mm. Essas amostras foram obtidas por sucessivos cortes paralelos à face exposta à solução de NaCl. Para os cortes, foi utilizada uma serra diamantada, almofariz para finalização da pulverização das amostras e imantação para garantir a retirada de alguma partícula de aço, proveniente da serra de corte.

Com o material em pó, procedeu-se a análise da concentração de íons cloreto livres e totais por titulação potenciométrica, seguindo os procedimentos descritos pela RILEM (TC 175-TMC, 2002a, 2002b). Para realização das titulações foram adotadas as recomendações da norma ASTM C 114 – 03 (2007).

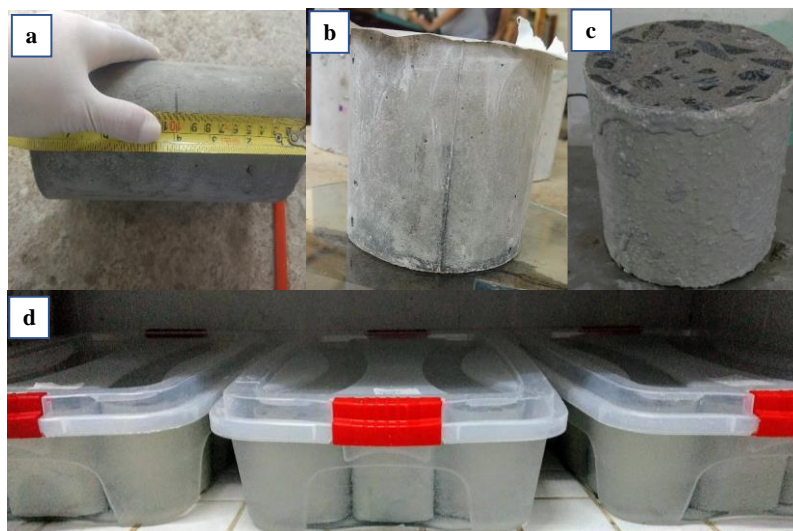


Figura 5. Procedimento de preparo dos CP segundo a NT BUILD 443: (a) marcação do CP para dimensão exigida (100 mm de diâmetro por 100 mm de altura); (b) amostra pronta para ser selada com tinta epóxi; (c) amostra pronta para imersão na solução de cloretos (2,8 M); (d) amostras submetidas a solução de cloretos.

Com os valores de concentração e suas respectivas profundidades, foram realizados ajustes da segunda lei de Fick, Equação (1), aos dados experimentais para determinar a concentração



superficial de cloretos –  $C_s$  e o coeficiente de difusão aparente -  $D_{ns}$ .

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{ns} \cdot t}} \quad (1)$$

Onde:  $C(x, t)$ : concentração de cloretos na profundidade  $x$  e no tempo  $t$  (% da massa de aglomerante);  $x$ : profundidade paralela ao fluxo de ingresso dos cloretos (cm);  $t$ : o período de exposição à solução (s),  $C_i$ : concentração inicial de cloretos no interior do concreto (% da massa de aglomerante);  $C_s$ : concentração de cloretos na superfície do concreto (% da massa de aglomerante);  $\operatorname{erf}$ : função de Erro de Gauss;  $D_{ns}$ : coeficiente de difusão no estado não estacionário no tempo  $t$  (cm<sup>2</sup>/s).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 28 e 90 dias; os ensaios de absorção de água por imersão aos 90 dias e os ensaios de resistividade elétrica superficial aos 28, 90 e 154 dias.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Características gerais

A Figura 6 apresenta os valores médios da resistência a compressão aos 28 e 90 dias. O efeito da redução da relação a/agl e da idade, na resistência a compressão é perceptível, com um crescimento na resistência com a redução da relação a/agl e entre 28 e 90 dias.

Avaliando o impacto das adições minerais, observa-se que as dosagens com MK e CV apresentaram, em geral, resistências inferiores aos concretos REF. Neste caso, pode ter ocorrido a influência da maior reatividade do cimento CPV, gerando maiores resistências iniciais, aliada a uma reatividade mais lenta das adições minerais, fazendo com que as dosagens com adições necessitassem idades mais avançadas que 90 dias para que a ação pozolânica das adições gerasse maiores resistências.

Outros pesquisadores como Cheng *et al.*, (2017) Liu *et al.*, (2014) e Liu *et al.*, (2016), obtiveram resultados semelhantes, com redução de 23% e 15% para concretos com substituição de 15% do cimento por cinza volante, em massa, para relação a/agl 0,47. Figueiredo *et al.* (2014) ao investigar a contribuição do metacaulim contra a ação deletéria dos cloretos obtiveram redução de 7% na resistência à compressão aos 90 dias com substituição de 10% de cimento por metacaulim e relação a/agl 0,60.

Na Figura 7 são apresentados os valores médios de 2 CP para o ensaio de absorção total por imersão de água e índice de vazios obtidos pelo ensaio descrito na norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Segundo essa norma, o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Para tal, é esperado que, quanto maior o índice de vazios, maior a capacidade de absorção da amostra.

Sabe-se que o uso de adições minerais na mistura altera a estrutura dos poros e a porosidade da mistura. Nesta pesquisa, amostras sem a presença de adição pozolânica apresentaram menores índices de vazios e maiores resistências à compressão. Nesse sentido, a idade de 90 dias pode ter sido insuficiente para o efeito pozolânico, em relação a porosidade, ter se manifestado em sua plenitude. Esse comportamento é corroborado pela maior granulometria das adições minerais estudadas e os halos amorfos menos expressivos apresentados nos difratogramas da Figura 4.

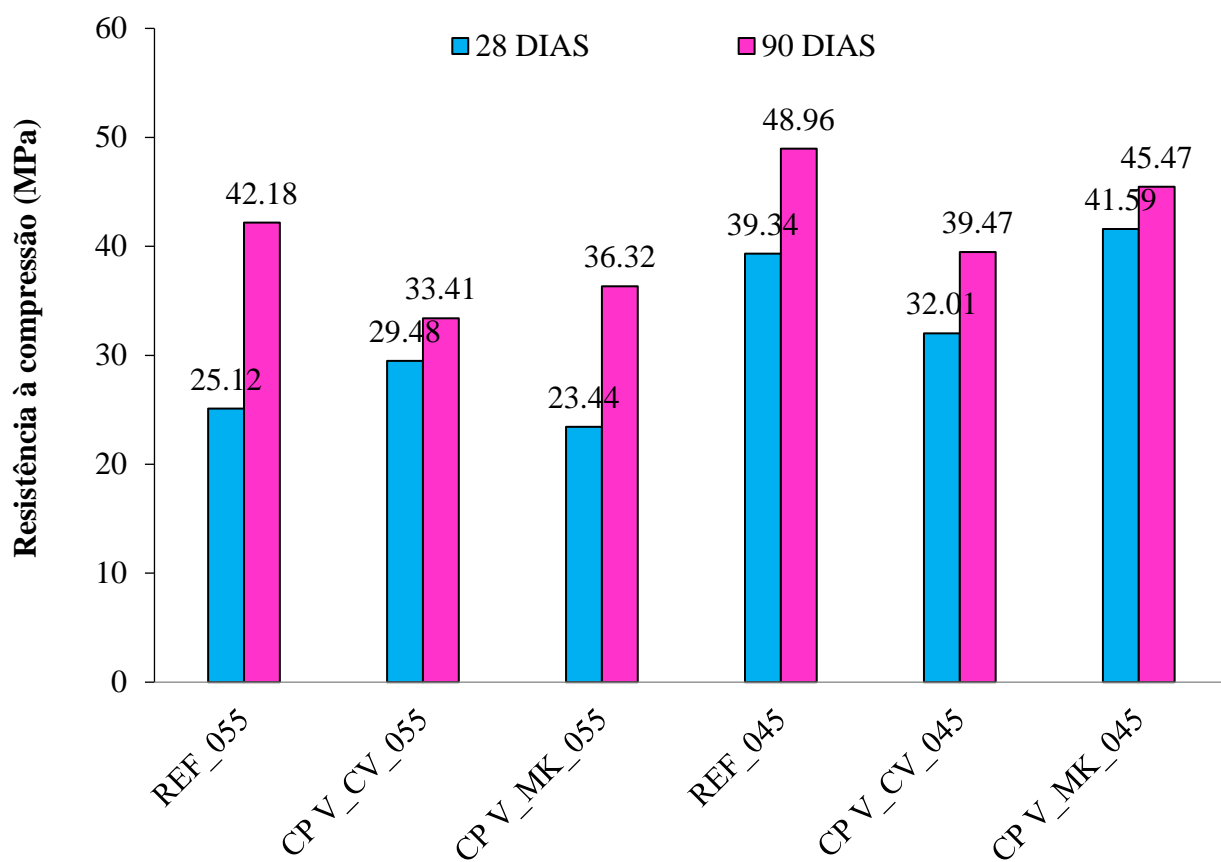


Figura 6. Resistência à compressão dos concretos trabalhados – 28 e 90 dias

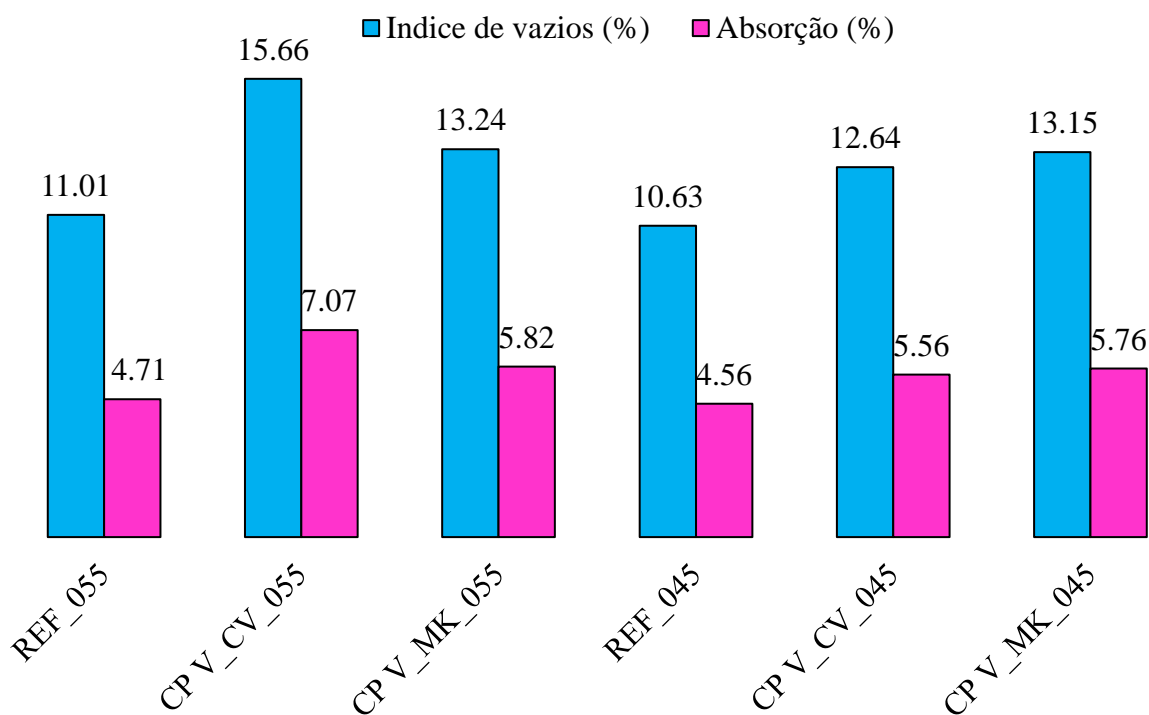


Figura 7. Absorção e índice de vazios (%) para os concretos estudados – 90 dias

### 3.2. Resistividade elétrica e transporte de massa

Em relação à resistividade elétrica, segundo Andrade e D'Andrea (2011), concretos menos porosos apresentam maior resistividade elétrica. De acordo com Santos (2006) a resistividade é extremamente sensível à microestrutura da matriz e, fatores relacionados a estrutura dos poros, concentração iônica e composição da água presente nos poros, além das condições ambientais, refletem diretamente na resistividade.

Os resultados do ensaio de resistividade para os concretos estudados ao longo do tempo são apresentados na Figura 8. Esses resultados são uma média de 3 CP, com 18 medições no total.

O emprego das adições pozolânicas nas misturas de concreto resultaram em maiores resistividades, com tendência de crescimento logarítmica para todos os concretos, com  $R^2$  superior a 0,66. Outros autores já haviam discutido quanto ao ganho da resistividade elétrica em concreto com adições pozolânicas (Abreu, 1998; Gans *et al.*, 2017; Medeiros-Junior *et al.*, 2014; Medeiros-Junior e Gans, 2017; Santor *et al.*, 2012). Dentre os principais pontos considerados estão: o refinamento dos poros, o aumento da tortuosidade e a redução de íons na solução dos poros. No caso específico das adições trabalhadas nesta pesquisa, os dois primeiros efeitos devem ter prevalecido.

Considerando o transporte de massa, a porosidade total e principalmente a estrutura porosa da matriz são fatores que influenciam a velocidade do transporte de agentes agressivos na matriz.

Na Figura 9, são apresentados os resultados obtidos para os perfis de cloretos livres e totais, para todas as misturas investigadas. Cada perfil apresentado representa a média de resultados obtidos para 3 CPs.

Nos concretos com relação  $a/agl$  0,45 foram obtidos teores de cloretos (livres e totais) menores do que para os concretos com relação  $a/agl$  0,55. Esse resultado já era esperado e está relacionado ao menor índice de vazios das dosagens com menor relação  $a/agl$ , indicando amostras de maior compactidade, o que se reflete diretamente em maior resistividade elétrica superficial. Segundo Andrade (2018), a resistividade está relacionada com a capacidade de transporte de íons, quanto maior a resistividade menor será a capacidade de transporte de agentes agressivos no interior do concreto.

Quando comparados os perfis de cloretos livres e totais, percebe-se, uma diferença entre as concentrações obtidas, o que se explica pela fixação de cloreto na matriz cimentícia. Segundo Luping e Nilsson (1993) os íons cloreto quando presentes na matriz cimentícia podem estar na forma de cloretos livres ou fixados na matriz (fisicamente ou quimicamente).

Em relação ao uso das adições pozolânicas em substituição a massa de cimento, percebe-se que, para os concretos de relação  $a/agl$  0,55, há uma redução nas concentrações de cloretos livres e totais, principalmente para o concreto CP V\_MK. Quanto à relação  $a/agl$  0,45, não houve uma redução para concentração de cloretos totais nas camadas mais superficiais, principalmente para a mistura CP V\_CV. Entretanto, os perfis com adições pozolânicas apresentam declínio mais rápido das concentrações, o que reflete a sua menor capacidade de transporte. Este comportamento se traduz em um menor coeficiente de difusão de cloretos e em uma menor quantidade de cloretos acumulados no concreto. A maior capacidade de fixação de cloretos das dosagens de concreto com adição pozolânica corrobora os resultados encontrados nos perfis, o que pode ser atribuído à maior quantidade de alumina Tabela 3 nas adições empregadas.

Para obtenção dos coeficientes de difusão e da concentração superficial, foram realizadas regressões empregando a Equação (1) e os dados experimentais. Os resultados dos ajustes realizados encontram-se na Tabela 4 e consideram os teores de cloretos totais.

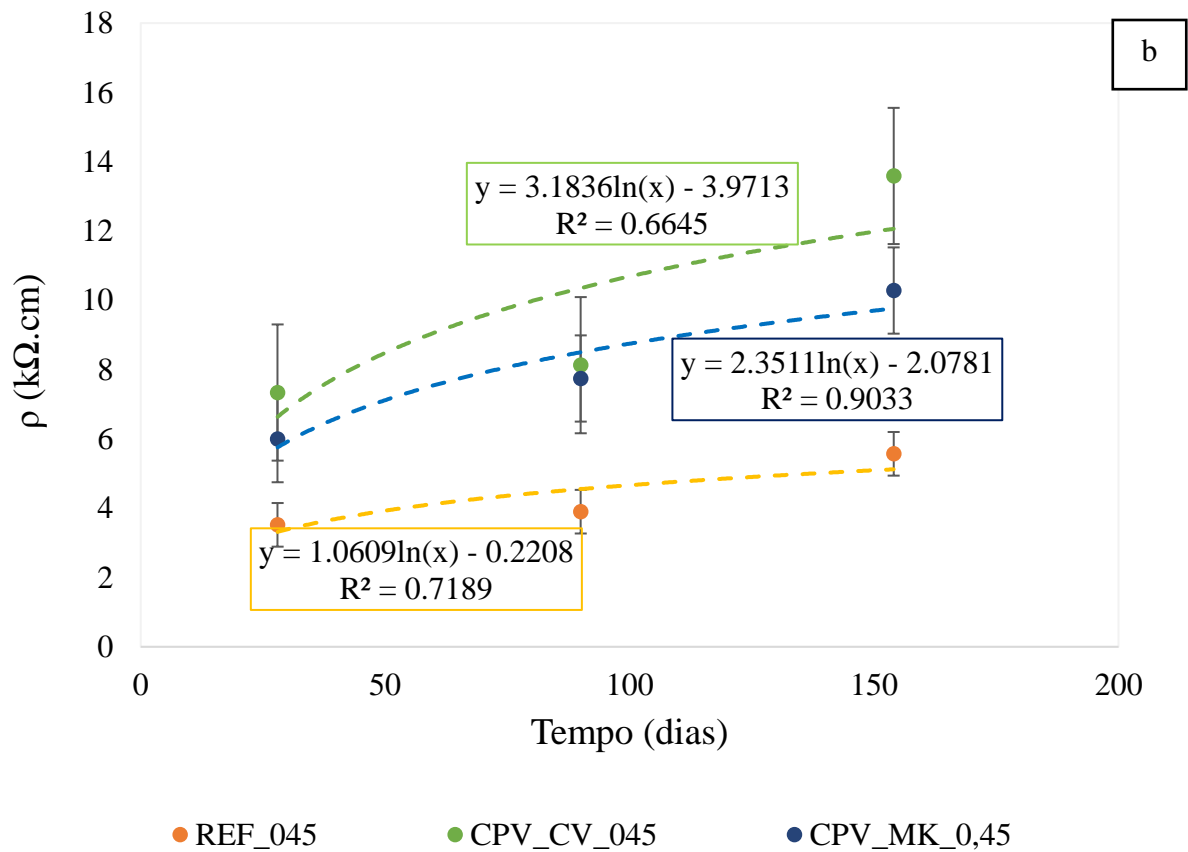
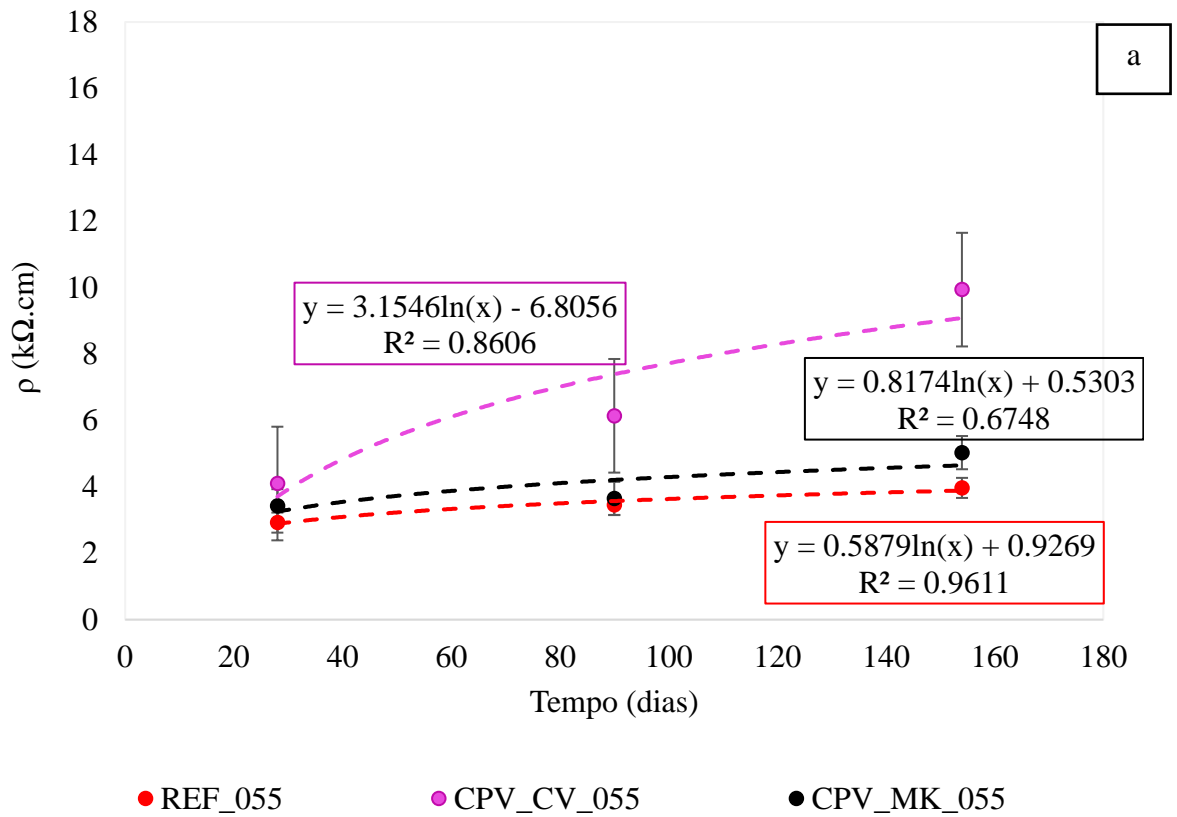


Figura 8. Resultado da resistividade elétrica dos concretos estudados ao longo do tempo: (a) misturas com relação a/a<sub>g1</sub> 0,55 e (b) misturas com relação a/a<sub>g1</sub> 0,45.

Tabela 4. Coeficiente de difusão e concentração superficial de íons cloretos para as dosagens estudadas ao final do ensaio de difusão

Mistura	Cs (% massa de aglomerante)	Dns (cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Cloretos totais acumulados (% massa de aglomerante. cm)
REF_055	3,284	1,47E-07	0,98	3,71
CP V_MK_055	2,941	1,00E-07	0,98	2,77
CP V_CV_055	2,830	1,80E-07	0,94	3,28
REF_045	2,602	1,77E-07	0,96	3,28
CP V_MK_045	2,653	8,51E-08	0,99	2,11
CP V_CV_045	2,607	7,17E-08	0,98	2,46

Avaliando a  $C_s$  considerando a relação  $a/agl$ , é nítido que concretos com maior relação  $a/agl$  apresentam maior  $C_s$ . Segundo Meira *et al.* (2020) a  $C_s$  tem uma tendência a aumentar em concretos mais porosos. Quando avaliadas as adições pozolânicas, o concreto com presença de metacaulim apresentou maior  $C_s$  para relações  $a/agl$  0,55 e, praticamente igual à relação  $a/agl$  0,45, quando comparado ao concreto com a presença de cinza volante. Esse comportamento se explica pela sua maior capacidade de fixação de cloretos, expressa pelo maior teor de alumina “Tabela 3”. Em relação ao coeficiente de difusão, observa-se que houve uma redução do  $D_{ns}$  para os concretos com adição pozolânica para relações  $a/agl$  0,45, quando comparados ao concreto referência, como visto na Tabela 4. Esse comportamento reflete o refinamento dos poros e o aumento da capacidade de fixação de cloretos na matriz e esta é ligeiramente superior para os concretos com metacaulim, resultando em menores  $D_{ns}$  para essas dosagens, inclusive para a dosagem com relação  $a/agl$  0,55. A capacidade de ligação de íons cloretos à matriz cimentícia normalmente é expressa através de uma isoterma. No entanto, também pode-se avaliar esse efeito a partir da fração de cloretos combinados nos perfis obtidos. Essa relação é apresentada na Tabela 5 e corresponde à relação entre o total de cloretos combinados e o total de cloretos totais acumulados em cada perfil. A partir desses resultados, observa-se que a capacidade de ligação de íons cloreto, para os concretos com metacaulim se sobressai. A cinza volante também aumenta a capacidade de fixação de cloretos, com especial destaque para a mistura com  $a/agl$  de 0,45.

No que se refere à relação entre a resistividade elétrica superficial e o transporte de massa, a Figura 10 representa esse comportamento considerando as distintas dosagens de concreto. Observa-se que essa relação pode ser expressa pela Equação (2). Segundo Andrade, *et al.* (2014) relações entre a resistividade e difusividade de cloretos podem ser obtidas de forma rápida através de medidas de resistividade e da Equação (2), onde  $D_{ns}$  representa o coeficiente de difusão aparente,  $K$  é uma constante que depende da concentração da solução empregada,  $\rho$  é a resistividade aparente do concreto e  $a$  é um expoente que depende da capacidade de fixação de cloretos na matriz.

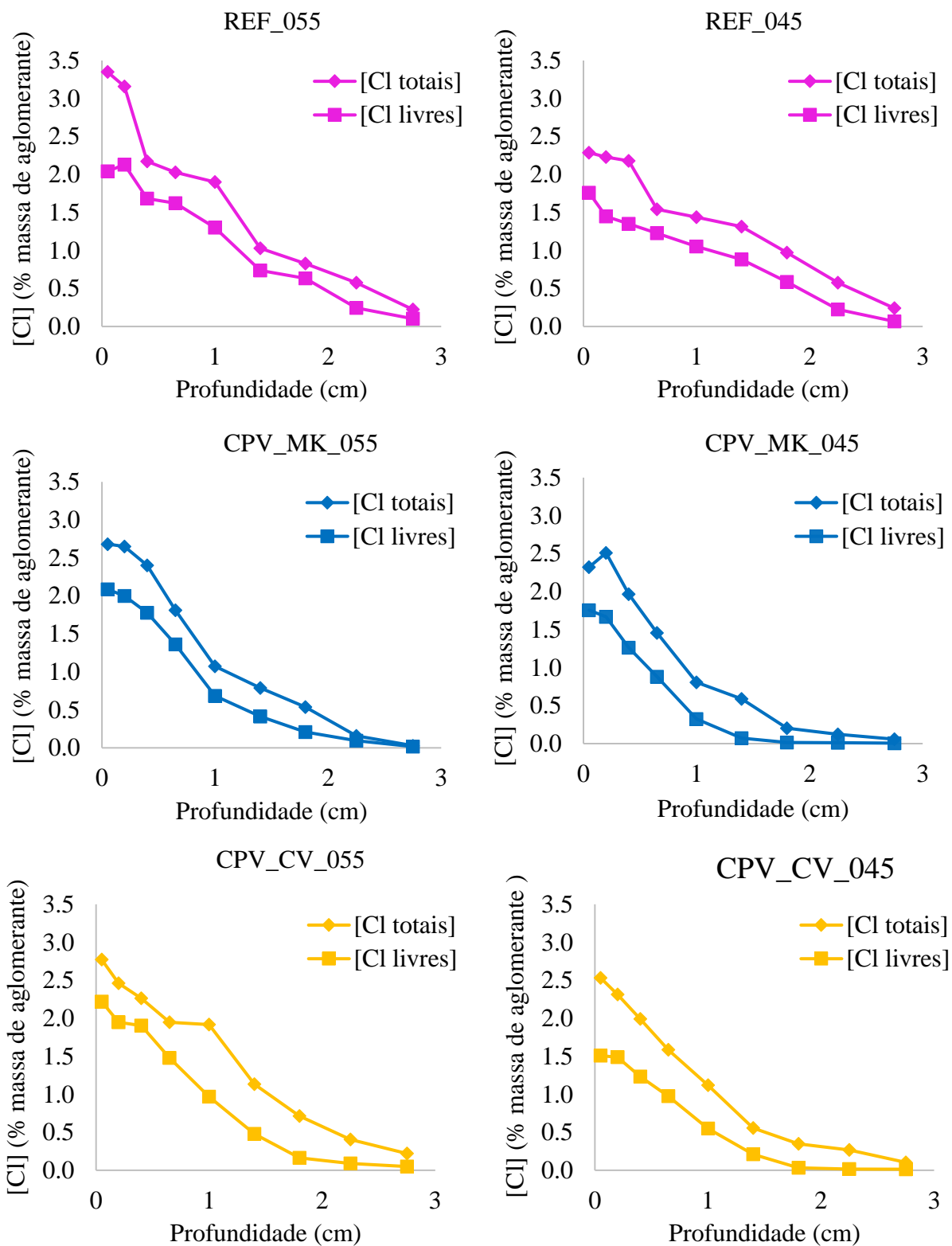


Figura 9. Perfis de cloretos livres e totais para as misturas de concreto estudadas



Tabela 5. Fração de cloretos combinados para cada mistura nos perfis obtidos

Mistura	Cloretos totais acumulados (% massa de aglomerante. cm)	Cloretos combinados acumulados (% massa de aglomerante. cm)	Fração de cloretos combinados (%)
REF_055	3,71	1,13	30,44
CP V_MK_055	2,77	0,91	32,65
CP V_CV_055	3,28	0,98	29,78
REF_045	3,28	0,97	29,57
CP V_MK_045	2,11	0,82	38,86
CP V_CV_045	2,46	1,23	50,02

$$D_{ns} = K/\rho^a \quad (2)$$

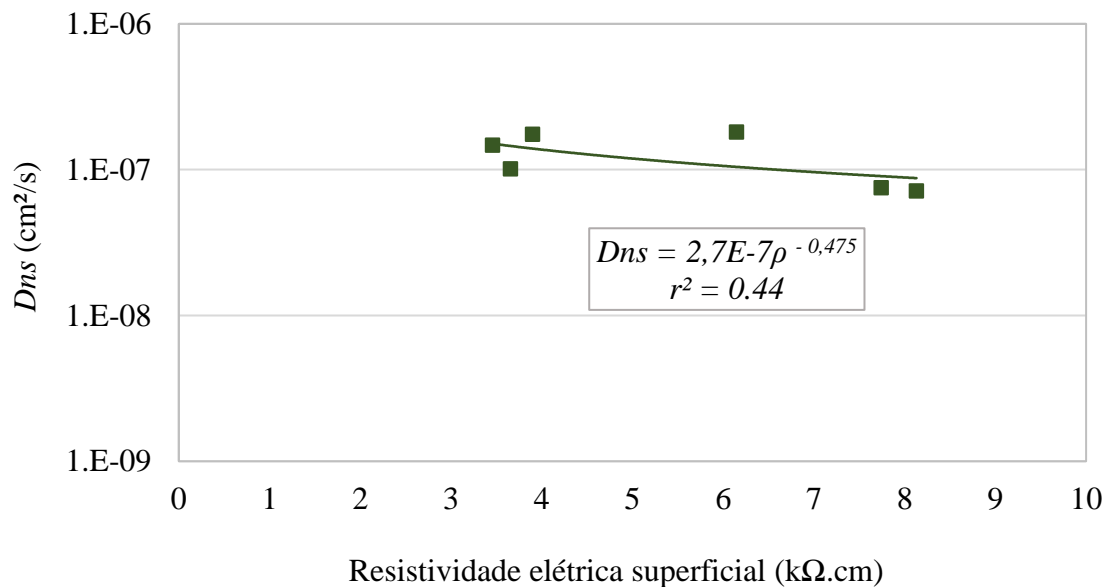


Figura 10. Relação entre  $D_{ns}$  e resistividade elétrica superficial

Observa-se, na Figura 10, que o coeficiente de determinação é relativamente baixo, o que pode ser atribuído às diferenças entre dosagens e suas capacidades de fixação de cloretos, bem como ao fato de que a diferença de resistividade entre os concretos é bem menor que aquela apresentada na Figura 3. Uma outra maneira de abordar a relação entre o transporte de cloretos e a resistividade é através da relação entre o total de cloretos acumulados no concreto e a resistividade. Isso pode ser visto na Figura 11, que mostra uma relação linear entre essas duas variáveis.

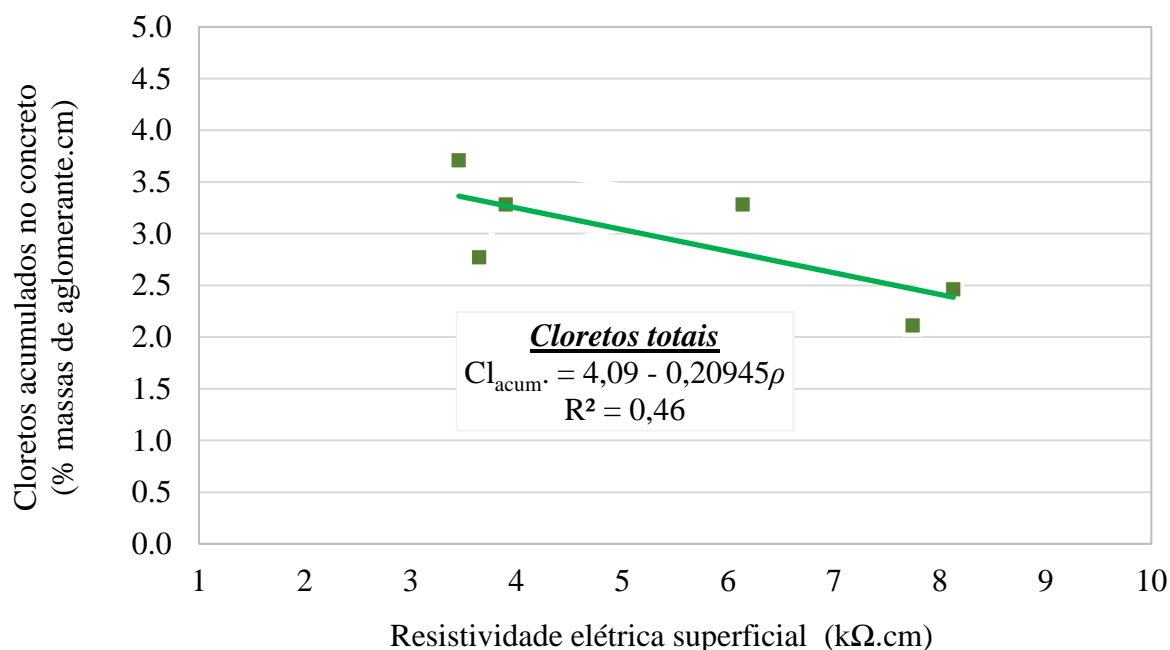


Figura 11. Relação entre cloretos acumulados no concreto e resistividade elétrica superficial.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante do conteúdo exposto, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A substituição de 10% e 25% do cimento, em massa, por metacaulim e cinza volante, respectivamente, mostrou-se eficiente em retardar o ingresso de íons cloreto nos concretos trabalhados, resultando em menor coeficiente de difusão e menor acúmulo de cloretos nessas matrizes. Em concretos com menor relação a/agl essas reduções são mais expressivas;
- O aumento da capacidade de fixação de íons cloreto nas matrizes com adições tem um papel substancial na redução do transporte de massa;
- O efeito da redução da relação a/agl aliado as adições minerais proporcionaram concretos com maior resistividade elétrica superficial, indicando maior resistência ao transporte de íons;
- A relação geral entre  $D_{ns}$  e resistividade elétrica superficial para os concretos estudados pode ser expressa por  $D_{ns} = 2,7E-7 * \rho^{-0,475}$  para  $D_{ns}$  expresso em  $cm^2/s$  e  $\rho$  em  $k\Omega.cm$ . A relação entre os cloretos acumulados no concreto e a resistividade elétrica superficial pode ser expressa por  $Cl_{acum} = 4,09 - 0,20945\rho$ , para  $Cl_{acum}$  expresso em % massa aglomerante .cm e  $\rho$  em  $k\Omega.cm$ .

#### 5. REFERÊNCIAS

- Abreu, A. G. (1998), "Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.p. 142.
- Al-Sodani, K. A., Al-Zahrani, M. M., Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O. S. B., Al-Dulaijan, S. U. (2021), *Chloride diffusion models for Type I and fly ash cement concrete exposed to field and laboratory conditions.* Marine Structures. 76: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102900>.
- Andrade, C. e D'Andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro del control del hormigón y de su durabilidad.* Revista ALCONPAT. 1(2):90–98. <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>.

Andrade, C., N. Rebolledo, Castillo, A., Tavares, F., Pérez, R., Baz, M. (2014), *Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y de la resistencia a la difusión de cloruros*. Revista ALCONPAT. 4:100–115. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.1>

Andrade, C. (2018), *Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity*. Revista ALCONPAT. 8(3):264–279. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>.

Andrade, J. J. De O. (1997), "*Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco*", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 151.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 7215 - Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

ASTM International. (2007). *ASTM C 114-07: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*. Disponível em: [https://www.academia.edu/43310619/Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement 1](https://www.academia.edu/43310619/Standard_Test_Methods_for_Chemical_Analysis_of_Hydraulic_Cement_1). Acessado em: 09-02-22.

Cabral, A. E. B. (2000), "*Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos*", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 187.

Cady, P. D. (1985), *Bridge Deck Rehabilitation Decision Making*. Transportation Research Record. 1035:13–20. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1985/1035/1035-002.pdf>. Acessado em: 13-03-22.

Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., Ding, S. (2017). (2017), *Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete*. Applied Clay Science, 2017. v. 141, p. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.026>.

Costa, A. e Appleton, J. (2007), *Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estrutura. 46:3–13. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/RN12.pdf>. Acessado em: 15-03-2022.

Crank, J. (1975), "*The mathematics of diffusion*." Oxford university press. p. 421.

Dal Molin, D. C. C. (1988), "*Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamentos de caos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul*", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 238.

Ferreira, P. R. R. (2015), "*Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados*", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, p. 229.

Figueiredo, C. P., Santos, F. B., Cascudo, O., Carasek, H., Cachim, P., Velosa, A. (2014), *O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 7(4):685–708. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008>.

- Gans, P. S., Lima, M. G., Ditzel, L. F. S., & Junior, R. A. M. (2017), *Resistividade Elétrica Superficial: Efeito da Escória de Alto Forno no Concreto*. Revista Técnico-Científica. 1–11. <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2SPPC.2017.002>.
- Hansen, E. Ø., Iskau, M. R., e Hasholt, M. T. (2016), *Chloride Ingress in Concrete with Different Age at Time of First Chloride Exposure*. Nordic Concrete Research, 55(2), 9-26. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/84002601.pdf>, Acessado em: 10-05-22.
- Helene, P. R. L. (1993), "*Contribuição ao estudo da corrosão em armadura de concreto armado*", Tese de doutorado em engenharia civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 248.
- Liu, J., Tang, K., Qiu, Q., Pan, D., Lei, Z., e Xing, F. (2014), *Experimental investigation on pore structure characterization of concrete exposed to water and chlorides*. Materials, 6(9):6646–6659. <https://doi.org/10.3390/ma7096646>
- Liu, J., Qiu, Q., Chen, X., Wang, X., Xing, F., Han, N., e He, Y. (2016), *Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress*. Corrosion Science, 112:364–372. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.004>.
- Luping, T. e Nilsson, L. O. (1993), *Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars*. Cement and concrete research, 23(2), 247-253. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90089-R](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90089-R).
- Maes, M., Gruyaert, E. e Belie, N. (2013), *Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion*. Materials and Structures. 89–103. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9885-3>.
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., e Real, L. V. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT. 4(2):116–132. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>.
- Medeiros-Junior, R. A. e Gans, P. S. (2017), *Efeito da adição de pozolana na resistividade elétrica superficial do concreto*. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. 2(3):14–23. <http://orcid.org/0000-0003-4879-4869>.
- Meira, G. R. (2004), "*Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado*", Tese de doutorado em engenharia civil, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, p. 368.
- Meira, G. R. (2017), "*Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado: fundamentos, diagnóstico e prevenção*". João Pessoa, IFPB, p. 130.
- Meira, G. R e Ferreira, P. R. R. (2019), *Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado*. Ambiente Construído. 19 (4): 223–248. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400353>.
- Meira, G. R., Ferreira, P. R., Freitas, M. S., e Andrade, C. (2020), "*Behaviour of Surface Chloride Concentration in Concretes Subjected to Field Exposure in Marine Atmosphere Zone*". In XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. eBook of Proceedings. Barcelona: CIMNE. Barcelona. DOI: <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.203>.
- Mendes, M. V. A. S. (2009), "*Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais*", Dissertação de mestrado em Geotecnia e Construção Civil, a Universidade Federal de Goiás, Goiânia, p. 175.
- Moffatt, E. G., e Thomas, M. D. A. (2018), *Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment*. Cement and Concrete Research, 113, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.004>.
- Neto, D. M. (2018), "*Desempenho de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante em Substituição ao Cimento Portland*", Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, p. 130. Disponível em:

- [https://www.udesc.br/arquivos/cct/id\\_cpmenu/706/2018\\_12\\_06\\_D\\_cio\\_Marcon\\_Neto\\_15625993\\_911732\\_706.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2018_12_06_D_cio_Marcon_Neto_15625993_911732_706.pdf). Acessado em 15/02/22.
- NT BUILD 443. (1995). *NT BUILD 443 - Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*. Nordtest method.
- Rasheeduzzafar, S. S., Al-Saadoun, S. S. e Al-Gahtani, F. H. D. (1990), *Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete*. Cement and Concrete Research. 20(5):723–38. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90006-J).
- RILEM Recommendation. (2002 a). *TC 178-TMC: Analysis of water soluble chloride content in concrete*. Materials and Structures, pp. 586–588.
- RILEM Recommendation. (2002 b). *TC 178-TMC: Analysis of total chloride content in concrete*. Materials and Structures. pp. 583–585.
- Santor, M. S., Gastaldini, A. L. G., Crauss, C., dos Santos, G. T., & Rossini, F. C. (2012), *Influência de materiais pozolânicos na resistividade elétrica do concreto*. Revista ALCONPAT, 2(1):47–57. <https://doi.org/10.21041/ra.v2i1.26>.
- Santos, L. (2006), "Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto", Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Nacional de Brasília, Brasília, p. 161.
- Stanish, K. D., Hooton, R. D., e Thomas, M. D. A. (1997), "Testing the Chloride penetration resistance of concrete: a literature review". Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1–34. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/35971>
- Thomas, M. D. A., Hooton, R. D., Scott, A., & Zibara, H. (2012), *The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste*. Cement and Concrete Research. 42 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.001>
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., & Moradian, M. (2013), *In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment*. Construction and Building Materials. 46: 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.026>.
- Zibara, H., Hooton, R. D., Thomas, M. D. A., & Stanish, K. (2008), *Influence of the C / S and C / A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures*. Cement and Concrete Research. 38: 422–426. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.024>.