

Efeito do tipo de cimento e de materiais cimentícios suplementares na resistividade elétrica superficial do concreto

Effect of the type of cement and supplementary cementitious materials on the surface electrical resistivity of concrete

Marcelo Henrique Farias de Medeiros 

Rayane Campos Lopes 

Lígia Vitória Real 

Gustavo Bortolan Rivarola 

Andrielli Moraes de Oliveira 

Oswaldo Cascudo 

Resumo

Ensaios não destrutivos são importantes ferramentas de inspeção e monitoramento em estruturas de concreto armado. Entre eles, a resistividade elétrica superficial é um indicador de durabilidade versátil e de fácil obtenção. Este artigo tem o objetivo de avaliar a influência do tipo de cimento (CP II-Z, CP IV e CP V-ARI) e de materiais cimentícios suplementares - MCS (sílica ativa, sílica de casca de arroz, metacaulim e cinza volante) na resistividade elétrica superficial do concreto, pelo método de Wenner, durante um ano. Adicionalmente, foram realizadas correlações entre a resistividade e outras propriedades, como resistência à compressão axial, absorção de água e teste rápido de permeabilidade de cloretos - RCPT. Os resultados indicaram que a resistividade foi influenciada significativamente pelo tipo de cimento e de MCS e pela idade das amostras. A magnitude da resistividade das misturas com MCS superou a da mistura de referência. Além disso, a resistividade apresentou correlações com R^2 acima de 0,70 com a resistência à compressão axial de concretos com MCS e com a carga elétrica passante do ensaio RCPT.

Palavras-chave: Durabilidade. Materiais cimentícios suplementares. Cimento. Adição mineral. Pozolanas. Método dos quatro eletrodos. Resistividade.

Abstract

Non-destructive testing is an important inspection and monitoring tool for reinforced concrete structures. Among them, surface electrical resistivity is a versatile and easy-to-obtain durability indicator. This article aims to evaluate the influence of the type of cement (CP II-Z, CP IV and CP V-ARI) and supplementary cementitious materials - SCM (silica fume, rice husk silica, metakaolin and fly ash) on surface electrical resistivity of concrete, using Wenner method, over a year. Additionally, correlations were carried out between resistivity and other properties, such as compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability test - RCPT. The results indicated that the resistivity was significantly influenced by the type of cement and MCS and by the age of the samples. The magnitude of the resistivity of the mixtures with MCS exceeded that of the reference mixture. Furthermore, the resistivity showed correlations with R^2 above 0.70 with the compressive strength of concretes with SCM and with the passing electrical load of the RCPT test.

Keywords: Durability. Supplementary cementitious materials. Mineral Additions. Pozzolans. Four probe method. Resistivity.

¹Marcelo Henrique Farias de Medeiros

¹Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Rayane Campos Lopes

²Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO - Brasil

³Lígia Vitória Real

³Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo - SP - Brasil

⁴Gustavo Bortolan Rivarola

⁴Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

⁵Andrielli Moraes de Oliveira

⁵Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO - Brasil

⁶Oswaldo Cascudo

⁶Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO - Brasil

Recebido em 26/06/24
Aceito em 14/09/24

Introdução

Ensaio não destrutivo (ENDs) permitem, de forma geral, caracterizar estruturas de concreto, sendo adjuvantes no registro de eventuais disfunções estruturais e na identificação de potenciais problemas associados ao envelhecimento ou à instalação de manifestações patológicas, com efeitos muito positivos voltados à manutenção do estado de conservação.

Além de sua característica eminentemente não destrutiva, os ENDs apresentam notória facilidade de aplicação em campo, aliada a uma satisfatória confiabilidade nos resultados, o que permite um número bastante acentuado de repetições de leituras com o tempo. Todos estes aspectos favorecem as ações de monitoramento e avaliação do desempenho estrutural, tão relevantes no contexto dos processos de manutenção, dentro da perspectiva do cumprimento de vida útil.

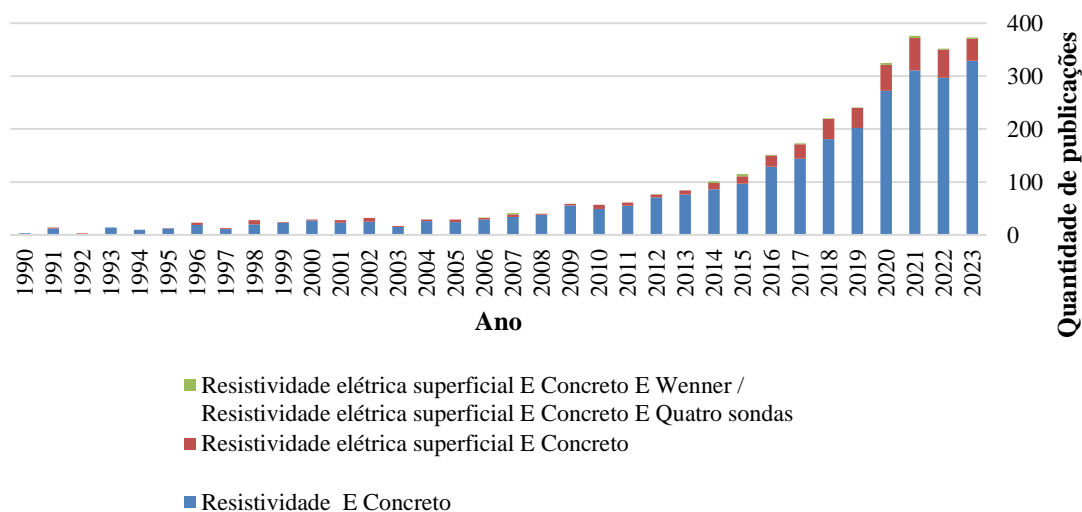
Uma das técnicas não destrutivas ou não perturbativas mais importantes associadas a aspectos de durabilidade do concreto é a leitura da resistividade elétrica superficial (RES). Essa propriedade física do concreto expressa a habilidade do meio poroso em se opor ao fluxo de íons que se movimentam na solução da rede de poros, regulando e resistindo a esse fluxo e sendo, por exemplo, um dos fatores importantes que controlam a velocidade de corrosão (Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Cascudo, 1997, 2005). Dentre os métodos existentes para se determinar a RES de materiais cimentícios, o método de Wenner é o mais utilizado, sendo uma técnica comum para caracterização do concreto, muito aplicada in loco (Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Chen; Chang; Yeih, 2014; Polder, 2001; Wosniack *et al.*, 2021).

No Brasil, o emprego da técnica de RES com os fins de durabilidade, em especial relacionado à detecção e monitoramento da corrosão da armadura (in loco), remonta do início dos anos 1990 (Cascudo, 1993; Repette; Lima; Cascudo, 1990). Desde então, observa-se um crescente interesse por esse tema, notadamente nos últimos 15 anos. Para ilustrar esta questão, a Figura 1 mostra a quantidade de publicações retornadas em buscas na base de dados Web of Science, feitas no título, resumo e palavras-chave. Na legenda, estão as traduções das strings utilizadas (as buscas foram feitas em inglês), partindo-se de uma pesquisa mais ampla para uma mais específica. A busca sobre “resistividade e concreto” retornou 3160 publicações, considerando documentos publicados entre 1990 e 2023. Mediante o acréscimo de outros termos na pesquisa, com o afinamento do tema, os resultados desse mesmo período diminuíram para 466 e 28. Observa-se um aumento considerável de publicações sobre esse assunto a partir de 2010, concentrando mais de 80% dos artigos a partir desse ano.

A técnica de Wenner ou dos quatro eletrodos consiste em aplicar uma corrente alternada na superfície de contato com o material em análise através dos dois eletrodos externos e medir a diferença de potencial nos dois eletrodos internos, calculando-se a resistividade elétrica superficial (RES) com base na Lei de Ohm. Internacionalmente, podem-se citar algumas normas referentes ao uso dessa técnica: a G 57 (ASTM, 2020), originalmente desenvolvida para uso em solo; a T358 (AASHTO, 2015), empregada como indicador da habilidade do concreto em resistir à penetração de cloretos; a FM 5-578 (FDOT, 2004), proposta pelo Departamento de Transporte da Flórida como um indicador da permeabilidade do concreto; e a UNE 83988-2 (AENOR, 2014), uma norma espanhola voltada à durabilidade do concreto.

Diferentes pesquisas já estudaram fatores que interferem na RES do concreto, tais como: tamanho e geometria das amostras, além do espaçamento entre eletrodos (Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Medeiros-Junior; Lima, 2015; Chen; Chang; Yeih, 2014); tipo de cimento empregado (Medeiros-Junior *et al.*, 2014; Medeiros-Junior; Lima, 2016); evolução da hidratação do cimento no concreto (Lencioni; Medeiros-Junior, 2021); relação água/ligante, tipo e teor de adição mineral (Medeiros-Junior; Munhoz; Medeiros, 2019; Wosniack *et al.*, 2021; Homayoonmehr; Rahai; Ramezani-pour, 2022); parâmetros mineralógicos e químicos de diferentes metacaulins (Cascudo *et al.*, 2021b); ataque de agentes agressivos como cloretos (Real *et al.*, 2015; Oliveira; Cascudo, 2018; Balestra *et al.*, 2019, 2020) e gás carbônico (Medeiros-Junior *et al.*, 2018; Mendes; Medeiros-Junior; Munhoz, 2019; Medeiros; Helene, 2021; Fonseca *et al.*, 2022); condições ambientais, como teor de umidade (Chen; Chang; Yeih, 2014; Sengul, 2014); e o tipo, tamanho e quantidade de agregados (Sengul, 2014; Mendes *et al.*, 2018).

Figura 1 - Resultados de buscas na base Web of Science considerando diferentes strings relacionadas à resistividade



Sabe-se que o teor de umidade do concreto é um dos fatores que influenciam significativamente as medidas de RES (Cascudo, 1997; Medeiros-Junior; Lima, 2016; Nguyen *et al.*, 2017), aliado às características microestruturais do concreto e ao grau de ionização do eletrólito (Cascudo, 1997), que pode ser aferido pelo parâmetro de força iônica (na solução do poro), como discutido por Cascudo *et al.* (2021a). Em especial sobre a umidade, um dos problemas de se fazer a medição da RES em estruturas de concreto não saturadas in loco é a resistência de contato entre o eletrodo e o concreto, podendo levar a importantes erros de medição. Uma alternativa para minimizar esses erros seria o uso de parafusos auto-atarraxantes de aço inoxidável como sonda embutida para permitir as medidas de RES sem contato com a superfície do concreto e sem necessidade de saturação do material, proposto por Cheytani e Chan (2021).

A RES possui um campo muito amplo de aplicações. Ela já foi utilizada e analisada em situações como: na elaboração de diagramas de dosagem (Mendes *et al.*, 2018) e na avaliação da segregação em concreto fresco (Pan *et al.*, 2022). A técnica tem uso, também, no monitoramento de estruturas existentes de diferentes zonas marinhas, associando os valores obtidos com a probabilidade de corrosão das armaduras (Balestra *et al.*, 2019), assim como na identificação de barras corroídas a partir da superfície do elemento em concreto armado, como uma técnica de medição de impedância baseada no método de Wenner (Yu; Akira; Masahiro, 2019). Por fim, a RES se aplica à avaliação da durabilidade de materiais cimentícios com a incorporação de diferentes materiais suplementares, como os resíduos de pneu de borracha (Silva *et al.*, 2022) e os resíduos da indústria de aço em argamassa condutiva (Ahmed; Kamal, 2022). Ademais, a flexibilidade da técnica permite o uso de resposta de superfície e de processos de aprendizado de máquina para prever características do concreto, a partir de medidas de RES (Sathiparan; Jeyanthan; Subramaniam, 2024).

Em pesquisa experimental, Mendes *et al.* (2018) obtiveram diferenças médias menor que 10% entre valores experimentais de resistividade elétrica superficial e valores calculados por modelos matemáticos, baseados nas leis de Archie e Powers, proposto por D'Andrea (2010). Além disso, a RES pode ser associada com outras propriedades do concreto, tanto mecânicas quanto de durabilidade. Castillo, Hedjazi e Kabir (2022) analisaram a relação da RES com o módulo de elasticidade dinâmico, obtido por ensaio não destrutivo com frequência de ressonância em concretos reforçados com fibras. Em uma pesquisa aplicada, Balestra *et al.* (2020) associaram a RES à concentração total de cloretos em estruturas marinhas nas condições de serviço. A RES também já foi correlacionada com os clássicos ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom (Leonel; Oliveira; Cascudo, 2024).

No que tange ao ensaio de penetração de cloretos da C1202 (ASTM, 2022), Wosniack *et al.* (2021) obtiveram correlação linear com R^2 superior a 0,93 entre a RES medida experimentalmente pelo método Wenner com a resistividade calculada por esse ensaio de migração, baseada nas leis de Ohm. Homayoonmehr, Rahai e Ramezaniapour (2022) correlacionaram RES com resistência à compressão de amostras cúbicas e o coeficiente de migração em estado não estacionário, obtido pela NT Build 492 (NORDTEST., 1999). Cascudo

et al. (2021b) também a correlacionaram com o coeficiente de migração em estado não estacionário, NT Build 492 (NORDTEST, 1999), e com a porosidade medida pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Portanto, a RES é uma importante propriedade do concreto, altamente associada à sua durabilidade. Muito já foi estudado, em diferentes tipos de concreto, porém, percebe-se que ainda há uma lacuna de conhecimento no que tange a estudos de longa duração (um ou mais anos), já que existem muitas pesquisas focadas em concretos de até 30 dias (Castillo; Hedjazi; Kabir, 2022; Cheytani; Chan, 2021; Homayoonmehr; Rahai; Ramezaniapour, 2022). Considerando que a microestrutura do concreto não é uma característica intrínseca desse material, mas varia com o tempo, umidade e temperatura, por conta da pasta hidratada de cimento e da zona de transição (Mehta; Monteiro, 2006), estudos de longa duração contribuem para um melhor entendimento das características desse importante material de construção, sendo um dos diferenciais deste trabalho. Além disso, o uso de diferentes tipos de cimento e materiais cimentícios suplementares enriquece a gama de concretos estudados.

Dessa forma, é objetivo deste artigo analisar a influência do tipo de cimento e de materiais cimentícios suplementares (MCS) na resistividade elétrica superficial do concreto ao longo de um ano de estudo. Também é objetivo correlacionar resultados de RES com resultados de outras propriedades, como a resistência à compressão axial aos 28 e 56 dias, absorção de água (imersão e capilaridade), carga elétrica passante e profundidade de penetração de cloretos pelo teste rápido de permeabilidade de cloretos (RCPT).

Materiais e métodos

Nesta pesquisa, sete diferentes concretos foram avaliados, sendo três deles com diferentes tipos de cimento Portland, e quatro deles produzidos com substituição parcial do cimento, em massa, por materiais cimentícios suplementares (MCS).

Materiais

Os constituintes das amostras de concretos estudadas foram três diferentes tipos de cimento Portland, quatro tipos de materiais cimentícios suplementares, agregado miúdo de origem natural (areia quartzosa), agregado graúdo de litologia granítica, água da rede pública de distribuição e aditivo químico superplastificante à base de policarboxilato.

Os cimentos empregados foram um cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), um cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z-32) e um cimento Portland pozolânico (CP IV-32), classificados conforme requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018a). O cimento CP V-ARI (alta resistência inicial) possui a maior porcentagem de clínquer e sulfato de cálcio (90% a 100%) com até 10% de filler calcário. O cimento CP II-Z contém uma faixa de 6% a 14% de material pozolânico e o CP IV apresenta uma menor quantidade de clínquer e sulfato de cálcio (45% a 85%), com possibilidade de 15% a 50% de material pozolânico e de até 10% de filler calcário. Como justificativa para a escolha destes cimentos, deve-se considerar que o CP V-ARI é o cimento Portland mais puro que existe comercialmente no Brasil (usado neste trabalho como série de referência), os cimentos CP II-Z e CP IV são cimentos com material pozolânico adicionado em diferentes proporções e foram incluídos no plano experimental justamente porque as demais adições testadas apresentam alguma capacidade de reação pozolânica.

Os MCS testados foram sílica ativa (SA), sílica de casca de arroz (SCA), metacaulim (M) e cinza volante (CV) todas dosadas em teor de 10% de substituição em massa em relação ao cimento CP V-ARI. Esses MCS foram escolhidos devido à alta reatividade típica da SA, SCA e M, assim como pelo clássico uso da CV na composição do CP II-Z e CP IV nas regiões onde existem termelétricas em atividade, sendo este o caso dos cimentos utilizados neste programa experimental. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as propriedades químicas e físicas dos cimentos e dos MCS utilizados. A Tabela 2 também mostra as atividades pozolânicas desses MCS, obtidas pelo ensaio de Chapelle modificado segundo a NBR 15895 (ABNT, 2010).

Os MCS podem ser considerados pozolânicos quando o consumo de cal é superior a 330 mg CaO/g de adição, conforme critério de Raverdy *et al.* (1980), o que, por estequiometria, equivale a um consumo superior a 436 mg Ca(OH)₂/g amostra. Assim, pelos resultados do ensaio de Chapelle modificado, expostos na Tabela 2, é possível classificar a sílica ativa, a sílica de casca de arroz e o metacaulim como pozolanas de alta reatividade, devido ao consumo de hidróxido de cálcio superior ao valor de parâmetro referido. Porém, a cinza volante estudada, considerando esse critério, não é uma pozolana, mas foi utilizada por ser um importante material cimentício complementar na construção civil e na indústria do cimento. A sílica de casca de arroz recebe essa denominação diferenciada por ser um produto gerado por combustão controlada a 750 °C em caldeira com leito fluidizado na Geradora de Energia Elétrica Alegrete (GEEA); portanto, é um MCS com maior

pozolanicidade que as cinzas de casca de arroz convencionais, que são subprodutos de uma queima sem controle de temperatura.

Quanto aos agregados, utilizou-se uma areia natural quartzosa como agregado miúdo, classificada como areia de zona ótima, e uma brita 1 ($d/D = 9,5/25$) de rocha granítica como agregado graúdo. A Tabela 3 apresenta as principais características desses agregados e a Figura 2 mostra gráficos com suas distribuições granulométricas.

Tabela 1 - Propriedades químicas dos cimentos e dos MCS utilizados

Material	Composição química (%)							Resíduo insolúvel (%)	Equivalente alcalino (%)	Perda ao fogo (%)
	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃			
CP V-ARI	60,64	4,33	2,63	18,66	4,83	2,85	-	0,66	0,61	2,89
CP II-Z-32	53,23	6,8	3,09	22,72	3,9	2,8	-	12,75	0,79	5,06
CP IV-32	45,34	9,79	3,73	29,14	3,17	2,43	-	25,73	1,03	3,27
Cinza volante - CV	1,6	26,3	6,2	57,8	0,8	0,3	6,2	---	---	---
Metacaulim - M	0,14	46,05	3,9	45,86	---	1,69	3,9	---	---	---
Sílica ativa - SA	0,51	1,91	0,13	92,49	---	2,08	0,13	---	---	---
Sílica de casca de arroz - SCA	1,1	2,42	0,11	88,94	---	2,08	0,11	---	---	---

Nota: Legenda: indica que não há resultados desse ensaio para o material especificado.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos cimentos e dos MCS utilizados

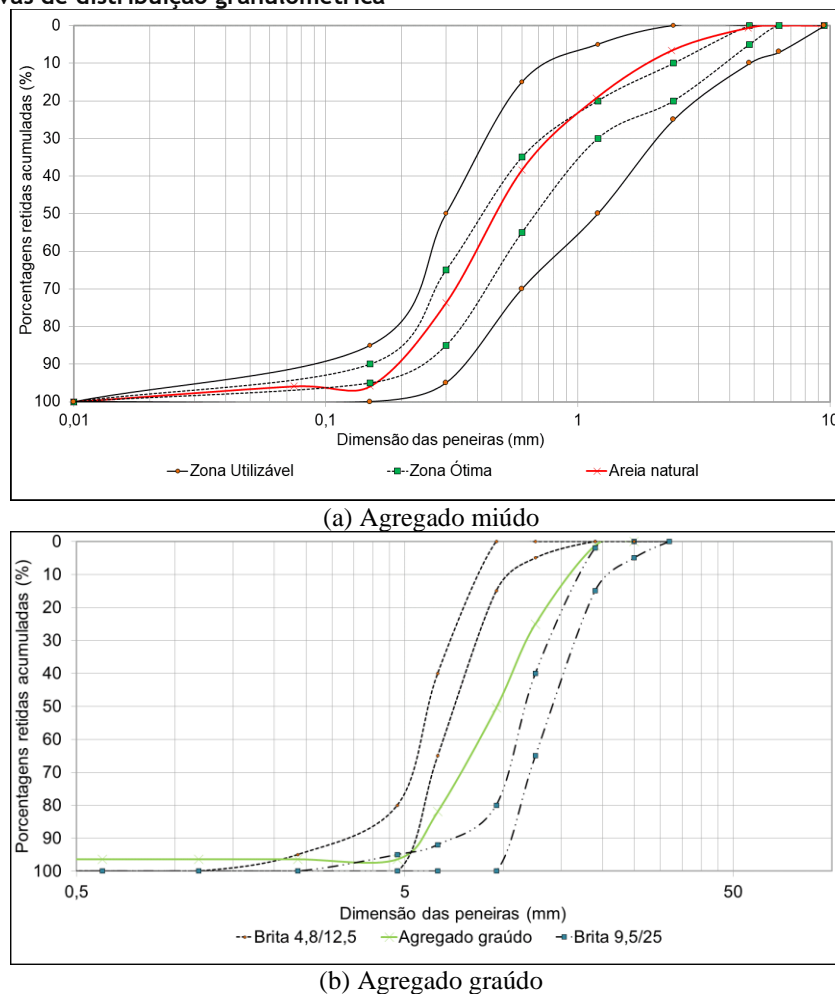
Material	Massa específica (g/cm ³)	Blaine - Área específica (m ² /g)	Resistência à compressão axial (MPa)		Chapelle modificado NBR 15895 (ABNT, 2010) (mg Ca(OH) ₂ /g amostra)
			7 dias	28 dias	
CP V-ARI	3,12	0,406	43,3	51,6	---
CP II-Z-32	2,96	0,372	32,7	41,4	---
CP IV-32	2,83	0,433	35,8	45,1	---
Cinza volante - CV	2,20	0,510	---	---	408
Metacaulim - M	2,50	0,478	---	---	1193
Sílica ativa - SA	2,18	0,718	---	---	1542
Sílica de casca de arroz - SCA	2,12	0,696	---	---	1336

Nota: indica que não há resultados desse ensaio para o material especificado.

Tabela 3 - Propriedades dos agregados miúdo e graúdo

Propriedade	Unidade	Norma	Areia	Brita 1
Massa específica SSS	g/cm ³	NBR 16916 (ABNT, 2021a) / NBR 16917 (ABNT, 2021b)	2,63	2,62
Massa unitária	g/cm ³	NBR 16972 (ABNT, 2021c)	1,47	1,54
Dimensão máxima característica	mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)	2,8	19
Módulo de finura	-	NBR 17054 (ABNT, 2022)	2,34	6,97
Teor de material pulverulento	%	NBR 16973 (ABNT, 2021d)	0,70	1,1
Absorção de água	%	NBR 16917 (ABNT, 2021b)	0,91	0,40

Figura 2 - Curvas de distribuição granulométrica



Tipos de concretos estudados

Foram analisadas sete proporções de mistura de concreto, apresentados na Tabela 4. A relação água/ligante foi fixada em 0,45, que segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022) é o valor limite de especificação para concretos em condições de exposição a cloretos provenientes do contato com água do mar ou respingo de maré. Esse valor foi adotado para analisar concretos enquadrados nas condições de agressividade compatíveis com a exposição a cloretos, uma vez que este é o tipo de ambiente em que mais efetivamente emprega-se materiais pozolânico como os que foram usados no programa experimental. O proporcionamento de areia e brita 1 se manteve constante para todas as composições de mistura. Salienta-se que nos concretos com MCS, o cimento empregado foi sempre o mesmo (CP V-ARI) e o teor adotado de substituição parcial do cimento foi 10% para todos os casos, porque esta é a ordem de grandeza de aplicação da SA, da SCA e do metacaulim (Barata; Dal Molin, 2002; Barboza; Storch; Almeida Filho, 2020; Campos; Cascudo, 2024), assim como o teor dentro da faixa de composição do CP II-Z (6% a 14% de material pozolânico). Em termos de consistência (no estado fresco), as misturas foram ajustadas pelo teor de aditivo, buscando-se abatimentos de tronco de cone enquadrados na faixa de (150 ± 25) mm, ensaiados conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). A Tabela 4 também apresenta o valor da massa específica dos concretos no estado fresco, obtida conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008).

Após moldagem, efetuada em laboratório, as partes superiores dos corpos de prova em estado fresco foram selados com filme plástico até a desforma, 24 horas depois. A cura do concreto se deu em câmara úmida, com umidade relativa igual ou superior a 95% e temperatura da ordem de 22 ± 2 °C, tendo sido executada até a data dos respectivos ensaios.

Métodos de ensaio

As principais informações sobre os ensaios realizados no estado endurecido estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 4 - Composição das amostras de concreto estudadas e sua caracterização no estado fresco

Concreto	Traço em kg/m ³						Abatimento (mm)	Massa específica (kg/m ³)
	Cimento	MCS	Areia	Brita 1	Água	Aditivo*		
CP V-ARI	358	-	806	1074	161	1,8%	150	2386
CP II-Z	358	-	806	1074	161	1,3%	125	2355
CP IV	358	-	806	1074	161	1,2%	145	2299
SA	322	36	806	1074	161	1,8%	170	2340
SCA	322	36	806	1074	161	1,2%	130	2350
M	322	36	806	1074	161	1,9%	130	2360
CV	322	36	806	1074	161	1,7%	150	2357

Nota: *porcentagem do aditivo em relação à massa do cimento.

Tabela 5 - Ensaios realizados no concreto endurecido

Ensaio	Norma	Idades (dias)	Quantidade de amostras	Tipo de amostra
Resistência à compressão axial	NBR 5739: (ABNT, 2018b)	28 e 56	6	Cilíndrico 10 x 20 cm
Absorção de água por imersão	NBR 9778: (ABNT, 2005)	56	4	Cilíndrico 10 x 20 cm
Absorção de água por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2012)	56	4	Cilíndrico 10 x 20 cm
Teste rápido de permeabilidade de cloretos (RCPT) - modificado	ASTM C1202: (ASTM, 2022)	28	4	Cilíndrico 10 x 5 cm
Resistividade elétrica superficial – Método de Wenner	UNE 83988-2 (AENOR, 2014)	7, 28, 56, 91, 154, 273 e 364	5	Cúbico de lado 25 cm

O ensaio de resistência à compressão axial, mostrado na Figura 3a, foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Além disso, foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005) e por capilaridade, segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012), apresentados nas Figuras 3b e 3c, respectivamente.

O teste rápido de permeabilidade de cloretos (RCPT) foi realizado conforme a C1202 (ASTM, 2022) com algumas modificações. As fatias de 5 cm de espessura utilizadas nesse ensaio foram extraídas da parte interna de corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm (duas fatias por corpo de prova). Seu acondicionamento consistiu em selar as laterais das amostras com silicone, colocá-las em um dessecador com aplicação de vácuo por 3 horas e saturá-las em água destilada por 18 horas. As amostras foram fixadas entre duas células de acrílico com soluções diferentes, a saber: uma com solução aquosa a 3% de NaCl e outra com solução aquosa a 0,3 N de NaOH.

Em seguida, uma diferença de potencial elétrico (ddp) foi aplicada entre as duas células para acelerar a movimentação dos íons cloretos (Figura 3d). A C1202 (ASTM, 2022) prescreve que seja aplicada uma ddp de 60 V durante 6 horas, medindo-se a corrente passante a cada 30 minutos, enquanto Luping e Nilsson (1992) sugerem uma ddp igual a 30 V, a fim de evitar a elevação da temperatura durante o ensaio, que poderia modificar a velocidade de transporte dos cloretos. Assim, optou-se neste trabalho por utilizar a ddp igual a 30 V, durante 12 horas com acompanhamento da corrente passante. Com esses dados, foi possível calcular a carga elétrica total que atravessa o corpo de prova (carga passante), com base na Equação 1, adaptada da norma:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{690} + I_{720}) \quad \text{Eq. 1}$$

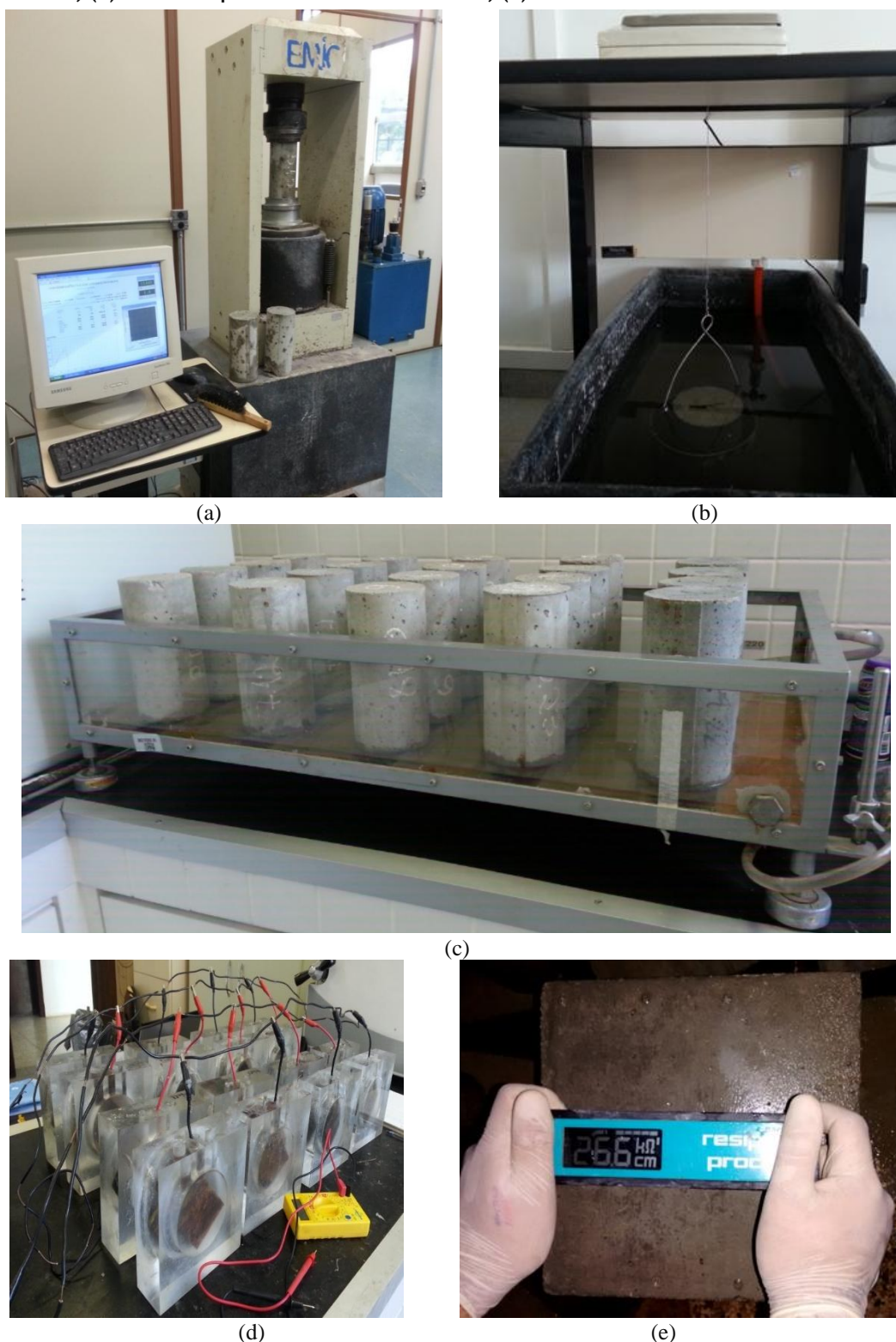
Em que:

Q é a carga passante [coulombs];

I₀ é a corrente imediatamente depois da voltagem ser aplicada [amperes]; e

I_t é a corrente a t minutos depois da voltagem ser aplicada [amperes].

Figura 3 - Ensaios: (a) resistência à compressão axial; (b) absorção por imersão; (c) absorção por capilaridade; (d) ensaio de penetrabilidade de cloretos; (e) RES



Ao final do ensaio, foi realizada a medição da profundidade de penetração de cloretos, um acréscimo em relação a norma. Assim como indicado nos trabalhos de Real *et al.* (2015), Pontes *et al.* (2021) e Carneiro *et al.* (2021), a profundidade de penetração de cloretos foi obtida pela aspersão de uma solução aquosa de 0,1 M

de AgNO_3 (nitrato de prata) na superfície recém fraturada das amostras, com a formação de duas regiões com colorações distintas.

A resistividade elétrica superficial foi acompanhada durante um ano, com medições em 7 idades, no total, realizadas aos 7, 28, 56, 91, 154, 273 e 364 dias de idade. Foi utilizado o método Wenner de 4 eletrodos, espaçados entre si a cada 50 mm. As medidas foram executadas em 5 corpos de prova cúbicos de 25 cm de lado por mistura e, em cada amostra, foram realizadas 6 medidas, uma em cada face (Figura 3e). O valor da RES foi obtido pela média dessas 30 medições. Para evitar interferência da variação dos teores de umidade nos resultados, todas as amostras estavam saturadas (saturada superfície seca) durante as medições, conforme prescreve a UNE 83988-2 (AENOR, 2014).

Resultados e discussão

Resistência à compressão axial, absorção de água e permeabilidade de cloretos

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias e 56 dias, com indicação das médias e desvios padrão.

Pela Figura 4, comparando-se o efeito do tipo de cimento, a maior resistência à compressão axial observada foi do concreto CP V-ARI, seguido pelos concretos CP IV e CP II-Z, nas duas idades analisadas. Em relação às misturas com MCS, a única que apresentou, nessas idades, maior resistência à compressão axial que o concreto referência (CP V-ARI) foi o concreto com sílica ativa (crescimento de quase 30%), com diminuição de até 10% para os outros tipos de MCS, que apresentaram valores próximos ao de referência.

Os resultados do teor de absorção por imersão e do índice de vazios, com médias e desvio padrão, estão apresentados na Figura 5.

No geral, as misturas com MCS apresentaram valores de absorção próximos à mistura de referência (CP V-ARI), entre 3,40% e 3,69%, com exceção do SA que apresentou valor inferior (2,03%). Segundo critérios do Comité Euro-International du Béton (CEB 192), relatados por Cascudo (1997), os concretos estudados se inserem numa faixa de absorção média (entre 3% e 5%), correspondente a um concreto de qualidade intermediária. A única exceção é o concreto com sílica ativa (SA), de absorção inferior a 3%, cujo resultado o classifica como sendo um concreto superior (absorção baixa e qualidade boa). O índice de vazios variou entre 4,80% e 11,36%, mas os concretos com MCS (com exceção da sílica ativa) mostraram valores muito próximos do concreto CP V-ARI, em torno de 8%. O concreto CP II-Z resultou no maior índice de vazios (11,36%), ao passo que os melhores resultados foram obtidos pelos concretos SA e CP IV, com valores iguais a 4,80% e 5,95%, respectivamente.

Figura 4 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias e 56 dias

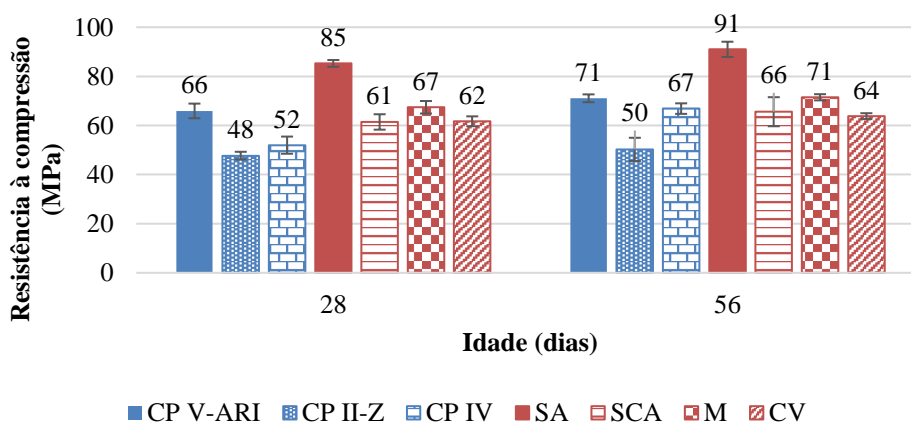
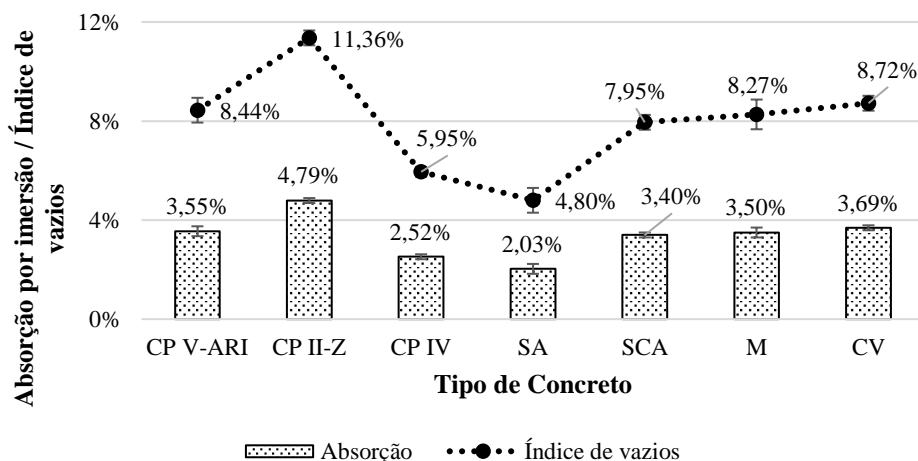


Figura 5 - Resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos, aos 56 dias



A Figura 6 apresenta a taxa de absorção de água por capilaridade dos concretos, medidas de 3 a 72 horas.

Pela Figura 6, observa-se um aumento da massa de água absorvida por sucção capilar ao decorrer do ensaio e uma tendência diferente dos resultados de absorção por imersão, com valores mais distantes para os concretos com MCS. A capilaridade está mais associada ao tamanho dos poros e a interconexão entre eles. Nesse sentido, o volume total de poros acessíveis importa para o resultado da absorção de água, mas também tem muita relevância as dimensões dos poros, uma vez que o diâmetro do poro define a força capilar. Não raro, materiais que não possuem a maior porosidade total apresentam resultados mais altos de absorção por capilaridade. Nesta pesquisa, esse foi o caso do concreto SCA e, principalmente, do com metacaulim, que apresentaram valores mais elevados de absorção por capilaridade, mas que não possuem os maiores índices de vazios. A capilaridade é um fenômeno que expressa sucção capilar na direção contrária da gravidade, justificando assim a força capilar como indutora principal do fenômeno. Dessa forma, quanto menor o diâmetro do capilar, maior a força capilar de ascensão do líquido, como bem estabelecido na Lei de Jurin (Ollivier; Torrenti, 2014). Sob a ótica da durabilidade, os resultados de absorção por capilaridade devem ser observados de forma muito cuidadosa, ponderando-se sempre sobre a massa total de água absorvida e a altura de ascensão capilar, podendo-se avaliar, também, a taxa de absorção ao longo do ensaio, em especial nos primeiros períodos do ensaio (avaliando-se, assim, a avidez de água do material poroso, que se traduz na capilaridade em si).

Na comparação entre os concretos com MCS, o concreto SA teve a menor absorção de água ao final do ensaio ($0,15 \text{ g/cm}^2$), seguido pelos concretos com cinza volante ($0,23 \text{ g/cm}^2$), sílica de casca de arroz ($0,31 \text{ g/cm}^2$) e metacaulim ($0,35 \text{ g/cm}^2$). De forma destacada e inequívoca, a sílica ativa apresentou os resultados mais baixos de absorção por capilaridade, dentre todos os concretos analisados. Na comparação entre os tipos de cimento, o concreto com CP IV apresentou a menor absorção de água ($0,24 \text{ g/cm}^2$), seguido pelos concretos com CP II-Z ($0,32 \text{ g/cm}^2$) e CP V-ARI ($0,33 \text{ g/cm}^2$). Fica clara a complexidade na análise desses resultados, uma vez que no contexto da durabilidade os concretos M (metacaulim) e SCA (sílica de casca de arroz) não são os piores e nem o concreto CP IV é tão performante assim.

O teste rápido de permeabilidade de cloretos (RCPT) modificado gerou dois resultados principais: a carga total passante e a profundidade de penetração de cloretos por método colorimétrico, indicados na Figura 7.

Figura 6 - Absorção de água por capilaridade, medida de 3 horas a 72 horas de ensaio

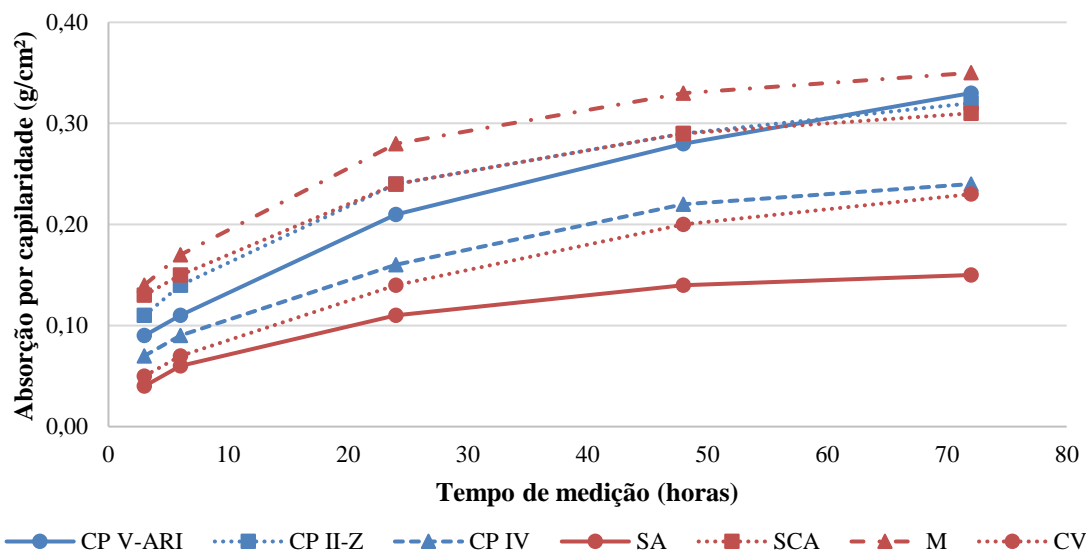
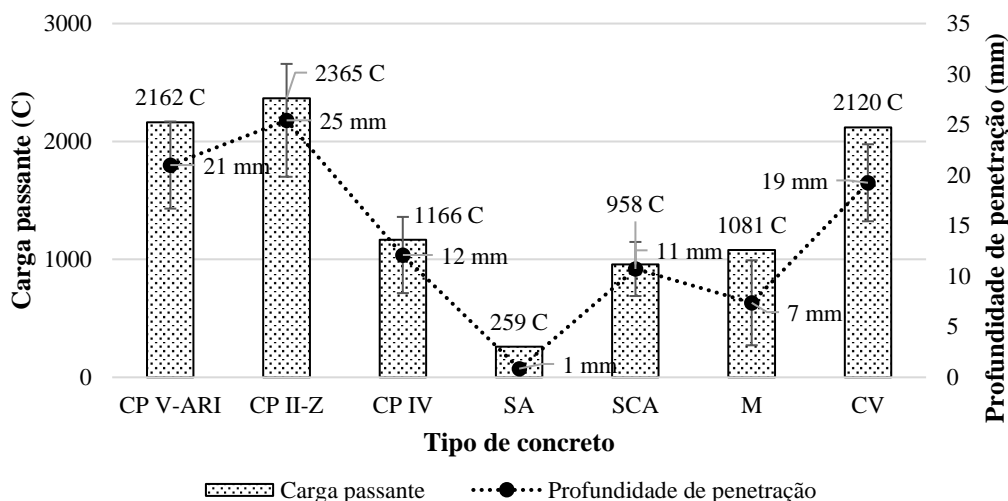


Figura 7 - Carga elétrica passante e profundidade de penetração de cloretos no ensaio de penetrabilidade de íons Cl-



Nota: as barras de erros representam os desvios padrão das medidas da profundidade de penetração de cloretos.

Pela Figura 7, analisando-se a variável tipo de cimento, observa-se uma menor carga passante e profundidade de cloretos para o concreto CP IV, que obteve praticamente metade do valor de carga passante e aproximadamente 50% menor profundidade de penetração de cloretos que os concretos com os demais tipos de cimento. O concreto CP IV também apresentou menores valores de absorção de água que os concretos com demais cimentos estudados.

Houve um melhor desempenho de concretos com MCS quanto à resistência à penetração de cloretos (menor carga passante e menor profundidade de penetração). É consenso que o uso de MCS reduz a penetração de cloretos (Hoppe Filho *et al.*, 2013; Medeiros *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2013), aumenta a RES do concreto (Medeiros-Junior *et al.*, 2014; Cascudo *et al.*, 2021b; Wosniack *et al.*, 2021) e contribui para a prevenção da corrosão das armaduras devido ao ataque por cloretos. Uma das razões é a redução da porosidade capilar, promovida pela reação das adições pozolânicas com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando silicato de cálcio hidratado (Dal Molin, 2022). Todavia, há um efeito muito importante que se soma a este aspecto de densificação da microestrutura, incidente sobre parâmetros da solução do poro, que implica em reduções significativas da condutividade e força iônica desse meio aquoso intersticial, como discutido por

Cascudo *et al.* (2021a). Esse efeito contribui de maneira substancial para o aumento da RES do concreto e para a redução do transporte de cloretos no meio poroso.

O maior destaque em desempenho, novamente, foi para o concreto com sílica ativa, seguido pelos concretos SCA, M e, por fim (com resultados bem menos importantes), o concreto CV. De fato, entre os MCS analisados, a sílica ativa possui alta finura e a maior pozolanicidade, confirmada pela sua caracterização, apresentada na Tabela 2. Ao contrário, a cinza volante apresenta menor desempenho, devido à sua menor finura e menor atividade pozolânica (ver Tabela 2), comparativamente aos demais MCS. Sobre pozolanicidade, a cinza volante sequer atingiu o limite para que pudesse ser considerada uma pozolana pelo ensaio de Chapelle modificado. Um fato curioso é que o resultado do concreto CP IV, que é constituído por um cimento com altos teores de cinza volante, foi bastante razoável, com reduções bem mais expressivas de penetração de cloretos do que as observadas no concreto CV. Provavelmente, o motivo desse comportamento é que a cinza volante que compõe o cimento CP IV é quantitativamente – teor deve ser de 15% a 50%, conforme NBR 16697 (ABNT, 2018a) – e qualitativamente superior à cinza volante que foi empregada na composição do concreto CV. Sobre o metacaulim, há resultados anteriores de coautores deste artigo que mostraram muito bom desempenho dessa adição mineral, com destaque bem maior do que o verificado no presente artigo (Cascudo *et al.*, 2021b; Oliveira; Cascudo, 2018). Certamente, aspectos como a alta finura, a pureza e a elevada pozolanicidade do metacaulim são determinantes para o alto desempenho esperado, fato não plenamente verificado no presente trabalho.

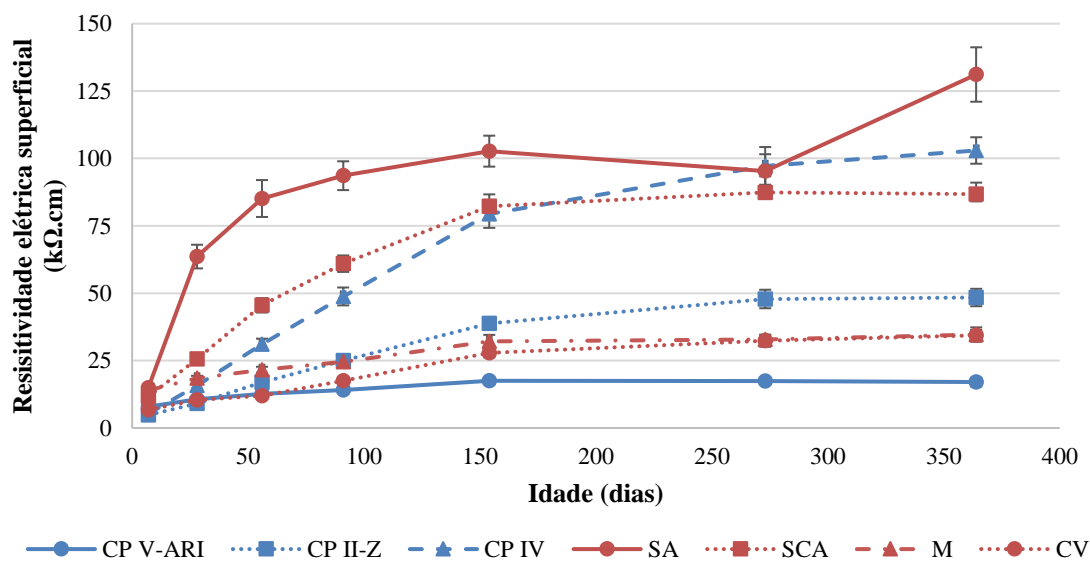
Resistividade elétrica superficial

Referente à RES, alvo principal do presente trabalho, a Figura 8 apresenta seus resultados versus tempo.

Analisando a Figura 8, verifica-se que a RES de todas as amostras apresenta uma tendência de crescimento ao longo do tempo, com intensidade diferente entre a maioria das amostras – exceto a sobreposição das curvas dos concretos CV e M, depois dos 150 dias. Desse modo, é possível verificar que a RES sofre influência da evolução do processo de hidratação do cimento ao longo do tempo, do tipo de cimento e dos MCS. Como observado por Isaia *et al.* (2017), a RES está intimamente ligada à compacidade de sua microestrutura, ou seja, ao tamanho e distribuição dos poros que variam em função da evolução da hidratação da matriz cimentícia.

Quanto ao cimento, o concreto CP IV apresentou o melhor desempenho, seguido pelo CP II-Z e por último pelo concreto CP V-ARI. Nota-se que os cimentos que já têm incorporado uma maior quantidade de MCS geraram concretos com maiores valores de RES, a partir dos 28 dias e com maior diferença à medida que o tempo avança.

Figura 8 - Acompanhamento temporal da média e desvio padrão da RES



Esses resultados são coerentes com os apresentados por outras pesquisas. Medeiros-Junior et al. (2014) avaliaram o efeito de diferentes tipos de cimentos brasileiros (CP II-F-32, CP III-40 RS, CP IV e CP V-ARI) na resistência à compressão axial e RES até 91 dias de idade, considerando três relações água/cimento (0,4; 0,5 e 0,6), sem o uso de aditivos químicos. Eles chegaram à conclusão de que o tipo de cimento influencia essas duas propriedades. Os cimentos com maiores teores de MCS (CP III e CP IV) formaram, de modo geral, amostras de menores resistência à compressão axial, porém com maiores valores de RES. Os autores justificam a RES maior da amostra com CP III-40 RS devido ao refinamento dos poros e consequente redução da condutividade do meio, produzido pelos altos teores de escória de alto forno. Em publicação posterior, Medeiros-Junior e Lima (2016) apresentaram os resultados da continuidade do monitoramento da RES até os dois anos de idade, em amostras não-saturadas, apresentando a mesma tendência, sendo os maiores valores observados na amostra com CP III, seguido pela amostra com CP IV. Além disso, a relação água/cimento não foi estatisticamente significativa nesse estudo de longo prazo.

Além disso, a solução físico-química dos poros dos concretos e seu grau de ionização, oriunda do tipo de cimento, também influencia nos valores de sua RES (Oliveira; Cascudo, 2018). Como discutido no tópico anterior, os MCS promovem reduções consideráveis da condutividade e força iônica do meio aquoso intersticial, o que contribui significativamente para o aumento da RES do concreto (Cascudo et al., 2021a).

Um aspecto interessante a se observar, na comparação entre cimentos, são as curvas dos concretos CP V-ARI e CP II-Z, que se estabilizaram mais rapidamente, ou seja, a partir dos 154 ou dos 273 dias, respectivamente. Isso pode indicar que, para concretos sem ou com baixos teores de adições incorporados ao cimento, a matriz cimentícia atinge a sua maturidade mais rapidamente, pois as reações secundárias entre o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do clínquer e os materiais pozolânicos praticamente não acontecem depois de determinado tempo. Dessa forma, não há uma formação significativa posterior de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com alterações da microestrutura da matriz cimentícia.

Para analisar os concretos com MCS, é preciso compará-las primeiramente com o seu concreto referência (CP V-ARI). Para facilitar a análise, o gráfico da Figura 9 apresenta a diferença percentual da RES entre cada tipo de concreto e o concreto referência (CP V-ARI), considerando a mesma idade de medição.

Todos os concretos, a partir dos 91 dias, apresentaram maior RES que o concreto referência. Para os concretos com metacaulim (M) e cinza volante (CV), aos 364 dias, os resultados foram aproximadamente o dobro do CP V-ARI (diferença de 100%). Já os concretos com sílica de casca de arroz (SCA) e sílica ativa (SA) demonstraram aumentos de RES de 410% e 671%, respectivamente (nessa mesma idade). Portanto, entre os MCS estudados, a sílica ativa e a sílica de casca de arroz mais impactaram no aumento da RES. Acredita-se que este resultado tenha relação também com a pozolanicidade elevada desses dois MCS, medida pelo ensaio de Chapelle, além de suas maiores finuras (Tabela 2). Os concretos CP II-Z e CP IV também apresentaram RES maiores que o concreto referência aos 364 dias: aumento de 185% e 505%, respectivamente.

Essa mesma tendência foi observada em diferentes trabalhos científicos. Pilvar, Ramezaniapour e Rajaie (2016) estudaram concretos com diferentes teores de substituição de sílica ativa (7,5% e 15%). Para concretos com mesmo consumo de ligantes e mesma relação água/ligante, o uso de sílica ativa aumentou consideravelmente a RES das amostras, chegando a aumentar em mais de 9 vezes para um dos concretos com substituição de 15% de sílica ativa, aos 91 dias. Cascudo *et al.* (2021b) estudaram três tipos de metacaulins, e todos apresentaram maiores valores de RES do que o concreto referência, sendo que dois chegaram a um aumento de quase 200% aos 140 dias de idade.

Kang *et al.* (2021) investigaram concretos com 19 tipos de cinza volante, com teores de substituição de 20% e 40%, dos 3 aos 180 dias de idade. Independentemente da cinza volante utilizada, os concretos com MCS apresentaram maiores RES que o concreto referência. Porém, houve uma grande variação entre os tipos de cinza volante, com aumentos aproximados de 4 a 12 vezes, para o caso de 40% de substituição do cimento. Chao-Lung, Anh-Tuan e Chun-Tsun (2011) avaliaram concretos com cinza de casca de arroz, considerando teores de 10%, 20% e 30%, de 1 a 91 dias de idade. Para a relação água/ligante de 0,35, nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias), o concreto referência apresentou maior RES, porém a partir dos 14 dias, as amostras com cinza de casca de arroz passaram a mostrar valores crescentes dessa propriedade, chegando a aumentar em 225% a RES para o maior teor de substituição, aos 56 dias. Araújo, Macioski e Medeiros (2022) também avaliaram tipos de concretos com cinza de casca de arroz (teor de 10%) e com cinza volante (10% e 30%). Aos 365 dias, a RES das amostras com cinza volante apresentou um grande crescimento em relação à série de referência: 102% e 146% para teores de substituição de 10% e 30%, respectivamente.

Por sua vez, comparando com os outros tipos de cimento (CP II-Z e CP IV), os concretos M e CV apresentaram RES mais baixas (sendo significativamente mais baixas em relação ao CP IV), enquanto os concretos SCA e SA tiveram uma maior RES em comparação com o concreto CP II-Z e próximo ou superior ao CP IV.

Para identificar a existência ou não de distinção entre os resultados, foi realizada uma análise de variância, com nível de confiança de 95%, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

O modelo fatorial apresentado na Tabela 6 se mostrou significativo, com coeficientes de determinação e de correlação acima de 0,98, indicando que a variação total dos dados de RES é muito bem explicada pelo modelo. Conclui-se que as duas variáveis independentes (tipo de concreto e idade) foram estatisticamente significativas com 95% de confiabilidade, o que significa que, de fato, elas exercem influência na RES do concreto. A interação também foi significativa, o que implica na ocorrência de sinergia dos fatores, ou seja, o efeito do tipo de concreto na RES é alterado pela idade e vice-versa. Pelos valores de F_{cal} e F_{tab} , observa-se que o tipo de concreto apresentou maior poder de influência que a idade. Isso demonstra como a formulação do concreto, especialmente ao se tratar de tipo de cimento e MCS, influencia no transporte de carga elétrica através do meio poroso. Este tipo de verificação está de acordo com os trabalhos de Medeiros-Junior *et al.* (2014), Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) e Hino Junior, Balestra e Medeiros-Junior (2021).

Fazendo o agrupamento múltiplo de médias pelo teste de Duncan, ao se considerar as duas variáveis independentes separadas, cada tipo de concreto ficou em um grupo separado (7 grupos) e cada idade em um grupo distinto (7 grupos).

Correlações entre resistividade elétrica superficial e demais propriedades

Diante dos resultados apresentados, é possível correlacionar a RES com as demais propriedades, considerando somente os resultados apresentados nesta pesquisa. Começando com a resistência à compressão axial, as Figuras 10 e 11 apresentam as correlações obtidas, nas idades de 28 e 56 dias, para todos os concretos e somente para os concretos com MCS, respectivamente. Cada ponto demarcado nos gráficos corresponde à média dos valores obtidos em cada situação analisada.

Figura 9 - Diferença percentual da RES em relação à mistura de referência (CP V-ARI)

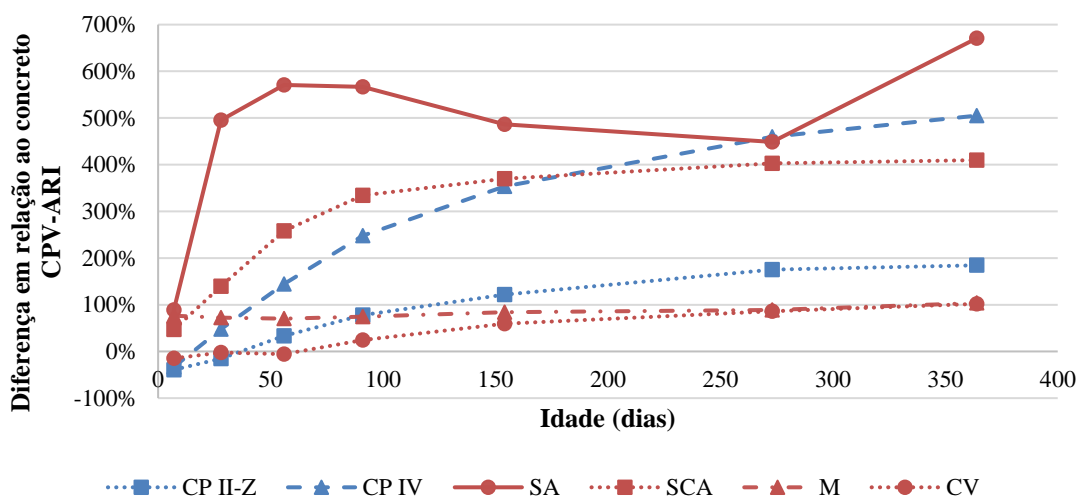


Tabela 6 - Resultados da ANOVA dos dados de resistividade elétrica superficial

Efeito	SQ	GL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	Resultado
Modelo	1525687	48	31785	1996,190	1,37	significativo
Erro (Resíduo)	22181	1393	16	-	-	-
Total	1547868	1441	-	-	-	-
Tipo de concreto (7 tipos)	783300	6	130550	8198,90	2,11	significativo
Idade (7 idades)	519548	6	86591	5438,20	2,11	significativo
Tipo de concreto x Idade	249317	36	6925	434,90	1,43	significativo
Erro (Resíduo)	22181	1393	16	-	-	-

Nota: coeficiente de determinação do modelo (R^2_{mod}): 0,986; e coeficiente de correlação do modelo (R_{mod}): 0,993.

Pela Figura 10, observam-se correlações entre RES e resistência à compressão axial com coeficiente de determinação (R^2) de 0,68 e 0,57, tomando-se todos os tipos de concreto deste estudo, aos 28 e 56 dias, respectivamente. De acordo com o critério de Shimakura e Ribeiro Junior (2002), apresentado na Tabela 7, essas correlações são moderadas. Uma explicação para essa associação é que essas duas propriedades são influenciadas pela microestrutura da matriz cimentícia e, portanto, pela sua porosidade. Contudo, para o caso da RES existe uma complexidade maior, pois ela também é influenciada pela composição da solução aquosa presente na rede de poro do concreto (Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Cascudo *et al.*, 2021a; Hoppe Filho *et al.*, 2013), que pode ser mais ou menos rica em íons a depender dos materiais componentes do concreto e dos processos de deterioração que possam ter ocorrido em determinadas condições de exposição. Isso explica, em parte, o fato de os valores de R^2 observados na Figura 10 ficarem abaixo de 0,70.

A Figura 11 apresenta o mesmo tipo de correlação, porém somente para os concretos com MCS. Neste caso, deve-se notar que as correlações ficaram melhores, com coeficientes de determinação de 0,87 e 0,75 (correlação forte – Tabela 7). Não foi apresentada essa interação para os concretos somente com cimento Portland, pois os coeficientes obtidos foram muito baixos.

Análise semelhante foi feita por Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), que acharam correlações logarítmicas com R^2 acima de 0,98 entre essas duas propriedades, sendo correlações classificadas como muito fortes (Tabela 7). Essas correlações apresentaram a mesma tendência de crescimento, mas considerando separadamente as duas misturas ensaiadas: cimento Portland modificado com 12,5% de cinza volante e cimento Portland pozolânico (com 27% de cinza volante). Já para uma maior variedade de concretos (relação água/ligante variando entre 0,33 e 0,45; teor de substituição de sílica ativa entre 0-15%), Homayoonmehr; Rahai e Ramezani-pour (2022) obtiveram correlações com coeficientes próximos de 0,5-0,6, considerando função exponencial ou potência, com R^2 mais próximos aos obtidos nesta pesquisa.

Figura 10 - Correlação entre RES e resistência à compressão axial para todos os concretos aos 28 e 56 dias

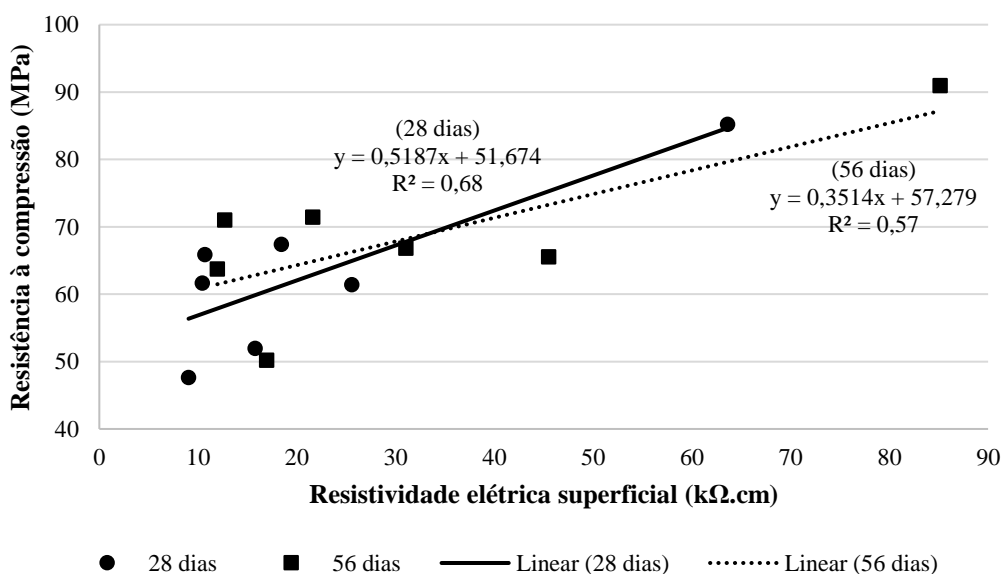


Figura 11 - Correlação entre RES e resistência à compressão axial para os concretos com MCS aos de 28 e 56 dias

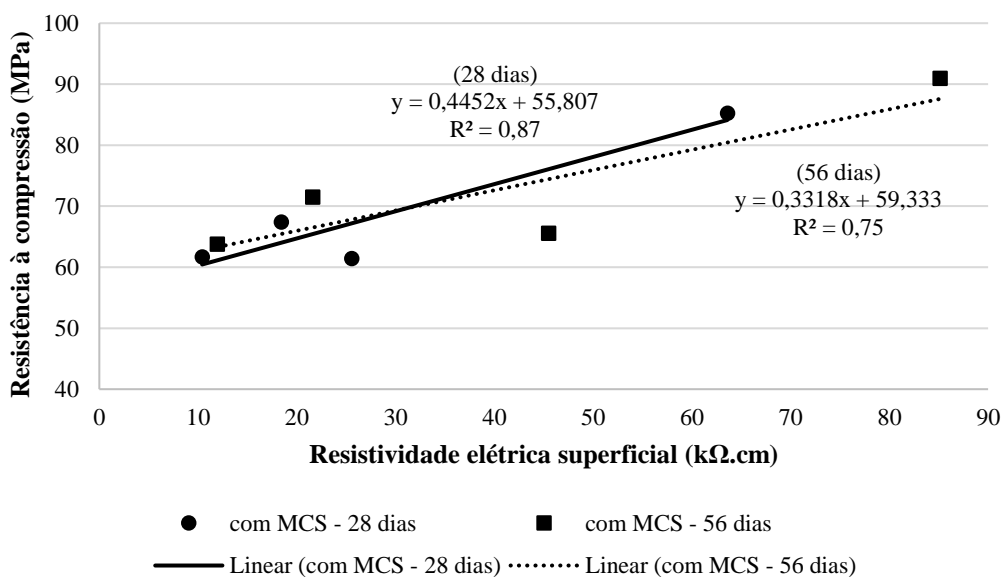


Tabela 7 - Propriedades físicas dos cimentos e dos MCS utilizados

Coefficiente de determinação (R^2)	Interpretação da correlação
0,00 a 0,19	Bem fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

Fonte: Shimakura e Ribeiro Junior (2002).

Apesar de ser uma correlação interessante, que permitiria prever, a partir de um ensaio não destrutivo e mais rápido, uma propriedade clássica do concreto obtido por um ensaio destrutivo, é necessário cuidado com o seu uso, sendo limitado a concretos semelhantes e observando o coeficiente R^2 .

As correlações encontradas entre RES e absorção por imersão e por capilaridade são apresentadas na Figura 12. A Figura 13 demonstra as correlações encontradas entre RES e carga passante e profundidade de penetração de cloretos, obtidas no ensaio RCPT.

Pelos gráficos das Figuras 12 e 13, observam-se, no geral, correlações moderadas (Tabela 7). Os maiores coeficientes de determinação foram obtidos nas correlações entre RES e carga passante e profundidade de penetração de cloretos. Este resultado é coerente pelo fato de ambos os ensaios serem conduzidos e dependentes do estabelecimento de um fluxo de corrente nas amostras testadas. Inclusive, existem trabalhos que, a partir dos resultados do ensaio de migração de cloretos se executa o cálculo da resistividade elétrica volumétrica, como os trabalhos de Hoppe Filho *et al.* (2013) e de Wosniack *et al.* (2021).

Figura 12 - Correlação entre RES e ensaios de absorção por imersão e por capilaridade, aos 56 dias

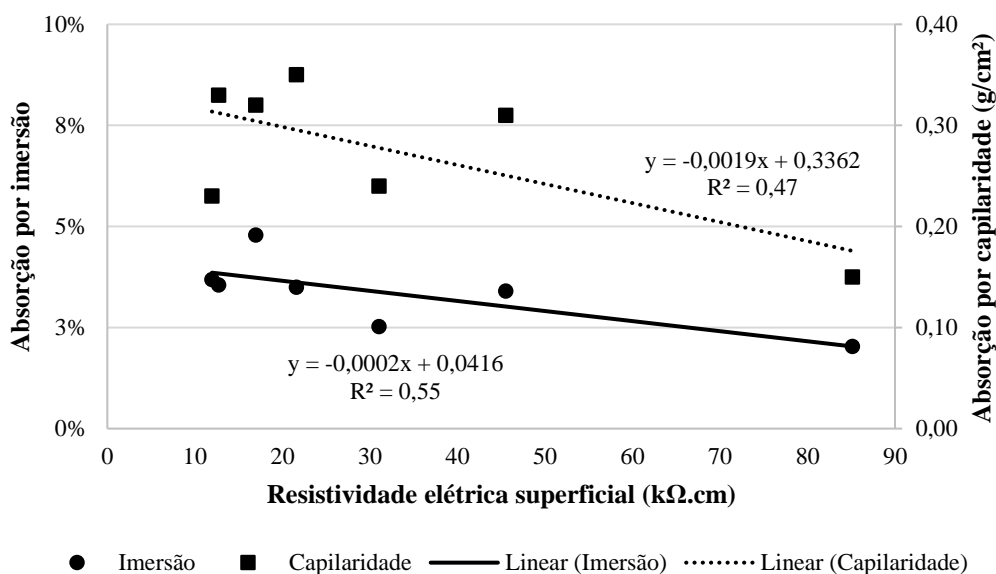
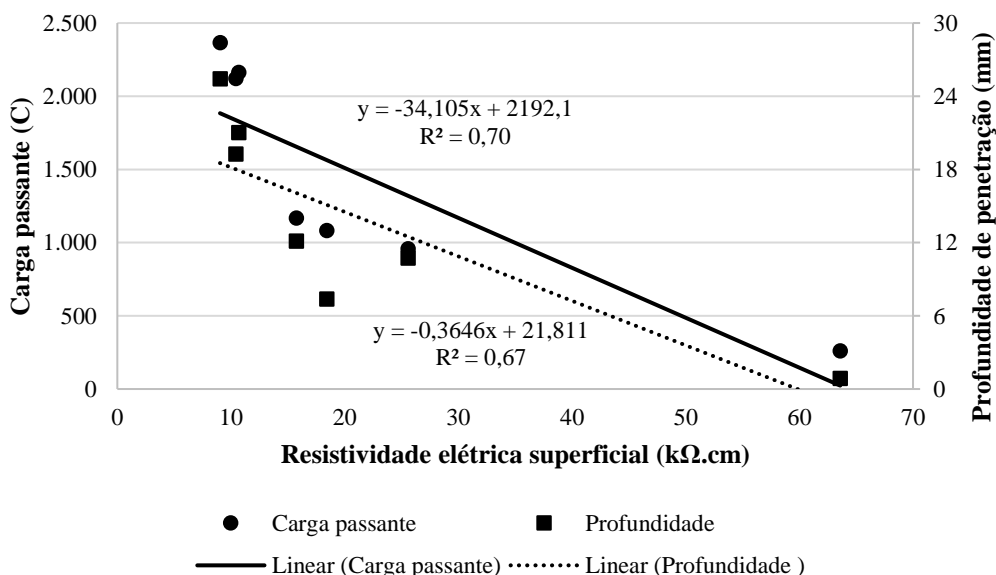


Figura 13 - Correlação entre RES e resultados do ensaio RCPT, aos 28 dias



Os coeficientes R^2 para os ensaios de absorção de água foram mais baixos. Para todos esses casos, há um comportamento inverso entre a RES e essas características do concreto. Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) também avaliaram os dois tipos de absorção, achando correlações logarítmicas decrescentes com R^2 acima de 0,89 entre essas propriedades, porém os autores analisaram separadamente por tipo de mistura. Em outra pesquisa, Aragoncillo, Cleary e Lomboy (2023) acharam uma correlação linear da carga passante com o inverso da resistividade elétrica (condutividade), com R^2 superior a 0,98, considerando misturas com diferentes tipos de agregados: leves, de peso normal e reciclados.

Conclusões

Diante dos resultados apresentados e das análises realizadas, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- (a) a resistividade elétrica superficial foi mais influenciada pelos diferentes tipos de concreto (cimento e material cimentício suplementar) do que pelo avanço da idade;

- (b) o cimento cujo concreto apresentou maiores resultados de RES foi o CP IV, que possui maior teor de MCS, apesar de ter apresentado resistência à compressão axial menor do que o CP V-ARI, nas datas avaliadas;
- (c) o uso de MCS aumentou a RES do concreto em comparação com a série de referência (CP V-ARI). A sílica ativa foi o MCS que apresentou, de forma inequívoca, os maiores aumentos da RES (671% superior em relação ao concreto de referência), seguida pela sílica de casca de arroz (aumento de 410%);
- (d) foram obtidas correlações com R^2 superior a 0,70 entre a RES e as seguintes propriedades: resistência à compressão axial dos concretos com MCS e carga elétrica passante pelo ensaio RCPT; e
- (e) o concreto que apresentou os melhores resultados em todas as propriedades estudadas, incluindo valores de RES muito elevados e crescentes com o tempo, foi o concreto com sílica ativa. Esta pozolana possui alta reatividade, respaldada pelo alto valor de Chapelle e por uma elevada superfície específica, o que justifica os destacados resultados obtidos.

Referências

- AHMED, S. M.; KAMAL, I. Electrical resistivity and compressive strength of cement mortar based on green magnetite nanoparticles and wastes from steel industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01712, dez. 2022.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T 358-15**: standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington DC, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G57-20**: standard test method for measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. West Conshohocken, 2020.
- ARAGONCILLO, A. M. M.; CLEARY, D. B.; LOMBOY, G. R. Estimating the permeability of porous aggregate concretes using electrical resistivity based tests. **Construction and Building Materials**, v. 364, p. 129909, jan. 2023.
- ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. de. Concrete surface electrical resistivity: effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, mar. 2022.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83988-2**: durabilidad del hormigón: métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: materiais pozolânicos: determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado: método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: agregado graúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2021c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μ m por lavagem. Rio de Janeiro, 2021d.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Versão corrigida: 2009. Rio de Janeiro, 2008.
- BALESTRA, C. E. T. *et al.* Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 230, jan. 2020.
- BALESTRA, C. E. T. *et al.* Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, set. 2019.
- BARATA, M. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 69-78, jan./mar. 2002.
- BARBOZA, L. S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, abr./jun. 2020.
- CAMPOS, T. F.; CASCUDO, O. Imputação de dados ausentes em séries temporais de carbonatação dos concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e136386, jan./dez. 2024.
- CARNEIRO, A. F. B. *et al.* Effectiveness of surface coatings in concrete: chloride penetration and carbonation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 3, dez. 2021.
- CASCUDO, O. *et al.* Effect of different metakaolins on chloride-related durability of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 3, p. 3–14, 2021b.
- CASCUDO, O. *et al.* Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, p. 103858, jan. 2021a.
- CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, Editora UFG, 1997.
- CASCUDO, O. Potenciais de corrosão e resistividade elétrica do concreto: como controlar a corrosão de armaduras. **Revista do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto**, v. 3, n. 8, p. 26–31, 1993.
- CASTILLO, D.; HEDJAZI, S.; KABIR, E. Study on early-age elastic modulus of frc using electrical resistivity and resonance frequency. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 16, n. 1, p. 53, dez. 2022.
- CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3768–3772, set. 2011.
- CHEN, C.-T.; CHANG, J.-J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35–43, nov. 2014.
- CHEYTANI, M.; CHAN, S. L. I. The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, dez. 2021.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: TUTIKIAN, B. *et al.* (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. I.

- D'ANDREA, R. **Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión**: aplicación de la resistividad eléctrica. Madri, 2010. 330 f. Tese (Doutorado) - Polytechnic University of Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja CSIC, Madri, Espanha, 2010.
- FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **FM 5-578**: Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability. Tallahassee, 2004.
- FONSECA, T. V. *et al.* Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime. **Construction and Building Materials**, v. 320, p. 126235, fev. 2022.
- HINO JUNIOR, J. R.; BALESTRA, C. E. T.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete: Sensitivity to the effect of fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122265, mar. 2021.
- HOMAYOONMEHR, R.; RAHAI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A. Predicting the chloride diffusion coefficient and surface electrical resistivity of concrete using statistical regression-based models and its application in chloride-induced corrosion service life prediction of RC structures. **Construction and Building Materials**, v. 357, nov. 2022.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 411–418, mar. 2013.
- ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233–252, abr./jun. 2017.
- KANG, S. *et al.* The relationship between the apparent diffusion coefficient and surface electrical resistivity of fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123964, set. 2021.
- LENCIONI, J. W.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Analysis of different parameters in the electrical resistivity test of concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 1, p. 27–38, 27 jan. 2021.
- LEONEL, A. C. A.; OLIVEIRA, A. M. de; CASCUDO, O. Interação da resistividade elétrica com esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. **Paranoá**, v. 17, p. e49960, maio 2024.
- LUPING, T.; NILSSON, L. Rapid Determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 1, p. 49–53, 1992.
- MEDEIROS, M. H. F. de *et al.* High strength reinforced concrete with metakaolin and silica fume in marine environment: an experimental work. **Hormigón y Acero**, v. 63, p. 57–66, 2012.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Inspection and rehabilitation of the marquee of the Ibirapuera Park in Brazil. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 6, p. 1-15, 2021.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. de; MUNHOZ, G. da S.; MEDEIROS, M. H. F. de. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. **Revista ALCONPAT**, v. 9, n. 2, p. 152–166, 30 abr. 2019.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Accelerated carbonation effect on electrical resistivity and sorptivity of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 3, p. 7-14, aug. 2018.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p. 113–128, 30 maio 2014.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Variação da resistividade elétrica do concreto com o formato de corpos de prova para diferentes tipos de cimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 1-8, abr. 2015.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11–16, mar. 2016.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. 3rd ed. Columbus (USA): McGraw-Hill, 2006.
- MENDES, S. E. S. *et al.* Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 610–620, dez. 2018.

- MENDES, A. Z.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S. . Effect of the corrosion degree and the carbonation depth on the electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and corrosion potential. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 4, p. 15-26, May 2019.
- NGUYEN, A. Q. *et al.* Evaluation of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 308–322, out. 2017.
- NORDTEST. **NT BUILD 492**: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, 1999.
- OLIVEIRA, A. M. de; CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 467–477, dez. 2018.
- OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: CASCUDO, O.; CARASEK, H. (ed. trad.); OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (ed.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. cap. 3, p. 41-112.
- PAN, J. *et al.* Theoretical and experimental study on the electrical resistivity method for evaluating fresh concrete segregation. **Journal of Building Engineering**, v. 48, maio 2022.
- PEREIRA, E. *et al.* Chloride accelerated test: influence of silica fume, water/binder ratio and concrete cover thickness. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 4, p. 561–581, ago. 2013.
- PILVAR, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H. Comparison of four electrical measurement methods with bulk diffusion for assessing the chloride resistance of concretes. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 40, n. 4, p. 327–336, 23 dez. 2016.
- POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete: a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2–3, p. 125–131, mar. 2001.
- PONTES, C. V. *et al.* Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 101860, fev. 2021.
- RAVERDY, M. *et al.* Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., Paris, 1980. **Proceedings [...]** Paris, 1980.
- REAL, L. V. *et al.* Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 2, p. 149–159, maio 2015.
- REPETTE, W. L.; LIMA, M. G.; CASCUDO, O. Recomendações para reparo de estruturas de concreto com armaduras corroídas. In: SEMINÁRIO DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., Rio de Janeiro, 1990. **Anais [...]** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Corrosão - ABRACO, 1990.
- SATHIPARAN, N.; JEYANANTHAN, P.; SUBRAMANIAM, D. N. Surface response regression and machine learning techniques to predict the characteristics of pervious concrete using non-destructive measurement: Ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity. **Measurement**, v. 225, p. 114006, fev. 2024.
- SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434–441, dez. 2014.
- SHIMAKURA, S. E.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Interpretação dos valores do coeficiente R²**. Curso digital de Estatística. Universidade Federal do Paraná, 2002.
- SILVA, F. M. da *et al.* The effect of tire-rubber pretreatment on the physical–mechanical properties and durability of high-performance concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 12, dez. 2022.
- WOSNIACK, L. M. *et al.* Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321–340, jul./set. 2021.
- YU, J.; AKIRA, S.; MASAHIRO, I. Wenner method of impedance measurement for health evaluation of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 576–586, fev. 2019.

Agredcimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Araúdcária, CAPES e CNPq. Além disso, agradecemos o apoio institucional do Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Deve-se agradecer também a colaboração dos pesquisadores do LABITECC da Universidade Federal de Goiás (UFG), sendo este um trabalho desenvolvido em colaboração entre as instituições UFPR e UFG.

Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Concepção, programa experimental, supervisão, análise dos dados e revisão final.

Centro de Estudos em Engenharia Civil | Departamento de Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81531-980 | Tel.: (41) 3361-3218 | E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

Rayane Campos Lopes

Redação, síntese e análise de dados, elaboração de texto e revisão final.

Escola de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal de Goiás | Av. Universitária, 1488, Setor Leste Universitário | Goiânia - GO - Brasil | CEP 74605-220 | Tel.: (62) 3209-6498 | E-mail: rayaneclopes@discente.ufg.br

Lígia Vitória Real

Programa experimental e síntese de dados.

Escola de Engenharia | Universidade Presbiteriana Mackenzie | Rua da Consolação, 930, Consolação | São Paulo - SP - Brasil | CEP 01302-907 | Tel.: (11) 2114-8946 | E-mail: ligia.real@mackenzie.br

Gustavo Bortolan Rivarola

Programa experimental e síntese de dados.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81531-980 | Tel.: (41) 3361-3110 | E-mail: gustbrv@gmail.com

Andrielli Moraes de Oliveira

Análise de dados, revisão e redação final.

Escola de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal de Goiás | Tel.: (62) 3209-6573 | E-mail: andriellimorais@ufg.br

Oswaldo Cascudo

Análise de dados, revisão e redação final.

Escola de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal de Goiás | Tel.: (62) 3209-6084 | E-mail: ocascudo@ufg.br

Editor: **Enedir Ghisi**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.