

Efeito de cloretos e da umidade interna de concretos na resistividade elétrica superficial e volumétrica: influência na especificação de concretos duráveis

Effect of chlorides and of internal humidity of concretes on surface and volumetric electrical resistivity: influence on the specification of durable concrete

Infeccto de los cloro-os y de la humedad interna de los hormigones sobre la resistividad eléctrica superficial y volumétrica: influencia en las especificaciones del hormigón duradero

Letícia Alves da Silva 

Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental.
Goiânia (GO), Brasil.

Antônio Carlos Assis Leonel 

ATC Engenharia e Consultoria LTDA.
Goiânia (GO), Brasil.

Andrielli Moraes de Oliveira* 

Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental.
Goiânia (GO), Brasil.
andriellimoraes@ufg.br

* Autora correspondente.

CRediT

Contribuição de autoria: Coleta de dados; Metodologia; Redação – rascunho original: SILVA, L. A.; Coleta de dados; Metodologia; Redação – rascunho original; Redação - revisão e edição: LEONEL, A. C. A. Concepção; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação - revisão e edição: OLIVEIRA, A. M.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Não possui.

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Vanda Alice Garcia Zanoni (Editora Associada); Livia Santana (Editora Associada); Victor Itonaga (Assistente editorial).

Resumo

É objetivo avaliar o efeito de cloretos e da variação da umidade interna de concretos na resistividade elétrica superficial aparente (R_e), resistividade volumétrica (R_v) e na relação entre elas. Foram estudados concretos com diferentes relações água/ligante (a/l) (0,40, 0,55 e 0,70) e com adição de sílica ativa. Diferentes espaçamentos entre sondas de R_e foram considerados (38 e 50 mm). Os concretos também foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem em solução contendo cloretos e a dessorção e absorção de água. Como resultado, concretos com menores relações a/l e com adição de sílica ativa apresentaram os maiores valores de resistividade em geral (antes e após a presença de cloretos). Os cloretos reduziram os valores de resistividade logo no primeiro ciclo. A resistividade foi alterada quando a umidade dos concretos reduziu de 100% para até 97%. Foram obtidas altas correlações entre R_v e R_e com sondas de 38 mm e 50 mm (R^2 acima de 0,9560). Coeficientes de determinação (R^2) diferentes foram obtidos durante o processo de dessorção e de absorção de água para R_v e umidade (%). A técnica de resistividade foi sensível a presença de íons cloro e nas diferenças entre os concretos de resistência à compressão, composição, porosidade e umidade.

Palavras-chave: Resistividade, Resistividade elétrica, Resistividade volumétrica, Cloretos, Concreto, Umidade.

Abstract

The objective is to evaluate the effect of chlorides and the variation in internal humidity of concrete on apparent surface electrical resistivity (R_e), volumetric resistivity (R_v) and the relationship between them. Concretes with different water/binder ratios (a/l) (0.40, 0.55 and 0.70) and with the addition of silica fume were studied. Different probe spacings were considered (38 and 50 mm) for R_e . The concretes were also subjected to wetting and drying cycles in a solution containing chlorides and water desorption and absorption. As a result, concretes with lower w/l ratios and with the addition of silica fume showed the highest resistivity values in general (before and after the presence of chlorides). Chlorides reduced resistivity values in the first cycle. The resistivity was changed when the moisture content of the concrete reduced from 100% to up to 97%. High correlations were obtained between R_e with 38 mm and 50 mm probes (R^2 above 0,9560). Different coefficients of determination (R^2) were obtained during the water desorption and absorption process for R_v and humidity (%). The resistivity technique was sensitive to the presence of chlorine ions and the difference between the concretes in the compressive strength, composition, porosity and humidity.

Keywords: Resistivity, Electrical resistivity, Volumetric resistivity, Chlorides, Concrete, Humidity.

Resumen

El objetivo es evaluar el efecto de los cloruros y la variación de la humedad interna del hormigón sobre la resistividad eléctrica superficial aparente (R_e), la resistividad volumétrica (R_v) y la relación entre ellas. Los hormigones con diferentes relaciones agua/conglomerante (a/l) (0,40, 0,55 y 0,70) y con adición de humo de sílice. Se consideraron diferentes espaciamentos de sondas R_e (38 y 50 mm) para R_e . Los concretos también fueron sometidos a ciclos de humectación y secado en una solución que contenía cloruros y desorción y absorción de agua. Como resultado, los hormigones con relaciones a/l más bajas y con la adición de humo de sílice mostraron los valores de resistividad más altos en general (antes y después de la presencia de cloruros). Los cloruros redujeron los valores de resistividad en el primer ciclo. La resistividad cambió cuando el contenido de humedad del concreto se redujo del 100% al 97%. Se obtuvieron correlaciones altas entre R_e con sondas de 38 mm y 50 mm (R^2 superior a 0,9560). Durante el proceso de desorción y absorción de agua se obtuvieron diferentes coeficientes de determinación (R^2) para R_v y humedad (%). La técnica de resistividad fue sensible a la presencia de iones cloruro y a las diferencias entre hormigones en términos de resistencia a la compresión, composición, porosidad y humedad.

Palabras-clave: Resistividad, Resistividad eléctrica, Resistividad volumétrica, Cloruros, Hormigón, Humedad.

1 Introdução

A resistividade elétrica (Re) é uma propriedade física, um indicador de durabilidade de concretos e um parâmetro muito interessante na inspeção, avaliação e diagnóstico de estruturas de concreto armado com problemas de manifestações patológicas. Ao mesmo tempo, a técnica de resistividade elétrica é 100% não destrutiva e pode ser utilizada para especificação e controle de qualidade de concretos em campo e em laboratório (Cascudo *et al.*, 2021; Leonel; Oliveira; Cascudo, 2024).

Neste sentido, esta técnica vem demonstrando confiabilidade como métrica para avaliar a deterioração multifásica em vários estágios do concreto, causada pela corrosão progressiva do aço. A entrada de cloretos, a fase de iniciação e propagação da corrosão e a elevação do nível da corrosão podem ser indicadas por uma diminuição gradual e prolongada da resistividade elétrica (Broomfield, 1997; Cascudo, 1997; Medeiros, 2001; Sengul, 2014; Layssi *et al.*, 2015; Oliveira; Cascudo, 2018; Cascudo *et al.*, 2021; Cheytani; Chan, 2021; Araújo; Macioski; Medeiros, 2021). Robles, Gucunski e Kee (2024) evidenciaram uma diminuição significativa média de 92% em relação ao valor inicial de resistividade, durante os estágios iniciais de corrosão e, de mais 80%, durante o estágio de propagação da corrosão, marcado pelo aparecimento de trincas superficiais no concreto.

Outras pesquisas também têm mostrado o parâmetro de resistividade elétrica como uma técnica muito versátil, isto é, seus resultados podem indicar diferentes composições de concreto com uma variedade de porosidade e permeabilidade, desiguais graus de umidade/saturação, segregação de agregados, comportamento de bio self-healing, hidratação de materiais álcali-ativados e a presença ainda que inicial de agentes agressivos, sobretudo cloretos e sulfatos (Cascudo, 1997; Medeiros, 2001; Sengul, 2014; Layssi; Alizadeh; Salehi, 2015; Oliveira; Cascudo, 2018; Yim; Bae; Kim, 2020; Balestra *et al.*, 2020; Cascudo *et al.*, 2021; Cheytani; Chan, 2021; Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Melara *et al.*, 2022; Lujan *et al.* 2023; Esaker; Hamza; Elliott, 2023; Bang; Yim, 2023; Piro; Mohammed; Hamad, 2023; Aragoncillo; Cleary; Lomboy, 2023; Ji *et al.*, 2024; Robles, Gucunski; Kee, 2024; Saha *et al.*, 2024; MEDEIROS *et al.*, 2025). Ademais, a flexibilidade da Re permite o uso de resposta de superfície e técnicas de aprendizado de máquina para prever características do concreto, utilizando medidas de resistividade elétrica (Sathiparan; Jeyanathan; Subramaniam, 2024).

No entanto, sabe-se que algumas limitações podem ocorrer no que tange à interpretação dos dados de Re e leituras em elementos de concreto, sobretudo em condições secas da amostragem e a presença de carbonatação superficial. Erros devido à geometria das peças estruturais e espaçamento de sondas e presença de armaduras, entre outros também podem ocorrer (Cascudo, 1997; He *et al.*, 2023; Minagawa *et al.*, 2023). Leituras com espaçamentos entre sondas diferentes e leituras com sondas embutidas aos corpos de prova de concreto podem ser uma variável significativa nos ensaios de Re com um grau de significância menor do que o tipo de concreto. Desta forma, é necessário levar isso em consideração ao comparar resultados obtidos por diferentes dispositivos e equipamentos de Re (Alves; Oliveira, 2023). Sabe-se que espaçamentos menores entre sondas tendem a medir valores de Re de camadas mais superficiais e próximas a região de cobrimento do concreto. Espaçamentos maiores entre sondas tendem a expressar valores de Re de camadas mais profundas do concreto. Já a Re volumétrica mede a resistividade mais geral

do corpo de prova do topo à base e promove uma análise mais fidedigna da propriedade do material como um todo, pois torna mínima a ação dos defeitos superficiais e pondera, também, a interferência dos agregados (principalmente grãos) nesta determinação (Leonel; Oliveira; Cascudo, 2024).

Em relação a homogeneidade do concreto de peças estruturais de concreto, regiões de cobrimento podem não ter a mesma composição que a parte interna. Isto decorre que o concreto pode apresentar propriedades distintas a depender da região a ser analisada, seja por efeito parede (no contato com a fôrma), como pode ocorrer nas laterais quando se comparado ao interior, ou por questões de sedimentação do concreto, quando se compara a camada superior com a inferior.

No que tange ao cobrimento do concreto, esta região revelou-se com melhor comportamento que a região interna de concretos com e sem adições minerais no que se refere as propriedades de absorção de água, penetração de íons cloreto e penetração de água sob pressão. O autor mencionou necessidade de maiores investigações para confirmar este comportamento (Mendes, 2009). Em outro trabalho, com a região de análise de cobrimento e interior de concretos com e sem adição de sílica ativa, não se percebeu efeitos significativos do ponto de vista estatístico em resultados gerais de permeabilidade ao ar pelos métodos de Figg e Cembureau. Foram percebidas apenas tendências de discretas reduções da permeabilidade para os concretos com sílica ativa e com valores levemente mais baixos de permeabilidade na região de cobrimento. Isto pode ter sido resultado de uma maior sedimentação e compactação das “porções” de concreto no fundo da fôrma (Medeiros, 2023). Cabe salientar que esta é uma questão complexa, pois os resultados podem se alterar muito no fundo e na parte interna da forma, dependendo da coesão do concreto no estado plástico. Caso haja baixa coesão, pode haver segregação no ato do adensamento, o que levaria o concreto a ter baixa homogeneidade e maior porosidade na porção mais ao fundo e interna da peça de concreto (inclusive com escassez de argamassa e pasta nessa região). Nesta situação, com macro porosidade no fundo, o cobrimento tenderia a apresentar resultados mais altos de permeabilidade.

Ao mesmo tempo, as melhorias e vantagens da adição de materiais cimentícios suplementares a matrizes cimentícias vêm sendo estudados pela literatura. Usualmente, estes materiais podem modificar as propriedades físicas da matriz cimentícia, como distribuição, geometria, volume e porosidade total. Isto intervém nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos (Jin; Jiang; Zhu, 2017; Andrade; Buják, 2013; Mao *et al.*, 2024; Yaseen, 2024; Ribeiro; Dias; Silva, 2024). Alterações químicas na matriz também são apontadas com a incorporação desses materiais. Eles mudam íons na solução porosa do concreto, alcalinidade, pH, condutividade e força iônica, além de densificar a matriz hidratada (Oliveira *et al.*, 2022; Santos, 2023; Oliveira *et al.*, 2023; Oliveira; Cascudo; Oliveira, 2023; Martins; Oliveira; Cascudo, 2023ab; Santos; Oliveira; Cascudo, 2023; Cascudo *et al.* 2024).

Ademais, ressalta-se que esses materiais podem ser resíduos de origem industrial, como da obtenção do silício metálico (sílica ativa), do resíduo do caulim, cinza volante, escória de alto forno, cinzas do processamento do arroz e do processamento da cana de açúcar, entre outros. Outros materiais vêm sendo mais recentemente pesquisados, a saber: lama vermelha da extração da bauxita (Batista; Picanço, 2023), resíduos da extração do manganês (Gomes-Pimentel *et al.*, 2020), resíduo da celulose (Silva *et al.*, 2024), resíduo

de caulim (Silva; Picanço, 2023), sílica gel (Oliveira *et al.*, 2020), resíduo de silício (Santos; Oliveira; Oliveira, 2021).

Dentre estes materiais, cabe destaque ao desempenho da sílica ativa que modifica fisicamente e quimicamente a matriz cimentícia e que pode retardar o tempo de iniciação da corrosão, induzida por íons cloretos e, reduzir taxas de corrosão durante o período de propagação (Oliveira; Cascudo, 2018).

Dentro deste âmbito, o presente trabalho se propõe a avaliar o efeito de cloretos e da variação de umidade interna de concretos na resistividade elétrica superficial aparente – Re (método de Wenner - 4 pontos com espaçamentos de sondas de 38 mm e 50 mm), na resistividade elétrica volumétrica – Rv e na relação entre elas. Foram variáveis a água/ligante dos concretos (0,40, 0,55 e 0,70) e o tipo de concreto (com e sem adição de sílica ativa na relação 0,55). Assim, abre-se a perspectiva de valor tecnológico e estratégico de que essas relações de resistividade elétrica possam ser úteis em inspeções de campo e na especificação de concretos mais duráveis. Espera-se também agregar valor técnico avaliando-se a partir de quando os intervenientes (cloretos e umidade) alteram valores de resistividade elétrica.

2 Programa Experimental

Foram estudados 4 tipos de concreto, sendo as variáveis: a relação água/cimento (a/l) (0,40; 0,55 e 0,70) e o tipo de concreto (com e sem sílica ativa na relação água/ligante 0,55). As proporções dos concretos foram baseadas em estudos do Grupo de Estudos em Durabilidade do Concreto Armado (GEDur) da Universidade Federal de Goiás – UFG.

Sílica ativa e cimento Portland CP V – ARI¹ de alta resistência inicial (composto por 90-100% de clínquer e sulfato de cálcio e 0-10% em massa de material carbonático), produzido de acordo com a norma brasileira NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018), foram utilizados. A caracterização física, química e mecânica do cimento e da sílica ativa está apresentada na Tabela 1.

¹ Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) - CP V é aquele que apresenta resistências iguais ou maiores que 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa, respectivamente nas idades de 1, 3 e 7 dias, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 (2019) e atende aos demais requisitos estabelecidos na ABNT NBR 16697 (2018).

Tabela 1: Propriedades químicas e físicas do cimento e da sílica ativa utilizados.

Propriedade analisada	Resultado do ensaio obtido	Exigência normativa (ABNT NBR 16697, 2018)	Resultado do ensaio obtido
	Cimento CP V		Sílica Ativa
SiO ₂	25,07	-	95,71
Al ₂ O ₃	7,59	-	0,28
Fe ₂ O ₃	3,40	-	0,17
CaO	47,90	-	0,21
MgO	4,88	≤ 6,5	0,00
SO ₃	3,26	≤ 4,5	0,00
TiO ₂	0,42	-	-
Cr ₂ O ₃	0,01	-	-
Na ₂ O	-	-	0,00
K ₂ O	-	-	0,85
Álcalis totais Na ₂ O	0,38	-	-
Álcalis totais K ₂ O	0,98	-	-
Álcalis solúveis em água Na ₂ O	0,50	-	0,05
Álcalis solúveis em água K ₂ O	0,45	-	0,10
Equivalente alcalino total de álcalis solúveis em água	0,45	-	0,11
Perda ao fogo (%)	6,33	≤ 6,5	4,21
Massa específica (g/cm ³)	2,97	-	2,67
Resistência à compressão da argamassa (3 dias)	23,3	>24*	-
Resistência à compressão da argamassa (7 dias)	30,1	>34*	-

*ABNT NBR 7215 (2019)

A pedra britada de origem granítica foi utilizada como agregado graúdo na dimensão máxima característica de 19 mm e a areia natural de leito de rio de origem quartzosa como agregado miúdo. A caracterização física desses materiais está ilustrada na Tabela 2 e Tabela 3. A Figura 1 apresentam a distribuição granulométrica dos agregados empregados. O agregado graúdo classificou-se na zona d/D 9,5/25 mm e o agregado miúdo na zona utilizável para produção de concretos.

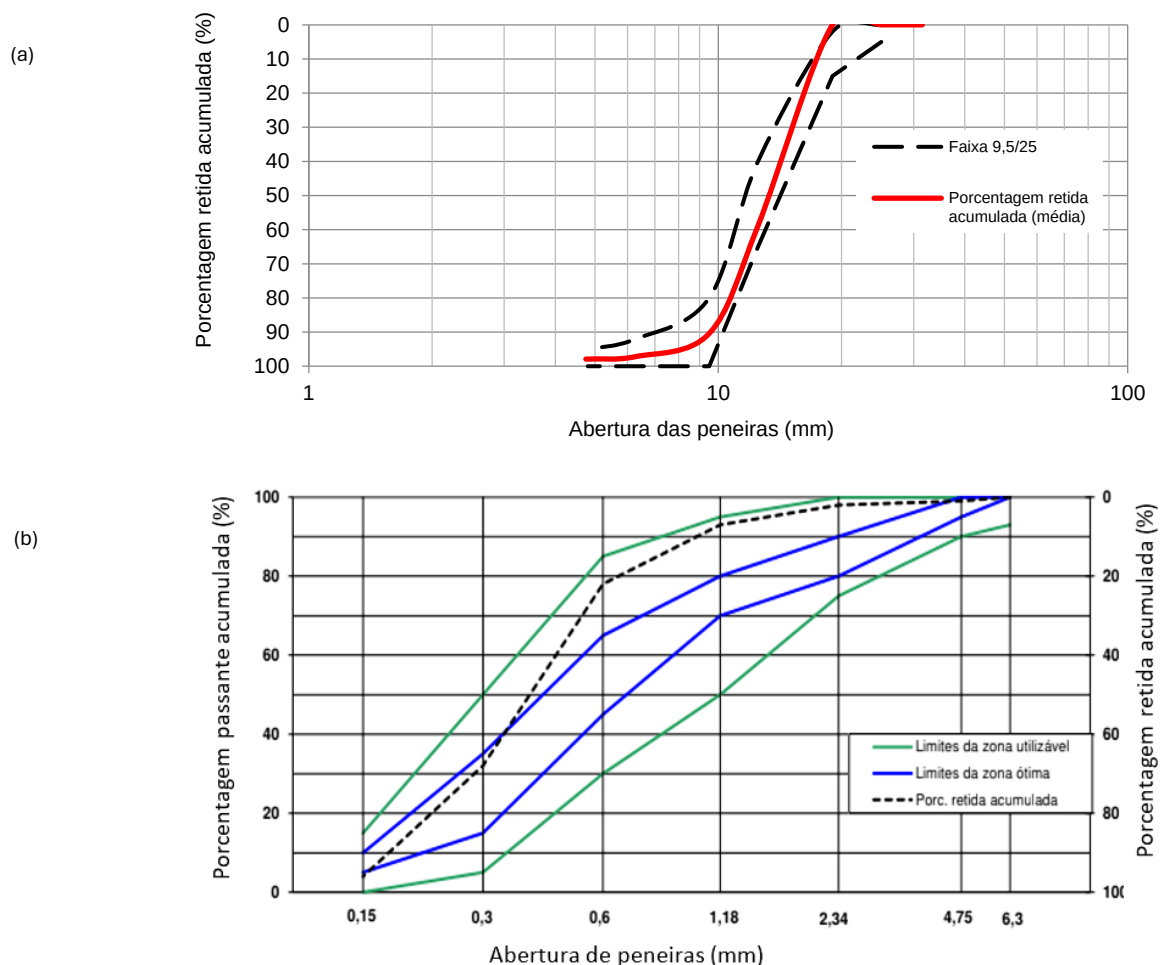
Tabela 2: Caracterização do agregado graúdo.

Propriedade analisada	Unidade	Metodologia e normativa brasileira utilizada	Resultado do ensaio
Massa unitária	g/cm ³	NBR 16972 (2021)	1,56
Dimensão máxima característica	mm	NBR 17054 (2022)	19,00
Módulo de finura	-	NBR 17054 (2022)	6,98
Absorção de água	%	NBR 16917 (2021)	0,50
Material pulverulento	%	NBR NM 16973 (2021)	1,81
Índice de forma	-	NBR 16972 (2021)	2,20

Tabela 3: Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade analisada	Unidade	Metodologia e normativa brasileira utilizada	Resultado do ensaio
Massa específica	g/m ³	NBR 16916 (2021)	2,62
Dimensão máxima característica	mm	NBR 17054 (2022)	2,34
Módulo de finura	-	NBR 17054 (2022)	1,96
Absorção de água	%	NBR 16917 (2021)	0,40
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	NBR 7218 (2010)	0,00

Figura 1: Distribuição granulométrica dos agregados utilizados: (a) gráudo e (b) miúdo (ABNT NBR 7211, 2022).



Foi utilizado um aditivo químico dispersante à base de poli carboxilatos RA 2 - redutor de água (super plastificante) (ABNT NBR 11768, 2019). As demais características físicas e químicas estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização do aditivo químico utilizado.

Propriedade	Unidade	Resultado do ensaio
Aparência	Visual	Líquido branco turvo
Densidade	g/cm ³	1,09
pH	-	5,89
Teor de sólidos	%	29,75
Viscosidade	cps	135

2.1 Concretos: Tipos, Mistura, Moldagem e Cura

Adotou-se a nomenclatura “REF” para as amostras de concreto sem adição mineral (referência) e “SA” para o concreto com sílica ativa. Todos os corpos de prova não tiveram armaduras de aço.

A Tabela 5 apresenta a composição dos concretos e suas propriedades medidas no estado fresco. A consistência dos concretos foi obtida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com NBR 16889 (ABNT, 2020) e, eles pertenceram à classe S100. A massa específica dos concretos também foi determinada.

Tabela 5: Proporções dos concretos estudados e suas características no estado fresco.

Concreto	Rel. a/l	Dosagem Unitária em massa (c: a: b)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Sílica Ativa * (%)	Aditivo ** (%)	Abatimento (mm)	pc *** (kg/m ³)
REF 0,40	0,40	1: 1,78: 2,10	504,02	0	0,60	155	2.300
REF 0,55	0,55	1: 2,57: 2,81	355,60	0	0,35	110	2.256
REF 0,70	0,70	1: 3,49: 3,67	287,60	0	0,40	135	2.244
SA 0,55	0,55	1: 2,57: 2,81	320,04	10**	0,30	110	2.219

* A sílica ativa substituiu o cimento no teor de 10% em massa.

** Percentual de substituição em relação ao cimento.

*** Massa específica concreto fresco

Foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) para os ensaios de caracterização dos concretos (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e para medidas de resistividade.

Em 1 dia de idade, os corpos de prova foram retirados dos moldes e a cura úmida até a idade de 70 dias se deu em sala climatizada com temperatura aproximada de 25°C e 95% de umidade

O ensaio de resistência à compressão foi realizado (ABNT NBR 5739, 2018) em três corpos de prova para cada tipo de concreto e idade (3, 7 e 28 dias). O ensaio de módulo de elasticidade também foi realizado em três corpos de prova na idade de 28 dias dos concretos (ABNT NBR 8522, 2021). Os resultados médios de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados de caracterização dos concretos estudados, quais sejam, resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias e módulo de elasticidade na idade de 28 dias.

Concretos	Compressão (MPa), desvio padrão (MPa) (entre parênteses) e coeficiente de variação (%) (entre colchetes)			Módulo de elasticidade (GPa), desvio padrão (GPa) (entre parênteses) e coeficiente de variação (%) (entre colchetes)
	Idade (dias)			
	3	7	28	28
REF 0,40	34,5 (3,7) [11]	37,8 (3,1) [8]	49,1 (4,47) [9]	35,6 (0,2) [4]
REF 0,55	19,5 (0,9) [5]	24,4 (0,8) [3]	34,5 (4,9) [14]	33,6 (0,1) [3]
REF 0,70	14,2 (0,9) [7]	17,0 (0,4) [3]	25,4 (2,8) [10]	30,7 (0,5) [2]
SA 0,55	16,1 (0,3) [2]	27,4 (4,5) [16]	33,3 (2,4) [7]	38,5 (0,6) [2]

Em geral, pode-se observar da Tabela 6 que todos os concretos estudados tiveram um crescimento contínuo de resistência de 3 para 28 dias. Em geral, as dispersões (desvio padrão e coeficiente de variação) dos valores de módulo de elasticidade e de resistência à compressão tiveram valores médios a baixos.

O concreto REF 0,70 apresentou os menores valores de resistência à compressão, seguido pelo REF 0,55 e SA 0,55 e REF 0,40, em ordem decrescente. Embora com resistências à compressão próximas e de mesma ordem de grandeza, o concreto REF 0,55 e SA 0,55 apresentam durabilidade e performance muito diferentes, sobretudo em termos de porosidade e de coeficientes de migração de cloretos. A sílica ativa retarda a entrada de cloretos, diminui os mecanismos de transporte de íons cloro e retarda a fase de início da corrosão (Oliveira; Cascudo, 2018). Também as magnitudes dos módulos de elasticidade são diferentes, isto é, REF 0,55 apresenta valor médio de 33,6 GPa e SA 0,55 de 38,5 GPa.

2.2 Métodos: Resistividade Elétrica Superficial Aparente, Resistividade Volumétrica, Absorção de Água, Permeabilidade ao Ar pelo Método “Torrent” e Microestrutura

Entre a idade de 1 a 76 dias de idade, os corpos de prova tiveram medidas de resistividade elétrica superficial aparente com sondas de 38 mm e 50 mm e de resistividade volumétrica realizadas. Neste período, não houve contaminação por íons cloreto e as medidas de Re foram tomadas imediatamente após a retirada dos corpos de prova da sala climatizada (25°C e 95% de umidade), isto é, na condição saturada dos concretos.

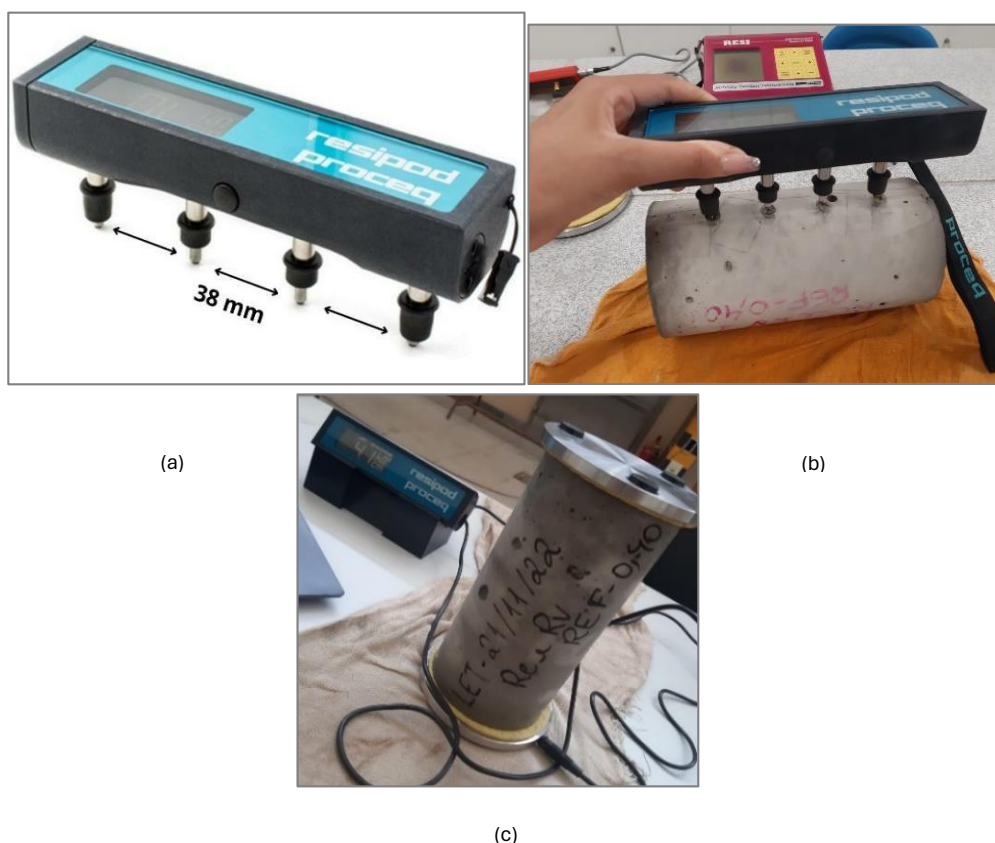
Após a idade de 76 dias, os corpos de prova de concreto permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de 122 dias. Após esta idade, eles foram submetidos a ciclos semanais com período de secagem (com duração de 5 dias cada ciclo) em câmara climatizada com temperatura de 40°C e período de umedecimento em solução contendo cloretos (NaCl). A solução com cloretos teve concentração de 5% em massa. Os corpos de prova ficaram com metade da sua altura (10 cm) submetidos à solução salina por 15 ciclos completos, o que correspondeu a 105 dias.

Ao mesmo tempo, para verificar a influência da condição de umidade dos corpos de prova de concreto na Re e Rv, a dessorção e a absorção de água foram propostas. Assim, a fase dessorção foi realizada em três corpos de prova para cada tipo de concreto. Dessa forma,

primeiramente os corpos de prova com 100% de umidade (saturados com água), armazenados em câmara úmida, foram dispostos em câmara de climatização (40°C) para secagem e lá permaneceram durante 10 dias. Realizou-se leituras de R_e com espaçamento de sondas de 38 mm e medição da massa em (g) diária em balança de precisão para obtenção da redução da umidade. Finalizada a fase de dessorção, os concretos voltaram à câmara úmida novamente para absorção de água e novas leituras foram tomadas com o acréscimo de umidade durante 15 dias. Registros de massa, de tempo e de resistividade foram realizados durante a redução e o aumento de umidade em todos os concretos. Esta fase foi realizada entre as idades de 300 e 325 dias dos concretos e não houve contaminação por cloretos.

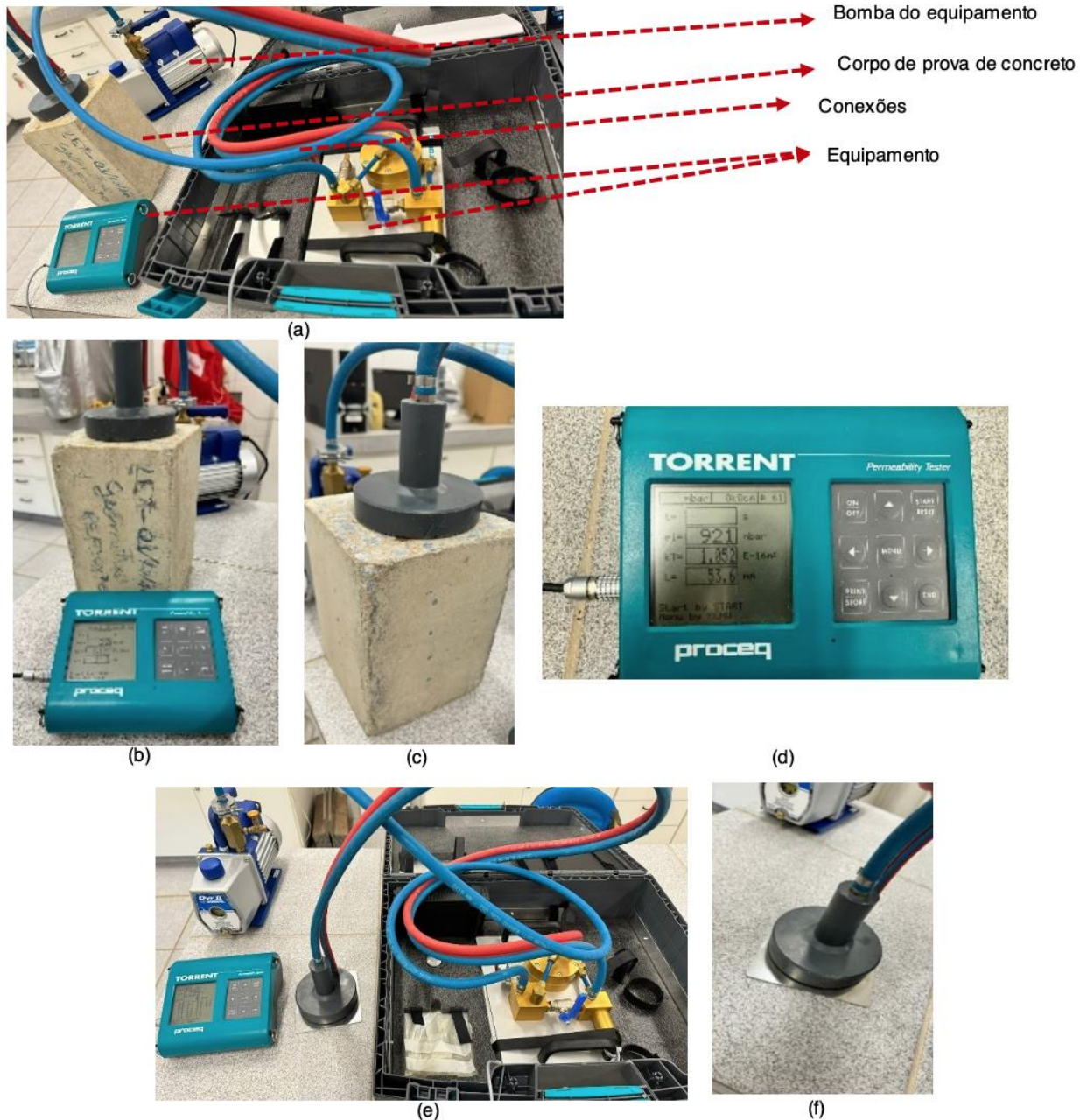
Para as leituras de resistividade elétrica superficial aparente, seguiram-se as recomendações da ASTM G57 (2020) com espaçamentos entre sondas de 38 mm (Figura 2a) e 50 mm. As sondas foram dispostas no centro da amostra, conforme indica Kessler *et al.* (2005), devido a inconstância de medição na envoltória do cilindro. O equipamento utilizado foi um RESIPOD do fabricante PROCEQ (Figura 2b). A resistividade volumétrica foi realizada (Figura 2c), conforme ABNT NBR 9204 (2012).

Figura 2: Equipamento utilizado na pesquisa: (a) RESIPOD do fabricante PROCEQ com espaçamento de sonda de 38 mm, (b) execução da medida de R_e e (c) R_v .



A absorção de água foi medida pelo método ABNT NBR 9778 (2009) em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm. Duas amostras para cada tipo de concreto foram utilizadas.

Figura 3: Ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar: (a) configuração experimental utilizada, (b) e (c) detalhes da configuração, (d) exemplo de leitura do coeficiente diretamente no visor do equipamento, (e) validação e calibração das leituras do equipamento em placa metálica “padrão” e (f) detalhe do contato placa metálica e equipamento.



O coeficiente de permeabilidade ao ar foi medido pelo método de Torrent (Torrent, 1992), a fim de mensurar a permeabilidade dos concretos. Este procedimento é normatizado na Suíça, segundo o procedimento SN 505 262/1-SIA 262/1 de 2013 (SN, 2013). Foi utilizado 1 corpo de prova para cada tipo de concreto e o resultado foi a média de várias determinações do coeficiente de permeabilidade ao ar, calculado e obtido pelo equipamento Torrent do fabricante PROCEQ. Foram utilizados corpos de prova

prismáticos com seção transversal de 15 x 15 cm e comprimento de 40 cm, sem a presença de armaduras. Eles foram testados na idade de 380 dias e em condições de umidade ao ar em ambiente de laboratório. Por ser um ensaio não destrutivo e de campo, a ideia foi simular condições de estruturas de concreto em campo. A Figura 3 exibe a configuração experimental utilizada em detalhes.

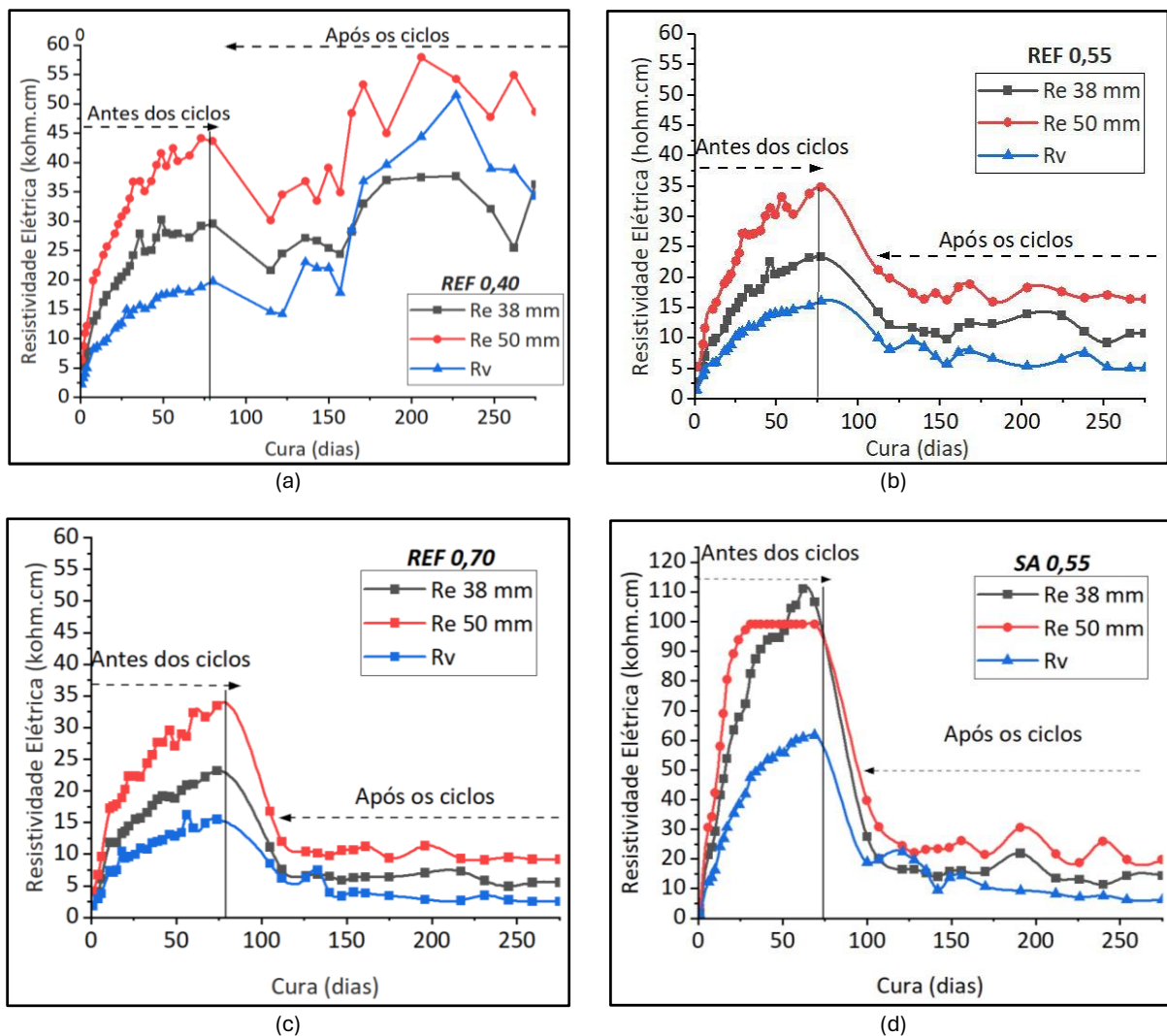
A microestrutura dos concretos estudados foi realizada por meio de um microscópio fabricante Jeol modelo JSM-6610 do laboratório LABMIC (High Resolution Microscopy Multiuser Laboratory). As amostras foram cortadas, secas e analisadas fraturadas com recobrimento de ouro.

3 Apresentação e Discussão Dos Resultados

3.1 Resultados Relacionados a Cloretos Versus Re E Rv

Os resultados médios de resistividade elétrica (Re e Rv) antes e após os ciclos de molhagem em solução contendo cloretos estão apresentados na Figura 4.

Figura 4: Valores de Re dos concretos estudados antes e após exposição aos cloretos: (a) REF 0,40 e (b) REF 0,55 (c) REF 0,70 e (d) SA 0,55.



Os resultados evidenciam claramente uma redução nos valores de R_e , independente da distância entre as sondas e também de R_v para os concretos estudados no início dos ciclos com cloretos. Isto demonstra a sensibilidade da técnica para uma percepção tecnologia rápida da presença de agente agressivo no interior do concreto, sobretudo de íons cloro (Cl^-) na solução intersticial dos poros do concreto. Além disso, R_v apresentou sempre valores inferiores aos de R_e para todos os concretos estudados, antes e após os ciclos com cloretos. Ademais, cabe destacar que as medições com a sonda de 50 mm apresentaram valores de R_e superiores aos valores de sonda com 38 mm durante todo o estudo.

A exceção do concreto SA 0,55, os demais concretos sem adições apresentaram valores próximos e de mesma ordem de grandeza de resistividade antes dos ciclos. Contudo, o concreto REF 0,70 apresentou maior sensibilidade na condição pós ciclos e isso pode ser explicado pela sua maior porosidade, permeabilidade e interconexão entre os poros que facilitam a entrada de íons cloro.

Diferentemente dos demais concretos, após certo período sob solução agressiva, o concreto REF 0,40 apresentou acréscimo nos valores de resistividade, inclusive valores superiores aos do início dos ciclos. A explicação para esse fenômeno pode ser a maior densificação da matriz hidratada que dificultou a entrada de cloretos, devido à baixa relação a/l , sobretudo em idades mais avançadas.

Observando a Figura 4, comparativamente, infere-se que R_e com espaçamento entre sondas de 50 mm apresentou valores resistivos mais altos, enquanto R_v apresentou valores menos resistivos, porém com resultados mais plenos por considerar o corpo de prova inteiro na análise e não apenas uma condição mais superficial da amostra.

A literatura (CEB 192, 1989 *apud* Cascudo, 1997) associa valores de resistividade elétrica superficial (R_e) com a probabilidade de corrosão. Os critérios são valores de:

- resistividade superiores a 20 $k\Omega.cm$ - probabilidade de corrosão desprezível;
- resistividade entre 10 a 20 $k\Omega.cm$ - probabilidade de corrosão baixa;
- resistividade entre 5 a 10 $k\Omega.cm$ - probabilidade de corrosão alta e
- resistividade inferiores a 5 $k\Omega.cm$ - probabilidade de corrosão muito alta.

Se considerarmos o critério de CEB 192 (1989) *apud* Cascudo (1997), observa-se que os valores de resistividade elétrica obtidos (com sondas de 38 mm ou 50 mm), após os ciclos de cloretos, para todos os concretos, exceto REF 0,40, se inseriu na faixa de baixa a alta probabilidade de corrosão. O concreto REF 0,40 manteve-se numa faixa de corrosão desprezível e o concreto SA 0,55 manteve-se em uma faixa de alta probabilidade de corrosão. Esse comportamento de incerteza e de incoerência para o concreto com sílica ativa também ocorreu para estudos de corrosão de armaduras induzida por cloretos, durante 44 ciclos de ciclos de molhagem em solução agressiva e secagem de Oliveira e Cascudo (2018). Após abertura dos corpos de prova, certificou-se de que não havia corrosão nas armaduras do concreto com sílica ativa do estudo deles.

De fato, a penetração da solução de NaCl em áreas de maior permeabilidade e em fissuras internas aumenta a condutividade efetiva do concreto (Robles; Gucunski; Kee, 2024). Isto também foi evidenciado no presente trabalho, com destaque para o concreto REF 0,70. Além disso, a R_e em condição com cloretos pode ser influenciada pela área de fissuras e sua profundidade, absorção de água e porosidade da matriz cimentícia.

Como resultado geral, os maiores valores de resistividade elétrica para concretos mais compactos também são mencionados na literatura. A justificativa é que a densidade e a compacidade do concreto aumentam, bem como sua resistência à compressão e resistência elétrica (Piro; Mohammed; Hamad, 2023). É o que ocorreu para o concreto SA0,55 estudado.

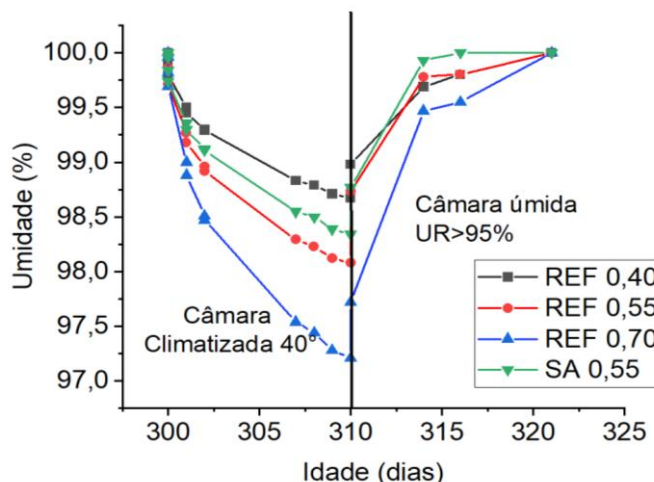
Sobre o espaçamento das sondas, considerando que os corpos de prova de concreto não tiveram armadura e que os agregados foram do mesmo tipo, origem e dimensão, a corrente elétrica pode fluir através do volume de concreto com profundidade aproximada igual ao intervalo do eletrodo (POLDER, 2001). Consequentemente, à medida que o intervalo de sondas aumenta, a corrente corre mais profundamente no volume de concreto e expressa maiores valores que menores espaçamentos de sonda. A área de contato eletrodo-concreto pode afetar o desempenho elétrico e, por isso, acredita-se que as medições de R_v sejam satisfatórias (Piro; Mohammed; Hamad, 2023).

3.2 Resultados Relacionados a Dessorção e Absorção de Água (Níveis de Umidade) Versus R_e e R_v .

3.2.1 Evolução da Umidade versus Tempo

A Figura 5 apresenta o comportamento médio de dessorção e de absorção de água de corpos de prova dos concretos estudados em função do tempo.

Figura 5: Evolução do comportamento médio de dessorção e de absorção de água dos corpos de prova dos concretos estudados em função do tempo.



Os concretos REF 0,70 e REF 0,55, comparativamente aos concretos REF 0,40 e SA 0,55, foram os concretos que apresentaram maior redução de umidade em sala de 40°C e foram os que rapidamente cresceram massa nas primeiras horas da nova absorção de água.

Mesmo após 10 dias a temperatura de 40°C, os corpos de prova de concreto reduziram sua umidade de 100% para no mínimo 97,25%. Isso expressa uma perda pequena de umidade interna. A nova absorção de água para saturação (100% de umidade), teve duração de 15 dias. Fez-se a escolha metodológica de manter a temperatura de 40°C, visto que esta temperatura é mais amena e não teria prejuízos aos produtos de hidratação dos concretos durante o processo de dessorção de água (Scrivener; Snellings; Lothenbach, 2016). No entanto, esta temperatura foi insuficiente para reduzir a umidade interna dos concretos para outros níveis de umidade, isto é, 70%, 50% e 30%. Novas curvas de

dessorção e de absorção de água com a temperatura de secagem de 100°C serão necessárias para reduzir os níveis de umidade para até 30% e correlacionar com valores de resistividade elétrica nos concretos estudados.

3.2.2 Influência da Umidade na Rv

A Figura 6 (a) a (h) exibe os dados de Rv cada tipo de concreto em função da dessorção e absorção de umidade. A Figura 7 ilustra um resumo dos máximos valores obtidos na fase de saturação e de menor umidade.

A resistividade adotada para este estudo foi a volumétrica, isto porque no ensaio de Rv, a corrente elétrica gerada pelo transdutor passa por todo o corpo de prova em análise. Assim, os valores obtidos referem-se não só a uma porção superficial do concreto como na Re, mas a todo o volume do corpo de prova analisado. Os valores de Re apresentaram valores muito elevados (da ordem de 700 km.cm) e, por isso, foram desconsiderados.

Em geral, para todos os concretos, pode-se observar que a resistividade indicou um comportamento inversamente proporcional a umidade. Isso significa que com a redução da umidade, os valores de resistividade aumentaram e vice-versa. A propriedade de resistividade elétrica foi muito sensível para indicar variações de umidade, mesmo que em baixos níveis, isto é, de 100% para 97%.

Entre os concretos de referência, o concreto REF 0,70 é o que mais reduziu seu nível de umidade (97,21%) durante os 15 dias do processo de secagem, devido a sua maior porosidade e também o menor valor de resistividade durante a saturação (23 Kohm.cm), seguido pelo concreto REF 0,55 (27 kohm.cm) e concreto REF 0,40 (32 kohm.cm). Esse menor valor de resistividade elétrica para o concreto REF 0,70 também expressa uma maior vulnerabilidade a entrada de agentes agressivos, sobretudo íons cloreto, devido a sua rede conectada de poros. De fato, concreto com maiores relações água/ligante e sem a presença de adições minerais apresentam maior probabilidade e taxas de corrosão de armaduras, maior entrada de umidade, sais e maiores coeficientes de migração de cloretos (Oliveira; Cascudo, 2018; Oliveira *et al.*, 2021; Lopes; Oliveira; Cascudo, 2023).

O concreto SA0,55 estudado, devido a sua menor ionização na solução porosa, até mesmo pelas reações pozolânicas e menor entrada de íons Cl⁻, apresentou os maiores valores de resistividade durante a dessorção (111 kohm.cm) e absorção (71 kohm.cm). Comparativamente ao concreto REF 0,55, o SA 0,55 apresentou valores bem superiores.

A susceptibilidade da Re a umidade e até da temperatura é conhecida da literatura. No entanto, pensou-se que está vulnerabilidade a umidade fosse de grandes variações nesta propriedade e não para menores variações, como apresentado. Piro, Mohamed e Hamad (2023) justificam este comportamento pela conexão elétrica, modificada pelos poros do concreto, pela condutância da solução e pelo nível de saturação do concreto. Além disso, a literatura também relata o uso da resistividade elétrica para estimativas de permeabilidade e de porosidade de concretos (Aragoncillo; Cleary; Lomboy, 2023; Robles; Gucunski; Kee, 2024) que tem relação com a umidade e com os diferentes tipos de concreto.

Os resultados da absorção de água estão apresentados na Tabela 7 e Figura 8.

Figura 6: Valores de Rv de concretos submetidos a dessorção e absorção de água (diferentes gradientes de umidade): (a) e (b) REF 0,40, (c) e (d) REF 0,55, (e) e (f) REF 0,70 e (g) e (h) SA 0,55.

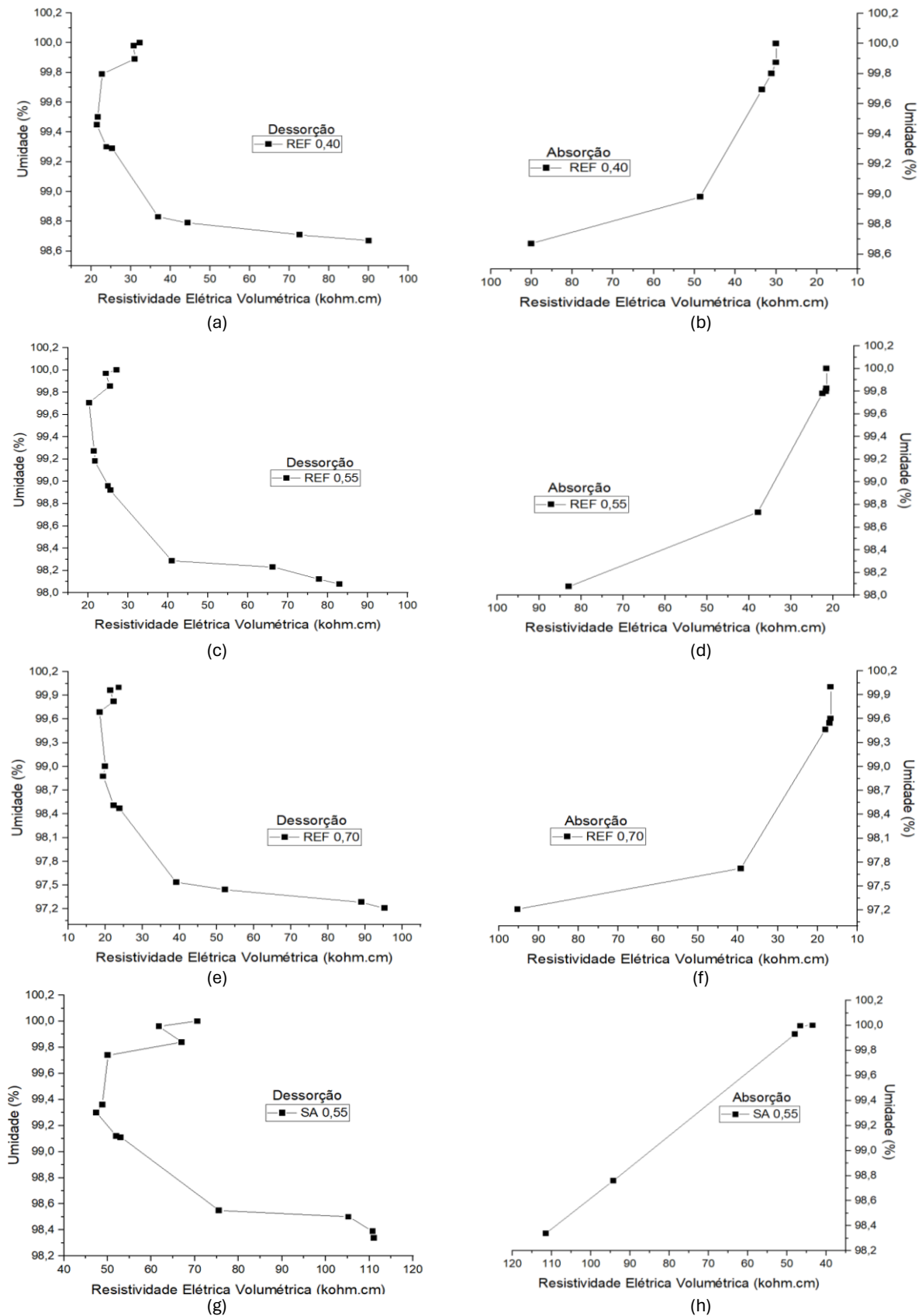


Figura 7: Condição inicial (100% de umidade) e final (após 15 dias de concretos expostos a câmara de climatização de 40°C).

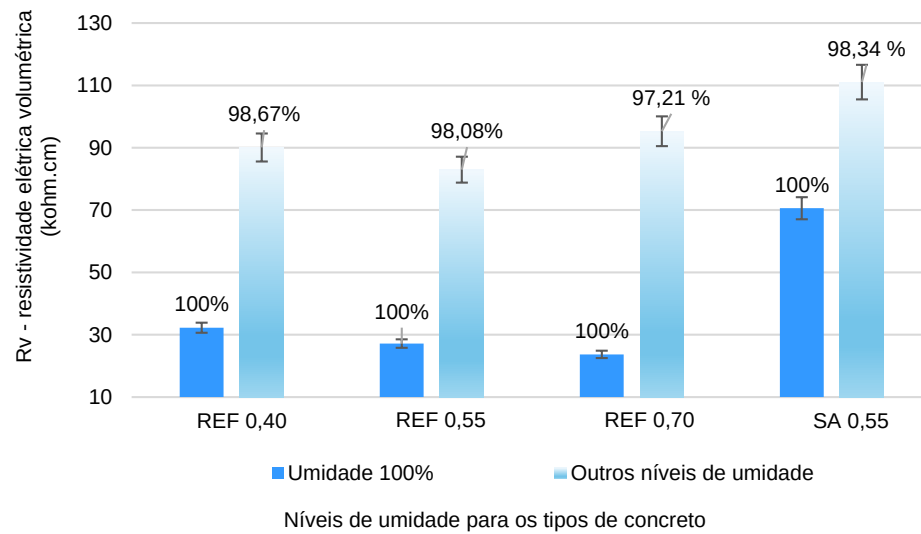
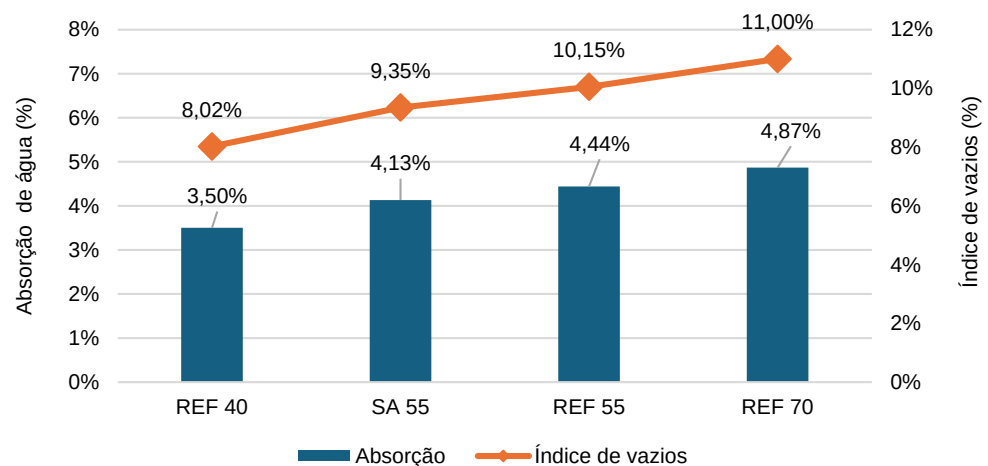


Figura 8: Resultados médios de absorção de água (%) e índice de vazios (%) (ABNT NBR 9778, 2009).



Os resultados obtidos de coeficiente de permeabilidade ao ar Torrent estão apresentados na Tabela 7. Estes resultados foram classificados, seguindo os critérios de Bjegović *et al.* (2016), os quais relacionam a qualidade do concreto com o coeficiente de permeabilidade:

- coeficientes de permeabilidade com valores inferiores a $0,01 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ indicam concretos com classe muito boa;
- coeficientes de permeabilidade com valores entre $0,01$ e $0,1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ indicam concretos com classe boa;
- coeficientes de permeabilidade com valores entre $0,1$ e $1,0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ indicam concretos com classe normal;
- coeficientes de permeabilidade com valores entre $1,0$ e $10,0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ indicam concretos com classe ruim e
- coeficientes de permeabilidade com valores superiores a $10,0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ indicam concretos com classe muito ruim.

Tabela 7: Resultados médios do ensaio de absorção de água (%), índice de vazios (%) e massa específica real (g/cm^3) (ABNT NBR 9778, 2009) e do coeficiente de permeabilidade ao ar (Torrent, 1992; SN 505 262/1-SIA 262/1, 2013).

Concretos	Absorção de água			Coeficiente de permeabilidade ao ar pelo método Torrent ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	Classificação dos concretos pelos critérios de Bjegović <i>et al.</i> (2016)
	Resultado médio de absorção de água (%), desvio padrão (entre parênteses e em %) e coeficiente de variação (entre colchetes e em %)	Índice de vazios (%), desvio padrão (entre parênteses e em %) e coeficiente de variação (entre colchetes e em %)	Massa específica real (g/cm^3), desvio padrão (entre parênteses e em g/cm^3) e coeficiente de variação (entre colchetes e em %)		
REF 0,40	3,50 (0,0) [1,3]	8,02 (0,1) [0,6]	2,49 (1,6) [0,7]	0,021	Classe boa
REF 0,55	4,44 (0,2) [4,8]	10,05 (0,4) [3,7]	2,52 (1,8) [0,7]	0,029	Classe boa
REF 0,70	4,87 (0,1) [1,6]	11,00 (0,2) [1,3]	2,54 (0,3) [0,1]	0,104	Classe normal
SA 0,55	4,13 (0,0) [1,1]	9,35 (0,0) [0,2]	2,50 (3,4) [1,4]	0,042	Classe boa

Os parâmetros de absorção de água obtidos indicaram baixa variabilidade nos resultados. Eles indicaram em ordem decrescente numérica e de desempenho, em termos de absorção de água (%), índice de vazios (%) e massa específica real: REF0,70, REF 0,55, SA 0,55 e REF 0,40.

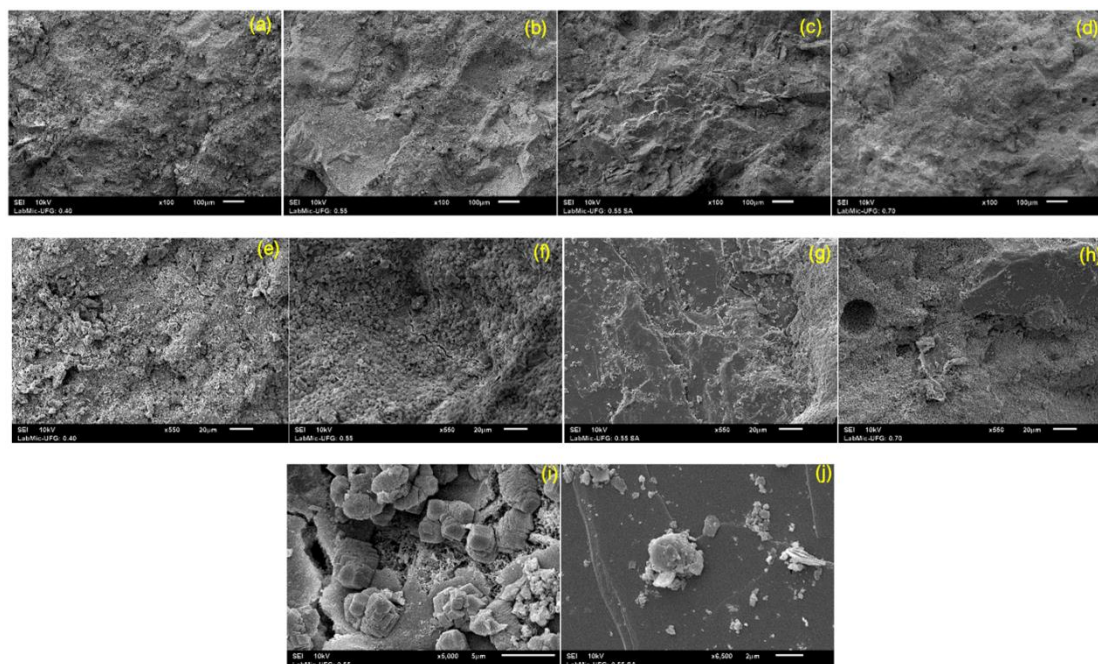
Em relação aos resultados do indicador de durabilidade, coeficiente de permeabilidade ao ar Torrent, podemos enumerar em ordem decrescente de desempenho dos concretos: REF 0,70, SA 0,55, REF 0,55 e REF 0,40. O concreto SA 0,55 apresentou um resultado inesperado, apresentando valor de coeficiente de permeabilidade ao ar maior que o concreto REF 0,55. Neste sentido, um maior número de amostras ensaiadas poderia conferir este comportamento. Ao mesmo tempo, a diferença entre o concreto 0,55 e REF 0,55 não foi tão ampla. Contudo, foi utilizada a adição de sílica ativa, uma adição de alta performance e no teor de 10% em substituição parcial ao cimento, em massa. Este teor é amplamente praticado nos estudos acadêmicos e em campo. Logo, era esperado que a incorporação desta adição resultasse em uma redução significativa na permeabilidade do concreto. Menciona-se que a resistência à compressão na idade de 28 dias para o concreto SA 0,55 não foi superior ou tão elevada em relação ao REF 0,55 (Tabela 6).

Medeiros (2023) também relatou um maior valor de valor de coeficiente de permeabilidade ao ar, pelo método *Cembureau*, para o concreto com sílica ativa ($1,93 \times 10^{-17} \text{ m}^2$), comparativamente ao concreto de referência ($1,47 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) na relação a/c (0,60). O autor menciona a necessidade de repetição dos ensaios com maior número de amostras para confirmar esta performance. Ele também estudou concretos com e sem adição de sílica ativa nas relações água/ligante de 0,45 e 0,75. Os resultados estatísticos do estudo completo indicaram que a variável adição mineral não foi significativa a um intervalo de confiança de 0,95%. No entanto, pelo agrupamento de médias e em termos da variável adição mineral pelo método de Games-Howell, os valores de coeficiente de permeabilidade para os concretos de referência $3,281 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ e concretos com sílica ativa $2,663 \times 10^{-17} \text{ m}^2$.

No que tange a classificação dos concretos pelos critérios de Bjegović *et al.* (2016), todos os concretos classificaram-se como de “classe boa”. Este critério não pode validar as diferenças físicas e microestruturais entre os concretos estudados.

A Figura 9 apresenta imagens obtidas por microestrutura eletrônica de varredura dos concretos estudados. Micrografias do concreto REF 0,40 (Figura 9ae), REF 0,55 (Figura 9bf) e REF 0,70 (Figura 9dh) são mostradas em comparação ao SA 0,55 (Figura 9cgj).

Figura 9: Imagens de MEV dos concretos estudados: ampliação de 100 vezes (a) REF 0,40, (b) REF 0,55, (c) SA 0,55 e (d) REF 0,70; ampliação de 550 vezes (e) REF 0,40, (f) REF 0,55, (g) SA 0,55 e (h) REF 0,70 e detalhes de microestrutura dos concretos (i) ampliação de 5000 vezes REF 0,55 e (j) ampliação de 6500 vezes SA 0,55.



Em geral, a Figura 9 apresenta comparativamente uma estrutura de matriz cimentícia hidratada mais densa e mais compacta para os concretos de menor relação água/ligante (REF 0,40) e com sílica ativa (SA 0,55). Diferenças na compactidade entre as amostras em questão são claramente observadas. O REF 0,70 apresenta mais poros, vazios e uma matriz mais heterogênea, além de zona de transição agregado-matriz mais claramente definida.

No que se refere a diferenças no sistema com sílica ativa (Figura 9cgj), comparativamente ao sistema referência na mesma relação água/ligante (REF0,55), é evidente a sua contribuição reduzindo muitas heterogeneidades na matriz, nas zonas de transição pasta-agregado nos produtos hidratados. Houve também uma compactação na matriz que não se refletiu na resistência à compressão na idade de 28 dias. Talvez em idades avançadas possa ter um acréscimo nesta resistência mecânica. Resultados de vários autores têm confirmado que concretos com sílica ativa apresentam refinamento dos poros, com os seguintes benefícios para a pasta cimentícia: redução da porosidade total, da interconexão de poros e aumento da tortuosidade dos poros (Jin; Jiang; Zhu, 2017; Andrade; Buják, 2013; Ollivier; Vichot, 2014). De toda forma, este melhor desempenho do concreto SA 0,55 é devido não apenas a mudanças físicas na pasta de cimento e melhorias na zona de transição pasta-agregado, como também mudanças químicas na solução de poros (Santos, 2023; Pires, 2016; Mcpolin et al., 2007; Mcpolin; Basheer e Long,

2009), dentre elas de força iônica e condutividade do eletrólito. Isto resulta em valores de resistividade elétrica mais elevados para o concreto com adição mineral. Destaca-se que a resistividade é um parâmetro muito importante para caracterizar a durabilidade potencial dos concretos, especialmente para estruturas sujeitas ao ataque de íons, como no caso de cloretos em atmosferas marinhas. A dificuldade do transporte de cloretos em meios mais resistentes é maior.

4 Correlações e Discussão Geral

As Figuras 10 a 12 apresentam a relação entre as propriedades de R_e e R_v antes dos ciclos com cloretos para cada tipo de concreto e as Figuras 13 a 15 após os ciclos.

Figura 10: Correlação entre R_e (sonda 38 mm) e R_v para os concretos estudados antes dos ciclos com cloretos.

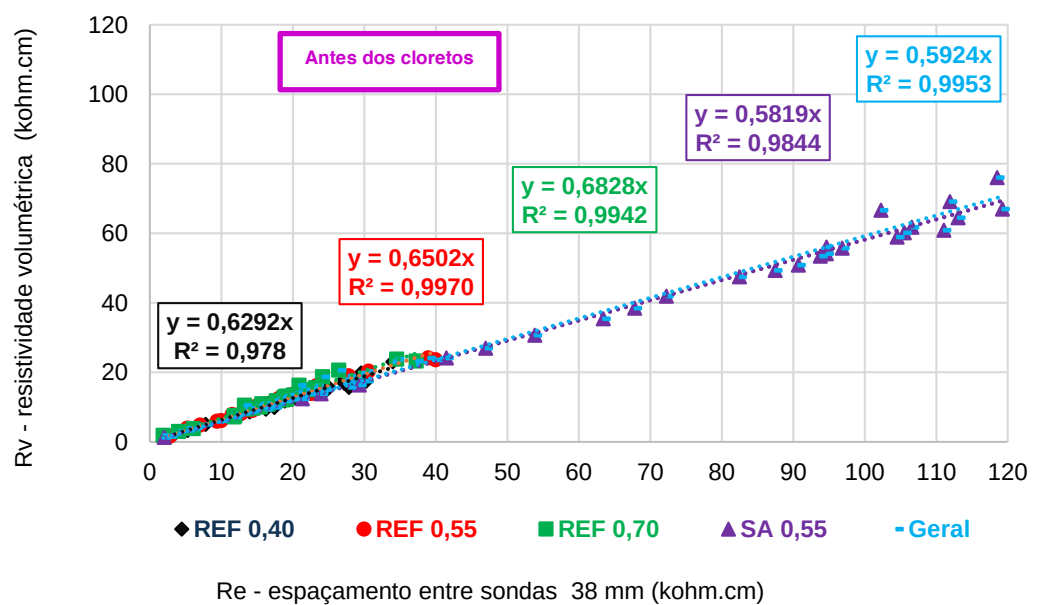


Figura 11: Correlação entre R_e (sonda 50 mm) e R_v para os concretos estudados antes dos ciclos com cloretos.

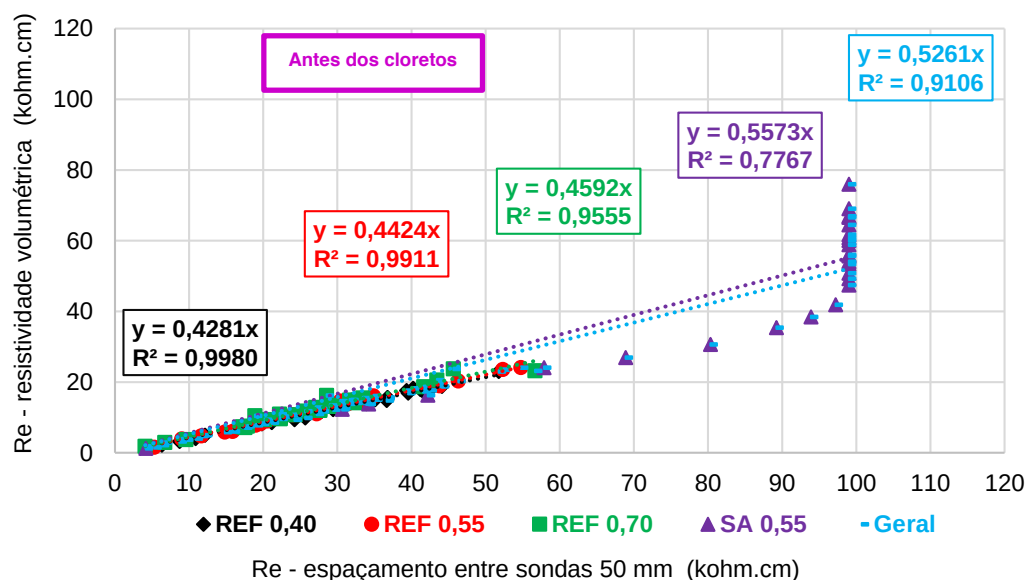


Figura 12: Correlação entre R_e (sonda 38 mm) e R_e (sonda 50 mm) para os concretos estudados antes dos ciclos de cloretos.

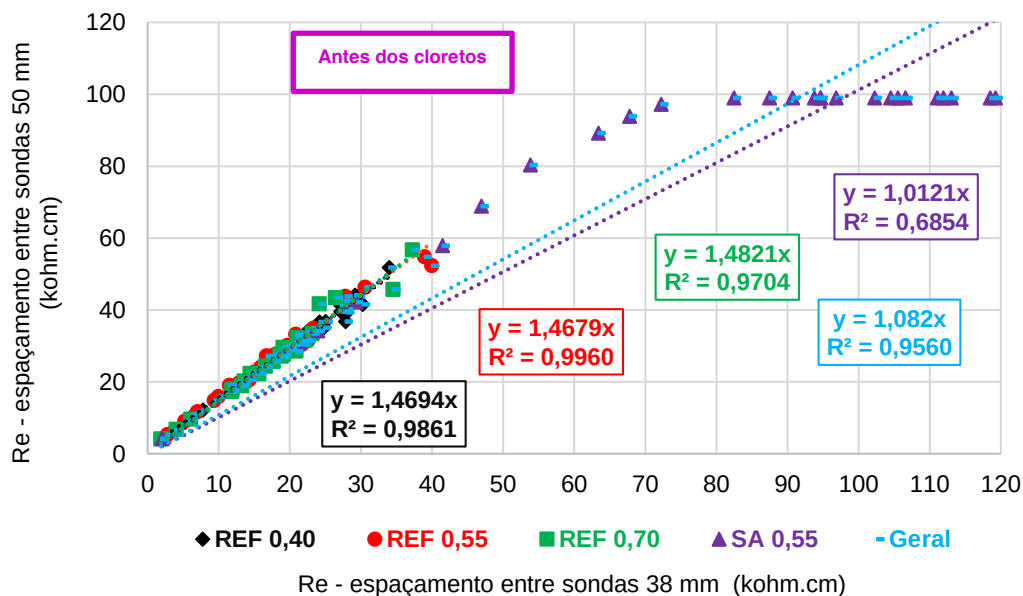


Figura 13: Correlação entre R_e (sonda 38 mm) e R_v para os concretos estudados após ciclos de cloretos.

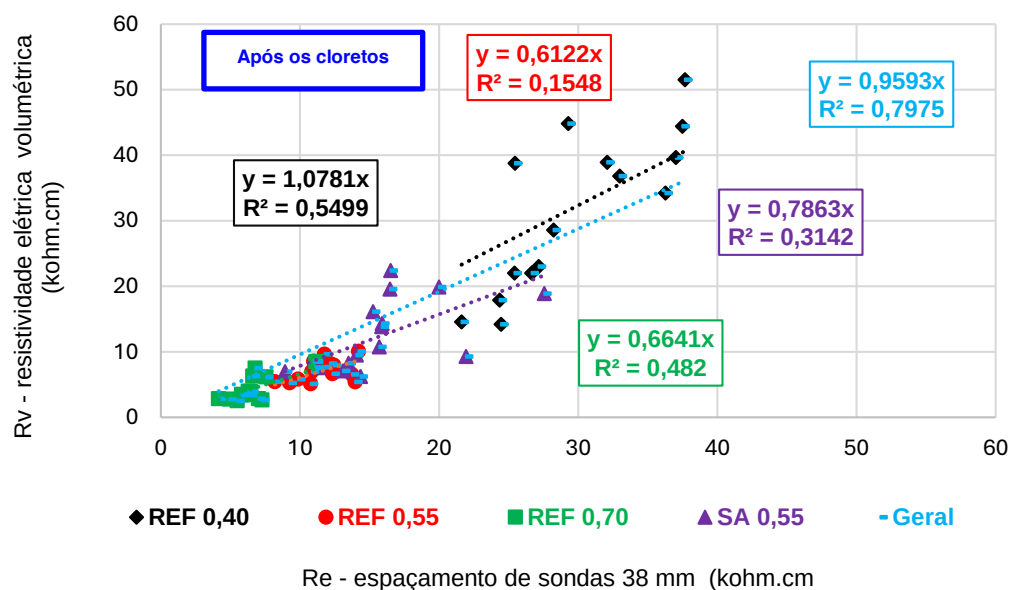


Figura 14: Correlação entre R_v (sonda 50 mm) e R_v para os concretos estudados após os ciclos com cloretos.

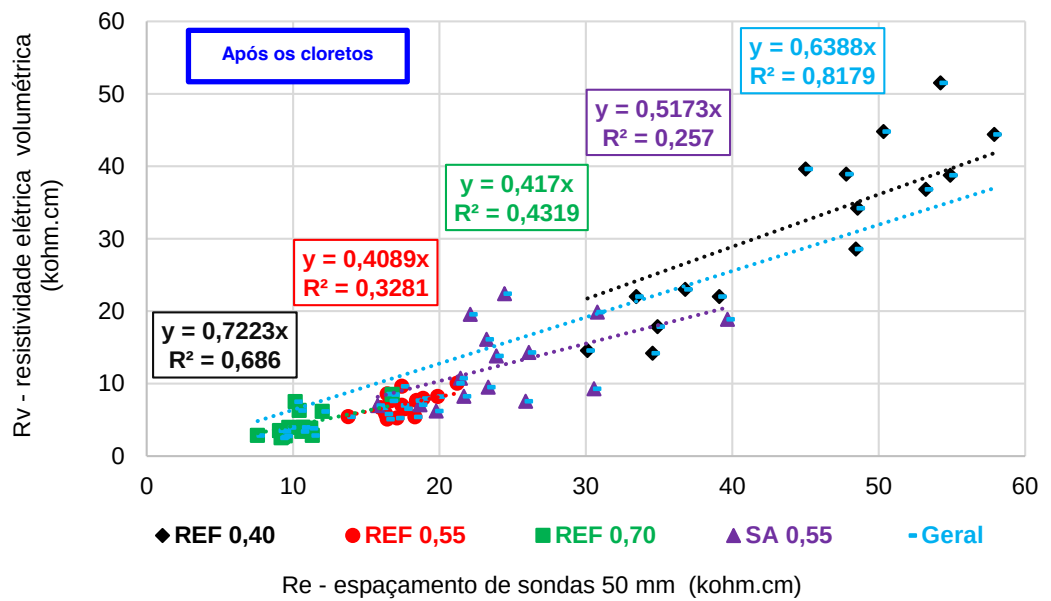
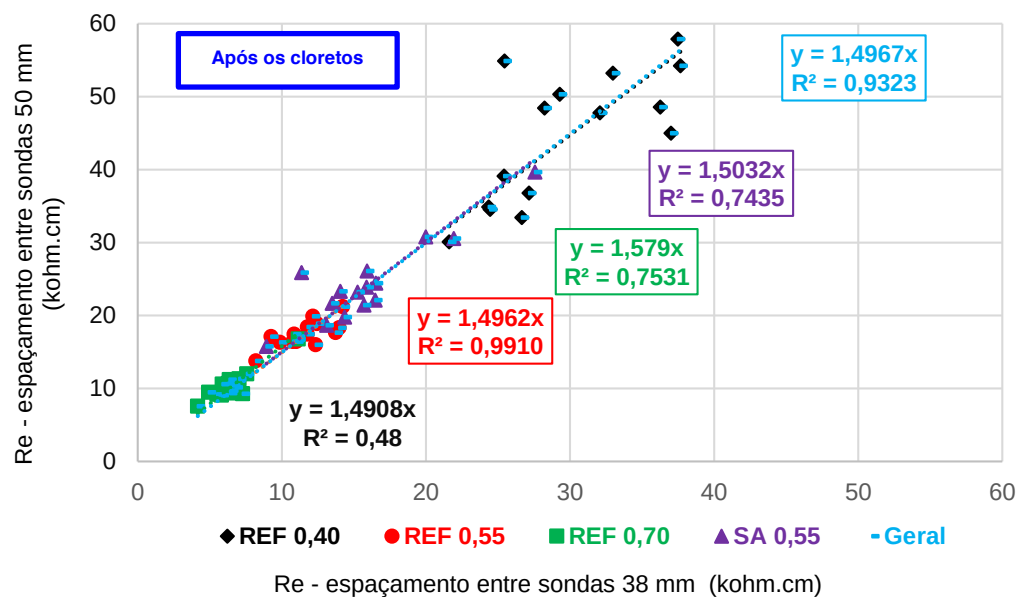


Figura 15: Correlação entre R_e (sonda 38 mm) e R_e (sonda 50 mm) para os concretos estudados após os ciclos de cloretos.



Em geral, percebe-se que a técnica de resistividade foi sensível a presença de íons cloro e a diferença entre os concretos em vários sentidos (de resistência à compressão, composição e porosidade). Isso expressa que a técnica de resistividade pode ser utilizada na especificação e controle de qualidade de concretos. Não somente isso, mas ela também pode ser utilizada para avaliação da durabilidade e desempenho de concretos, incluindo inspeções em campo. Este resultado também expressa que a resistividade é

uma técnica que pode ser muito bem aproveitada no campo preventivo e no campo de diagnóstico inicial e de manutenção de estruturas de concreto, bem como no seu monitoramento frequente. Esta técnica pode compor um plano eficiente de inspeção de estruturas de concreto em uma visão estratégica, técnica e tecnológica com respostas imediatas, confiáveis e sem complexidade.

Percebe-se em geral boas correlações entre os valores de R_e e R_v antes e após os ciclos contendo cloretos para todos os concretos estudados. Nota-se também que a presença dos cloretos altera ligeiramente a relação dos valores de resistividade entre os concretos e o grau de correlações (R^2). Isso ocorre devido as alterações na solução dos poros do concreto pela presença e difusão dos íons cloro.

Como mencionado, o espaçamento entre as sondas nos concretos estudados interferiu nos resultados, tendendo a aumentar os valores de R_e , à medida que a distância entre sondas aumentou. Porém, na prática, sabe-se que as inspeções são realizadas com equipamentos considerando um único espaçamento de sondas, isto é, esse espaçamento não é uma variável e os resultados são comparativos entre si. Piro, Mohammed e Hamad (2023) considerando essas interveniências, inclusive de área de contato eletrodo-concreto sugerem o uso de R_v na medida do possível.

A literatura menciona variações de até 6% em leituras de R_e quando o diâmetro de contato do eletrodo varia de 1 mm a 40 mm (Millard; Wenner, 1991). Estes autores mencionam que o uso de uma frequência muito baixa e corrente alternada ajuda a reduzir leituras enganosas. Na prática, a área de contato do eletrodo torna-se crucial para exercer correntes externas e medir potenciais internos. Foi demonstrado que a resistência de contato entre os eletrodos e uma superfície de concreto pode aumentar significativamente a resistividade elétrica (Azarsa; Gupta, 2017). A resistência de contato pode afetar a simetria do sistema e o desempenho da sonda (Millard; Wenner, 1991). A abordagem das sondas de Wenner na R_e é menos sensível a contato do eletrodo do que o método uniaxial (R_v), como resultado, medições podem ser executadas em uma faixa de frequência mais abrangente (10 Hz a 10 kHz) (Layssi, 2015).

Independentemente do método R_e ou R_v e do espaçamento de sondas, o interessante é também ter um histórico de medidas para ajudar na avaliação e no completo diagnóstico da condição de determinada estrutura de concreto e concreto.

A Tabela 8 sintetiza as relações lineares de R_e e R_v e também de coeficiente de determinação (R^2) para concretos estudados.

A Figura 16 apresenta a correlação entre umidade relativa (UR) e a resistividade volumétrica de concretos nas idades acima de 300 dias no processo de secagem (dessorção) e a Figura 17 no processo de absorção de água. Os dados referentes a R_e apresentaram valores muito elevados durante o processo de secagem (da ordem de 700 km.cm) e eles não pareceram ser condizentes e, por isso, optou-se pela correlação com a R_v

Tabela 8: Síntese das relações lineares individuais e gerais de Re e Rv para os concretos estudados antes e após exposição a ciclos com cloretos.

Re - espaçamento entre ondas	Tipo de concreto	Antes dos ciclos com cloretos		Após dos ciclos com cloretos	
		Rv	Re 50 mm	Rv	Re 50 mm
Re 38 mm	REF 0,40	$y = 0,6292x$ $R^2 = 0,9969$	$y = 1,4694x$ $R^2 = 0,9983$	$y = 1,0781x$ $R^2 = 0,9468$	$y = 1,4908x$ $R^2 = 0,9808$
	REF 0,55	$y = 0,6502x$ $R^2 = 0,9970$	$y = 1,4679x$ $R^2 = 0,9960$	$y = 0,6122x$ $R^2 = 0,9628$	$y = 1,4962x$ $R^2 = 0,9910$
	REF 0,70	$y = 0,6828x$ $R^2 = 0,9942$	$y = 1,4821x$ $R^2 = 0,9952$	$y = 0,6641x$ $R^2 = 0,9192$	$y = 1,579x$ $R^2 = 0,9913$
	SA 0,55	$y = 0,5819x$ $R^2 = 0,9976$	$y = 1,0121x$ $R^2 = 0,9715$	$y = 0,7863x$ $R^2 = 0,8977$	$y = 1,5032x$ $R^2 = 0,9873$
	Geral	$y = 0,5924x$ $R^2 = 0,9953$	$y = 1,082x$ $R^2 = 0,9560$	$y = 0,9593x$ $R^2 = 0,9103$	$y = 1,4967x$ $R^2 = 0,9834$
Re 50 mm	REF 0,40	$y = 0,4281x$ $R^2 = 0,9980$	-	$y = 0,7223x$ $R^2 = 0,9629$	-
	REF 0,55	$y = 0,4424x$ $R^2 = 0,9985$	-	$y = 0,4089x$ $R^2 = 0,9704$	-
	REF 0,70	$y = 0,4592x$ $R^2 = 0,9925$	-	$y = 0,417x$ $R^2 = 0,9114$	-
	SA 0,55	$y = 0,5573x$ $R^2 = 0,9651$	-	$y = 0,5173x$ $R^2 = 0,8892$	-
	Geral	$y = 0,5261x$ $R^2 = 0,9615$	-	$y = 0,6388x$ $R^2 = 0,9193$	-

Figura 16: Correlação entre umidade relativa (UR) e Rv para os concretos estudados nas idades de 322 a 333 dias submetidos a câmara climatizada à temperatura de 40°C, durante o processo de secagem e dessorção de água.

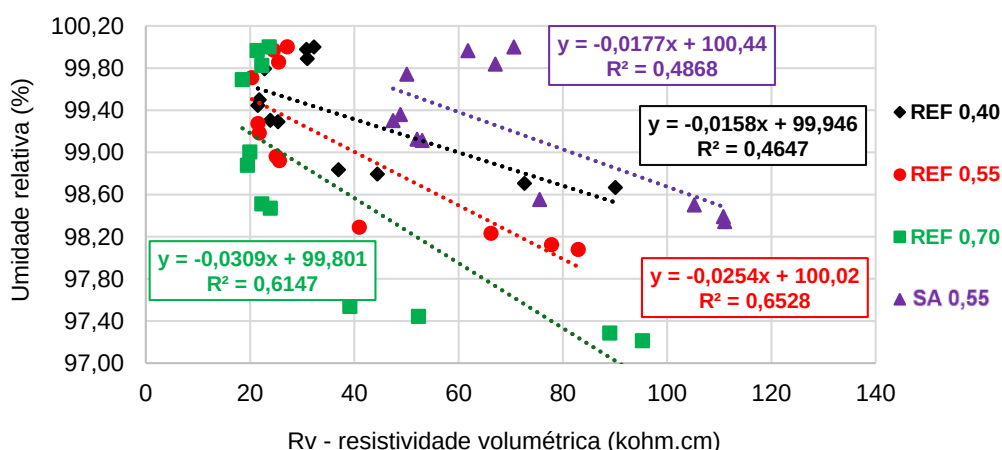
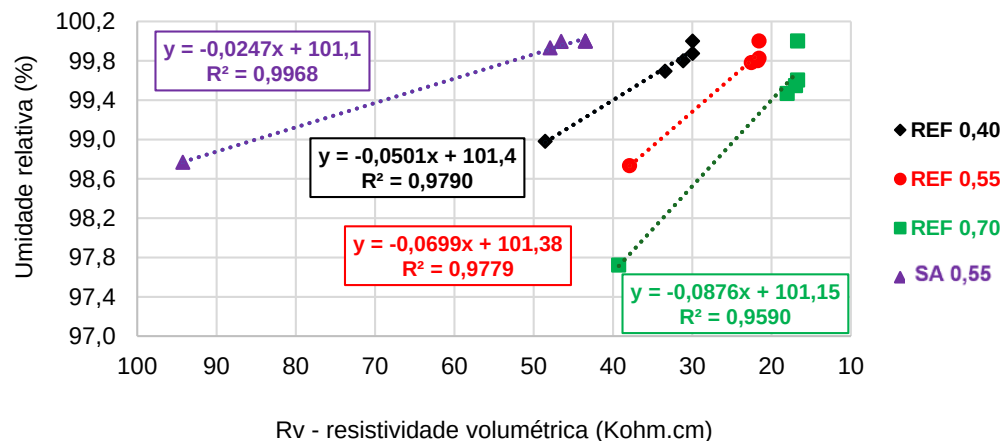


Figura 17: Correlação entre umidade relativa (UR) e Rv para concretos estudados nas idades de 333 a 344 dias submetidos a câmara úmida.



Percebe-se das Figuras 16 e 17 que a resistividade é realmente muito influenciada e sensível pelo teor de umidade interna no concreto. A redução da umidade, ainda que em baixo nível (de 100% para até 97%), alterou muito os valores de Rv, reduzindo esses valores independentemente do tipo de concreto. Isso resultou em correlações individuais (R^2) menores que 0,6528. Isso também expressa que não houve uma tendência clara e uma espécie de “desordem” no comportamento entre Rv com a redução de umidade nos corpos de prova.

Por outro lado, com o acréscimo de umidade (100%), a técnica volta a ter uma tendência mais bem “comportada” para cada tipo de concreto com R^2 acima de 0,9590. Contudo, isso foi possível conhecendo-se o teor de umidade dos concretos, seu histórico e resistência à compressão.

O teor de umidade é um dos elementos que pode ter efeito adverso nas leituras de resistividade elétrica do concreto. Devido a uma variação na mobilidade iônica, a condutividade elétrica aumenta com o acréscimo de umidade da amostra. Porém, pode haver diferenças na resistividade elétrica entre amostras saturadas e submersas com água ou água com cal e aquelas com alta umidade, ressalta Larsen *et al.* (2006). Eles mencionaram resultados de aumento de resistividade por um fator de dois, quando o nível de umidade reduz de 88% para 77% e de aumento por um fator de seis, quando a resistividade reduz de 88% para 66%.

No estado seco ao ar, o valor de resistividade do concreto pode ser aproximadamente 50% maior do que no estado saturado (Sengu, 2014). Foi justificado que a corrente elétrica no concreto é transportada por íons se movendo através da solução de poros e um maior teor de umidade facilita o fluxo elétrico e reduz a resistência elétrica. No entanto, para valores de resistividade baixos, o efeito do teor de umidade na precisão das medições de resistividade é diminuído (Smith *et al.*, 2004).

Para fins de controle de qualidade, é vital garantir que o mesmo teor de umidade esteja presente em diversas misturas de concreto e que medições de resistividade de corpos de prova com baixo teor de umidade pode ser inadequado (Chen; Chang; Yeih, 2014).

Pesquisas experimentais evidenciaram que mais de 30% de resultados de resistividade podem ter má interpretação devido a saturação superficial insuficiente do concreto, usando lagoas estáticas e água pressurizada em comparação com a saturação total do

laboratório (Sanchez Marquez, 2015). Estes autores salientaram que é necessário estudos adicionais para modelar a saturação *in loco* de estruturas de concreto por várias tecnologias e determinar o tempo necessário para a água permear a superfície do concreto e atingir um nível de umidade constante em toda a amostragem a ser ensaiada. Em relação a condição de umidade do concreto durante as leituras de resistividade do concreto, é consenso a importância da tentativa de manter o concreto o mais saturado possível, contudo há limitações na prática.

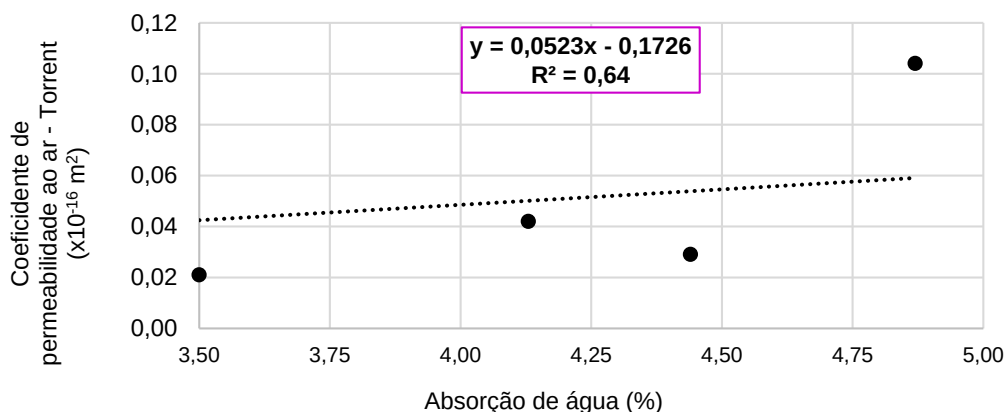
De todo modo, o histórico e o contexto da estrutura em concreto armado, bem como o uso de outras técnicas de inspeção em conjunto, podem ajudar em um diagnóstico mais completo e assertivo e minimizar problemas de variações e incertezas de medição quanto a resistividade em campo. A medida da condição de umidade superficial do concreto durante as leituras de resistividade talvez possa ajudar na correlação e interpretação de dados de resistividade. De qualquer forma, os presentes autores e Robles, Gucunski e Kee (2024) propõem cautela nas conclusões de resultados de resistividades aplicadas a estruturas de concreto em condições secas e com umidades muito variadas.

De toda maneira, sabe-se que a adição de sílica ativa alterou a microestrutura da matriz cimentícia hidratada, como porosidade total e distribuição de poros. Isto interfere nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos, como mencionado anteriormente. Alterações químicas na matriz também são registradas com a inclusão desses materiais cimentícios suplementares (Santos, 2023). Eles alteram íons na solução porosa do concreto, alcalinidade, pH, condutividade e força iônica, além de densificar a matriz hidratada. Além disso, cabe destacar que esses materiais podem ser resíduos de origem industrial e isso concebe uma ação ecológica importante.

É de conhecimento que a região do cobrimento do concreto e seu interior podem apresentar diferenças de homogeneidade. Neste sentido, a presente pesquisa não apresentou estudo desta variável, porém apresentou valor de coeficiente de determinação geral de 0,9560 e individuais entre 0,9715 e 0,9983 entre a resistividade elétrica superficial aparente com espaçamentos entre sondas de 50 mm e 38 mm. No entanto, os valores de R_e , medidos com espaçamento entre sondas de 50 mm foram sempre superiores aos valores medidos com espaçamento entre sondas de 38 mm e resistividade volumétrica. Após os ciclos de cloretos, os valores de coeficiente de determinação geral foi de 0,9834 e individuais de m entre 0,9808 e 0,9913 entre a R_e com espaçamentos entre sondas de 50 mm e 38 mm. De fato, a presença de cloretos na parte do cobrimento reduz ligeiramente os valores de R_e e altera em partes a correlação entre as medidas de R_e nos diferentes espaços entre sondas. A presença dos cloretos diminuiu as disparidades entre os valores de R_e , medidos com espaçamentos diferentes entre sondas e a resistividade volumétrica.

A Figura 18 apresenta a relação entre o coeficiente de permeabilidade ao ar, pelo método Torrent, e a absorção de água, pelo método ABNT NBR 9778 (2009).

Figura 18: Relação entre o coeficiente de permeabilidade ao ar (pelo método Torrent) a absorção de água (%) (ABNT NBR 9778, 2009).



A Figura 18 apresenta um coeficiente de determinação de 0,64, que é considerado baixo entre os dois métodos. De fato, os dois métodos possuem princípios e metodologias muito distintas, o que justifica o resultado obtido.

Por fim, a Tabela 9 sumariza os valores de coeficiente de determinação (no geral), obtidos entre Re e Rv, para os concretos estudados. Para fins visuais, convencionou-se valores de coeficiente de determinação (R^2) muito forte entre 0,9700 e 1,000 (células em cor verde escuro), determinação forte entre 0,9500 e 0,9700 (células em cor verde), determinações médias entre 0,9000 e 0,9500 (células em cor verde claro). A presença dos cloretos reduz a relação de Re (38 mm ou 50 mm) com Rv e aumenta de 38 mm para 50 mm.

Tabela 9: Resumo dos resultados das correlações gerais, obtidas entre as propriedades avaliadas para os concretos estudados.

Propriedade avaliada	Antes dos ciclos com cloretos		Após dos ciclos com cloretos	
	Rv	Re 50 mm	Rv	Re 50 mm
Re 38 mm	0,9953	0,9650	0,9103	0,9834
Re 50 mm	0,9615	-	0,9193	-

5 Conclusões

Após analisar o efeito de cloretos e da variação da umidade interna de concretos na Re (método de Wenner - 4 pontos com diferentes espaçamentos de sondas de 38 mm e 50 mm), Rv e na relação entre elas em concretos sem adições minerais e com adição mineral de sílica ativa, conclui-se que:

- maiores valores de resistividade foram obtidos para concretos com menores relações a/l e com adições minerais antes e após os ciclos com solução contendo cloretos;
- já nos primeiros contatos com a solução agressiva, os concretos apresentaram interferência nos valores de Re e Rv;
- o concreto REF 0,70, mais poroso, apresentou maior sensibilidade e redução de valores de resistividade em geral na condição pós ciclos com cloretos;
- o concreto menos poroso, REF 0,40, apresentou acréscimo nos valores de resistividade, inclusive valores superiores aos do início dos ciclos. A explicação para

esse fenômeno pode ser alta densificação da matriz hidratada que dificultou a entrada de cloretos, devido à baixa relação água/ligante, sobretudo em idades mais avançadas.

- a técnica de Re com espaçamento entre sondas de 50 mm apresentou valores mais elevados do que Re com espaçamento entre sondas de 38 mm e Rv;
- foram obtidas altas correlações lineares entre Re 38 mm e 50 mm com coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,9983; 0,9960; 0,9952; 0,9715 e geral de 0,9560 para os concretos REF 0,40, 0,55, 0,70 e SA 0,55, respectivamente, antes dos ciclos com cloretos. Após os ciclos, R2 apresentou valores de 0,9808; 0,9910; 0,9913; 0,9873 e geral de 0,99834 para os concretos REF 0,40, 0,55, 0,70 e SA 0,55, respectivamente.
- ao mesmo tempo, valores de coeficiente de determinação (R^2) de 0,4647; 0,6528; 0,6147 e 0,4868 foram obtidos no processo de dessorção e de 0,9790; 0,9779; 0,9590 e 0,9968 para reabsorção de água para os correspondentes concretos REF 0,40, 0,55, 0,70 e SA 0,55;
- Rv apresentou os menores valores por considerar o corpo de prova “inteiro” na análise e não apenas uma condição superficial da amostra;
- em relação a umidade, a resistividade indicou um comportamento inversamente proporcional a umidade. Isso significa que com a redução da umidade, os valores de resistividade aumentaram e vice versa;
- a propriedade de resistividade foi muito sensível para indicar variações de umidade, mesmo que em baixos níveis, isto é, de 100% para 97% de umidade;
- foram obtidas altas correlações entre Rv e Re com sondas de 38 mm e 50 mm (R^2 acima de 0,9560);
- o concreto com adição de sílica ativa, devido a sua menor ionização na solução porosa no concreto, até mesmo pelas reações pozolânicas e menor entrada de íons Cl^- , apresentou os maiores valores de resistividade durante a dessorção (111 kohm.cm) e absorção (71 kohm.cm) entre os concretos estudados. Comparativamente ao concreto REF 0,55, o concreto SA 0,55, apresentou valores bem superiores de resistividade;
- a presença dos cloretos altera levemente os valores de resistividade e alteram também o grau de determinação (R^2) entre elas. Isso ocorre devido as alterações na solução dos poros do concreto pela presença e difusão dos íons cloro e
- por fim, em geral, percebe-se que a técnica de resistividade foi sensível a presença de íons cloro e a diferença entre os concretos em vários sentidos (de resistência à compressão, composição, porosidade e umidade). Isso expressa que a técnica de resistividade pode ser utilizada na especificação e controle de qualidade de concretos, cujo histórico de variação de umidade, parâmetros de resistência mecânica e tipo de concretos sejam conhecidos. Este resultado também demonstra que a resistividade é uma técnica que pode ser muito bem aproveitada no campo preventivo e no campo de diagnóstico inicial e de manutenção de estruturas de concreto, bem como no seu monitoramento frequente.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM G 57: **Standard test method field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method**, West Conshohocken, United States of America: ASTM, 2020.

ALVES L.; OLIVEIRA, A.M. **Avaliação Experimental de Parâmetros de Condicionamento nos Resultados de Resistividade Elétrica Superficial Aparente e Volumétrica do Concreto: Durabilidade e Qualidade Estrutural-Efeito da Adição Mineral de Sílica Ativa e Influência de Relação Água/Ligante.** Relatório de pesquisa de iniciação científica, 2023.

ANDRADE, C. BUJÁK, R. **Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion**, Cement and concrete Research, v. 53, p. 59–67, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.004>.

ARAGONCILLO, 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, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129909>

ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs**, Construction and Building Materials, v. 324, p.126659, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126659>

ARAÚJO, C. C.; MEIRA, G. R. **Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity**, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 15, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000100003>

AZARSA, P.; GUPTA, R. **Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review**, Advances in Materials Science and Engineering, 2017, pp. 30. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 5739: **Concreto – Ensaios de Compressão de corpos de prova cilíndricos: Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto - requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 7218: **Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 8522: **Concreto endurecido - Determinação dos Módulos de Elasticidade e de Deformação: Parte 1 Módulos Estáticos à Compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 20 p.

_____. NBR 9204: **Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica: Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR NM 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2021.

- _____. NBR 16889: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.
- _____. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018a. 12p.
- _____. NBR 16972: **Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.
- _____. NBR NM 16917: **Agregados graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.
- _____. NBR NM 16916: **Agregados miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.
- _____. NBR NM 16973: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.
- _____. NBR NM 17054: **Agregados – Determinação da composição granulométrica: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.
- BATISTA, A. G.; PIKANÇO, M. S. **Utilização de resíduos de bauxita como filler, adicionado de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral no concreto betuminoso usinado a quente.** RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, v. 12, p. e23312641871-14, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.54033/cadpedv21n7-183>
- BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; PANSEIRA, W. A.; SAVARIS, G. **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, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116979>
- BANG, J. B; YIM, H. J. **Segregation evaluation of concrete pavements under excessive vibration using electrical resistivity measurement,** Case Studies in Construction Materials, V. 19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02300>
- BJEGOVIĆ, D. *et al.* **Test Methods for Concrete Durability Indicators.** In: BEUSHAUSEN, H.; FERNANDEZ LUCO, L. (Eds.). Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability. RILEM State-of-the-Art Reports. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016. v. 18, p. 51–105.
- BROOMFIELD, J.P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair.** New York: E&FN Spon, 1997.
- CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão em Armaduras de Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas.** Goiânia, Editora UFG/ São Paulo, Pini, 1997.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto.** In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011, pp. 849-887.
- CASCUDO, OSWALDO; TEODORO, R.; OLIVEIRA, A. M. DE; CARASEK, H. Effect of different metakaolins on chloride-related durability of concrete. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 118, p. 3-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14359/51732634>
- CASCUDO, O. ; OLIVEIRA, A. P. ; VIEIRA, J. D. ; OLIVEIRA, A.M. **Study of Pore Solution, Porosity and Microstructure of Ternary Cement Matrices: A Holistic and Strategic**

- View of Concrete Durability.** Journal of Materials in Civil Engineering, [v. 37, n. n4](#) p.040250261-18, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-18439>
- CHEN, C. T.; CHANG J.J.; YEIH, W. C. **The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete**, Construction and Building Materials, v. 71, 2014, pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>
- CHEYTANI, M.; CHAN, S.L.I. **The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions**, Case Studies in Construction Material, v. 15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00663>
- ESAKER, M; HAMZA, O; ELLIOTT, D. **Monitoring the bio-self-healing performance of cement mortar incubated within soil and water using electrical resistivity**, Construction and Building Materials, v. 393, p. 132109, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132109>
- GOMES-PIMENTEL, M.; GOMES, C. F. F.; SILVA, M.R. C.; VIVEIROS, D. S.; PICANÇO, M. S. **RESÍDUO DE MINÉRIO DE MANGANÊS DA REGIÃO AMAZÔNICA E O SEU POTENCIAL USO COMO MATERIAL SUPLEMENTAR AO CIMENTO PORTLAND.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.691.
- HE, R.; NANTUNG, T.; OLEK, J.; LU, N. **Field study of the dielectric constant of concrete: A parameter less sensitive to environmental variations than electrical resistivity**, Journal of Building Engineering, v. 74, p. 106938, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106938>
- Jl, H.; TIAN, Y.; FU, C.; YE, H. **Transfer learning enables prediction of steel corrosion in concrete under natural environments**, Cement and Concrete Composites, v. 148, p. 105488, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105488>
- JIN, M.; JIANG, L.; ZHU, Q. **Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes**, Construction and Building Materials, v. 143, p. 1–15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.131>
- KESSLER, R. J.; POWERS, R. G.; PAREDES, M. A. **Resistivity Measurements of Water Saturated Concrete as an Indicator of Permeability**, Paper presented at the CORROSION 2005, Houston, Texas, April 2005.
- LAYSSI, H.; ALIZADEH, A. R; SALEHI, M. **Electrical Resistivity of Concrete**, Concrete International, p. 41-46, 2015.
- LARSEN, C. **Electrical resistivity of concrete - Part II: Influence of moisture content and temperature**, 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 11-13 September 2006, Quebec City, Canada.
- LEONEL, A.C.A.; OLIVEIRA, A.M.; CASCUDO, O. **Interação da resistividade elétrica com esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.** Paranoá. v.17, p.e49960, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18830/1679-09442024v17e49960>
- LOPES, R.C.; A.M.; CASCUDO, O. **A Technical and Technological Engineering View of Correlation of Non-Steady State Chloride Diffusion Test Correlated to an Adapted Colorimetric Method, 2023.** (submetido à avaliação).

- LUBECK, A. GASTALDINI, A. L. G.; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. **Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag**, Cement Concrete & Composites, v. 34, p. 392–399, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>
- LUJÁN, V. F. MALDONADO-GARCÍA, M. A. M, QUERO, V. G. J. MONTES-GARCÍA, P. **Reliability of electrical resistivity on the long-term monitoring of concrete**, Construction and Building Materials, v. 18, p.101154, 2023.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101154>
- MARTINS, B.G.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. **Avaliação do Comportamento Reológico das Matrizes Cimentícias com a Adição de Nanotubos de Carbono: uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) - Parte 1**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 19, p. 210-223, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v19i1.76626>
- MARTINS, B. G.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. **Avaliação do Comportamento Reológico das Matrizes Cimentícias com a Adição de Nanotubos de Carbono: uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) - Parte 2**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 19, p. 210-224, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v19i1.76627>
- MAO, Y.; HU, X.; ALENGARAM, U. J.; CHEN, W.; SHI, C. **Use of carbonated recycled cement paste powder as a new supplementary cementitious material: A critical review**, Cement and Concrete Composites, v. 154, p.105783, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105783>
- MARQUEZ, J. M. S. **Influence of Saturation and Geometry on Surface Electrical Resistivity Measurements**, Masters dissertation. Applied Science Building Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2015. https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/980090/1/Sanchez_M.A.Sc_F2015.pdf
- MCPOLIN, D.O.; BASHEER, P.A.M.; LONG, A.E.; GRATTAN, K.T.V.; SUN, T. **New test method to obtain pH profiles due to carbonation of concretes containing supplementary cementitious materials**, Journal of Materials Civil Engineering, v. 19, p. 936–946, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:11\(936\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:11(936))
- MCPOLIN, D.O.; BASHEER, P.A.M.; LONG, A.E. **Carbonation and pH in mortars manufactured with supplementary cementitious materials**, Journal of Materials Civil Engineering, v. 21, p. 217–225, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:5\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:5(217))
- MEDEIROS, M. H. F. D. **Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado**. 2001. Tese de doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- MEDEIROS, C. L. **Estudo da Permeabilidade do Concreto por Diferentes Métodos e sua Contribuição no Campo dos Indicadores de Durabilidade**. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2023.
- MEDEIROS, M. H. F. de; LOPES, R. C.; REAL, L. V.; RIVAROLA, G. B.; OLIVEIRA, A. M.; O.; CASCUDO, O. **Efeito do tipo de cimento e de materiais cimentícios suplementares**

na resistividade elétrica superficial do concreto, Ambiente Construído, v. 25, 2025, pp. e140952.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, S.H.F. **Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolana**, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, v. 9, n. 2, p. 152-166, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

MELARA E. K. TRENTIN, P. O. PEREIRA, C. MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Contribution to the service-life modeling of concrete exposed to sulfate attack by the inclusion of electrical resistivity data**, Construction and Building Materials, v. 322, p. 126490, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126490>

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa de concretos contendo adições minerais**. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2009.

MILLARD, S. Wenner **Reinforced concrete resistivity measurement techniques**, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 91, pp. 71-88, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1680/iicep.1991.13583>

MINAGAWA, H.; MIYAMOTO, S.; KURASHIGUE, I.; HISADA, M. **Appropriate geometrical factors for four-probe method to evaluate electrical resistivity of concrete specimens**, Construction and Building Materials, v. 374, p. 130784, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130784>,

OLIVEIRA, A.M.; 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, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>

OLIVEIRA, A. M.; FERREIRA, R. A. R.; MARTINS FILHO, P. C. **Production of Silica Gel from Waste Metal Silica Residue**. Materials Letters, v. 275, p. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128125>

OLIVEIRA, A. M.; SILVA, C. A.; CASCUDO, O.; CARDOSO, T. C. **Influência do Tipo de Adição Mineral em Misturas Binárias e Ternárias no Ecorr, Rp, icorr e EIS de Concretos Expostos à Condição Agressiva Contendo Cloretos**. Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis - REUCP, v. 16, p. 46-57, 2022. Disponível: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/2181>

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, A. P. ; VIEIRA, J. D. ; NEVES JR., A. ; CASCUDO, O. **Study of the Development of Hydration of Ternary Cement Pastes Using X-ray Computed Microtomography, XRD-Rietveld Method, TG/DTG, DSC, Calorimetry and FTIR Techniques**. Journal of Building Engineering, v. 64, p. 1-17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105616>

OLIVEIRA, A. P.; CASCUDO, O.; OLIVEIRA, A. M. **Efeito da Sílica Ativa e da Nanossílica em Materiais Cimentícios - uma Revisão da Literatura para Futuras Pesquisas**. TECNIA - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG, v. 8, p. 161-186, 2023. Disponível: [file:///C:/Users/andri/Downloads/v8n1-09-artigo%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/andri/Downloads/v8n1-09-artigo%20(1).pdf)

PIRO, N. S. MOHAMMED, A. HAMAD, S. M. **Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: A comprehensive review**, Construction and Building Materials, v. 36, p. 106573, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106573>

PIRES, P.F. Estudo avançado de carbonatação em concreto contendo adições minerais. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2016.

POLDER, R.B. **Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation**, Construction and Building Materials, v. 15, 2001, p. 125-131. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)

RAMEZANIANPOUR, A.A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. **Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength**, Construction and Building Materials, v. 25, p. 2472–2479, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>

RIBEIRO, D. V.; DIAS, C.; SILVA, A. **Concreto com gradação funcional: gradação na porosidade para o aumento da durabilidade frente à carbonatação**. Ambiente Construído, v. 24, 2024. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/134936>.

ROBLES, K. P. GUCUNSKI, N. KEE, S.H. **Evaluation of steel corrosion-induced concrete damage using electrical resistivity measurements**, Construction and Building Materials, v. 411, p. 134512, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134512>

SAHA, A.; TONMOY, T. M.; SOBUZ, M.M. H.R.; ADITTO, F. A.; MANSOUR, W. **Assessment of mechanical, durability and microstructural performance of sulphate-resisting cement concrete over Portland cement in the presence of salinity**. Construction and Building Materials, v. 420, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135527>

SANCHEZ MARQUEZ, J. M. **Influence of Saturation and Geometry on Surface Electrical Resistivity Measurements**. Thesis. Department of Building, Civil and Environmental Engineering. Concordia University Montreal, Quebec, Canada, June, 2015.

SANTOS, A.F.S. **Estudo de parâmetros físico-químicos da solução do poro de argamassas com adições minerais e sua contribuição para a durabilidade**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2023.

SANTOS, J. R.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. **Estudo das Propriedades no Estado Fresco e Endurecido de Concretos com Adições Minerais: Contribuição por Meio de Meta-Análise, Mapeamento e Revisão Sistemática de Literatura para Delineamento de Futuras Pesquisas no Tema**. REVISTA DE ENGENHARIA E PESQUISA APLICADA, v. 8, p. 50-60, 2023.

SANTOS, M.A.; OLIVEIRA, A.P.; OLIVEIRA, A.M. **Um Estudo da Perspectiva do Uso de Resíduo Industrial de Silício como Adição Mineral em Matrizes Cimentícias: Origem, Processamento e Propriedades**. Revista de Engenharia da Universidade

Católica de Petrópolis - REUCP, v. 15, p. 103-118, 2021. Disponível em: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/2182>

SATHIPARAN, N; JEYANANTHAN, P.; SBRAMANIAM, 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, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114006>

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

SILVA, K.R.M.; FERNANDEZ, O.J.C.; CUNHA, R.R.; PICANÇO, M.S. **O potencial da utilização de resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, da Amazônia, Brasil, como materiais cimentícios.** REVISTA CARIBEÑA DE CIENCIAS SOCIALES, v. 13, p. e3911-17, 2024. DOI:<http://dx.doi.org/10.55905/rcssv13n5-007>

SILVA, L.S.; PICANÇO, M.S. **Análise investigativa sobre o uso de resíduo de caulim para a produção de compósitos cimentícios.** REVISTA CARIBEÑA DE CIENCIAS SOCIALES, v. 12, p. 1397-1426, 2023. DOI:<http://dx.doi.org/10.55905/rcssv12n3-023>

SMITH, K.M.; SCHOKKER, A.J.; TIKALSKY, P.J. **Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations**, Materials Journal, v. 101, p. 385– 390, 2004. DOI: <https://doi.org/10.14359/13424>

SENGUL, O. **Use of electrical resistivity as an indicator for durability**, Construction and Building Materials, v. 73, p. 434– 441, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>

SENGUL, O.; GJORV, O.E. **Effect of embedded steel on electrical resistivity measurements on concrete structures**, ACI Materials Journal, v. 106, 2009, p. 11– 18. DOI: <https://doi.org/10.14359/56311>

SNV - Schweizerische Normen-Vereinigung - **SN 505 262/1*SIA 262/1. Betonbau – Ergänzende Festlegungen. Standard** by Schweizerische Normen-Vereinigung, 13oed., 52 pages, 2013 (in German).

TORRENT, R. J. **A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site.** Materials and Structures, v. 25, n. 6, p. 358–365, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472595>

YASEEN, N. **Exploring the potential of sugarcane bagasse ash as a sustainable supplementary cementitious material: Experimental investigation and statistical analysis**, Results in Chemistry, v. 10, p.101723, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rchem.2024.101723>.

YIM, H. J; BAE, Y. H; KIM, J. H. **Method for evaluating segregation in self-consolidating concrete using electrical resistivity measurements**, Construction and Building Materials, v. 232, p. 117283, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117283>