

ADITIVO À BASE DE POLICARBOXILATO NO CONCRETO: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E PARÂMETROS INDICATIVOS DE DURABILIDADE

Frare, Andreza¹; Russi, Lucas Bonete²; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de³

¹ Mestre, Universidade Federal do Paraná, frareandreza@gmail.com.br

² Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná

³ Doutor, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: A busca por concretos mais duráveis e sustentáveis tem impulsionado o uso de aditivos superplastificantes de alto desempenho, como os à base de policarboxilato (PCE). Este estudo investigou a influência de diferentes teores de PCE (0,00%, 0,35%, 0,68% e 0,93%) nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com traços pobre, intermediário e rico. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica superficial (RES) e volumétrica (REV), além de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), aos 28 dias de cura. Os resultados indicaram que o aumento do teor de PCE promoveu reduções expressivas na relação água/cimento, com consequente elevação da resistência à compressão (até 74%) e da resistividade elétrica (177% na RES e 134% na REV para o traço rico). A VPU também aumentou, com todos os concretos classificados como de “qualidade excelente” segundo Whitehurst (1951). A melhoria geral do desempenho foi atribuída à ação dispersante do PCE, que favorece o empacotamento das partículas, reduz a porosidade e melhora a integridade da matriz cimentícia. No entanto, a literatura alerta que teores excessivos de PCE podem comprometer a hidratação e causar exsudação e segregação. Conclui-se que o uso racional do PCE contribui significativamente para a durabilidade e desempenho mecânico do concreto, desde que aplicado em dosagens adequadas.

Palavras-chave: concreto, policarboxilato, resistência, durabilidade, resistividade elétrica, ultrassom.

Abstract: The pursuit of more durable and sustainable concretes has driven the use of high-performance superplasticizers, such as polycarboxylate ether (PCE)-based admixtures. This study investigated the influence of different PCE dosages (0.00%, 0.35%, 0.68%, and 0.93%) on the mechanical and durability properties of concrete with low, intermediate, and rich mix proportions. Tests included compressive strength, surface and volumetric electrical resistivity (RES and REV), and ultrasonic pulse velocity (UPV) at 28 days of curing. The results showed that increasing PCE dosage significantly reduced the water-to-cement ratio, leading to substantial improvements in compressive strength (up to 74%) and electrical resistivity (177% increase in RES and 134% in REV for the rich mix). UPV also increased, with all concretes classified as “excellent quality” according to Whitehurst (1951). The overall performance enhancement was attributed to the dispersing action of PCE, which promotes particle spacing, reduces porosity, and improves the integrity of the cementitious matrix. However, literature warns that excessive PCE dosages may impair hydration and lead to bleeding and segregation. It is concluded that the rational use of PCE significantly enhances both durability and mechanical performance of concrete, provided the admixture is applied in technically balanced dosages.

Keywords: concrete, polycarboxylate, compressive strength, durability, electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity.

1. Introdução

O concreto armado é utilizado em obras de infraestrutura e edificações, devido à sua elevada resistência mecânica, versatilidade e custo acessível. Contudo, nas últimas décadas, tem-se observado uma crescente preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto, especialmente diante da manifestação precoce de manifestações patológicas que comprometem a segurança e a vida útil das construções [1]. A durabilidade está diretamente relacionada à capacidade do concreto de resistir à ação de agentes agressivos, como íons cloreto, dióxido de carbono e sulfatos, os quais se infiltram pela rede porosa da matriz cimentícia.

A porosidade e conectividade dos poros têm influência determinante na difusão iônica e, conseqüentemente, no risco de corrosão das armaduras [1]. Assim, estratégias que promovam maior compacidade e redução da relação água/cimento (a/c) têm sido fortemente exploradas. Nesse contexto, os superplastificantes à base de policarboxilato (PCE) destacam-se como aditivos de alto desempenho, capazes de reduzir o teor de água em até 40% sem comprometer a trabalhabilidade [2, 3].

Além de melhorar a fluidez da mistura para traços com baixa relação a/c, os PCEs atuam na dispersão das partículas cimentícias por mecanismos de repulsão estérica e eletrostática, promovendo melhor empacotamento dos sólidos e formação de uma matriz menos porosa [4]. Como consequência, diversos autores relatam aumento significativo da resistência à compressão, melhora na resistência à penetração de íons cloreto, e redução da permeabilidade, sobretudo quando a dosagem do aditivo é cuidadosamente controlada [5, 6]. Por outro lado, estudos alertam que dosagens excessivas de PCE podem comprometer o desempenho do concreto devido à segregação, exsudação e perturbações no processo de hidratação [2, 7].

Paralelamente à resistência mecânica, ensaios não destrutivos como o ultrassom têm sido utilizados como ferramentas complementares para inferir a qualidade interna da matriz cimentícia e identificar alterações microestruturais relacionadas à hidratação e compactação do concreto [8]. Esses métodos, além de seguros e eficientes, têm demonstrado boa correlação com propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade ($R^2 > 0,89$), reforçando sua aplicabilidade em estudos sobre o desempenho do concreto [9].

A resistividade elétrica, por sua vez, tem ganhado destaque como indicador direto da durabilidade do concreto, por estar associada à condutividade da solução porosa e à capacidade de transporte de íons. Estudos demonstram que maiores valores de resistividade elétrica estão associados a concretos mais densos, com menor suscetibilidade à corrosão das armaduras e à penetração de agentes agressivos [1]. Em especial, a combinação de adições minerais com PCEs pode contribuir para o refinamento da microestrutura, diminuição da porosidade e dificultando o processo de degradação.

Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência do superplastificante policarboxilato (PCE) nas propriedades de resistência e

durabilidade do concreto, utilizando diferentes proporções de mistura (pobre, intermediária e rica) e teores de aditivo (0,00%, 0,35%, 0,68% e 0,93%). Para tanto, os concretos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, resistividade elétrica superficial e volumétrica e velocidade de propagação de pulso ultrassônico, com o intuito de investigar como a modificação da matriz cimentícia interfere no desempenho estrutural e na resistência à deterioração ao longo do tempo.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Para a produção das misturas de concreto, foi utilizado como aglomerante o cimento CP II-F-32, com massa específica de 3,05 g/cm³. A Tabela 1 apresenta suas principais características químicas e físicas.

Tabela 1: Caracterização química, física e mecânica do cimento CP II F-32

Análise química (%)										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MgO	SO ₃	Perda ao fogo	CaO livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.	
60,43	18,32	4,29	3,30	3,10	2,66	6,67	1,37	1,57	0,64	
Análise física e mecânica										
Exp. quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Mm	min	min	%	cm²/g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,30	225	281	26,3	3,439	2,17	9,79	16,6	28,6	34,6	42,1

Fonte: Itambé, 2024 [10]

Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia natural de leito de rio. Como agregado graúdo foi utilizada brita 1 de calcário, oriundas da região metropolitana de Curitiba. As características físicas dos agregados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização física dos agregados

Propriedade	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Tipo	Areia natural	Brita 1 de calcário
Massa específica (kg/cm ³)	2,63	2,7
Massa unitária (kg/m ³)	1621,18	1627,75
Teor de material pulverulento (%)	2,6	–
Diâmetro Máximo Característico (mm)	–	19
Índice de forma	–	1,78

O aditivo utilizado foi um superplastificante à base de éter policarboxílico (PowerFlow 1180), com densidade de 1,09 g/cm³ e teor de sólidos de 41%. Foram analisadas quatro concentrações de PCE: 0,00%, 0,35%, 0,68% e 0,93% em relação à massa de cimento.

2.2 Métodos

2.1.1 Dosagem e Moldagem dos Corpos de Prova

As proporções das misturas foram determinadas utilizando o método IBRACON de dosagem [11]. Foram definidos três traços: traço pobre (TP), intermediário (TI) e rico (TR). Para cada combinação de traço e teor de aditivo, foram moldados sete corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm. A relação a/c foi corrigida para que o abatimento do tronco de cone das misturas se mantivesse em 80 ± 20 mm. Os teores de material utilizados para as composições dos concretos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Características dos concretos dosados com 0%, 0,35%, 0,68% e 0,93%

Amostra	Aditivo (%)	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço		Relação a/c	Massa específica (kg/m³)	f _{c28d} (MPa)
			Cimento	Agregados			
T P	0,00	324	1	6	0,71	2.390	18
	0,35	302			0,58	2.395	21
	0,68	285			0,56	2.352	27
	0,93	267			0,5	2.248	30
T I	0,00	389	1	4,5	0,56	2.360	27
	0,35	400			0,43	2.372	32
	0,68	379			0,37	2.486	39
	0,93	354			0,36	2.401	47
T R	0,00	507	1	3	0,40	2.390	37
	0,35	542			0,31	2.526	53
	0,68	505			0,28	2.505	59
	0,93	489			0,27	2.542	62

Os corpos de prova foram submetidos à cura por imersão em água a temperatura ambiente (23 ± 3 °C) até o momento dos ensaios. Para cada série, três corpos de prova foram destinados ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, enquanto os demais foram utilizados para os ensaios de resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico.

2.1.2 Ensaio de Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido conforme a NBR 5739 (2018) [12]. As amostras foram posicionadas em uma máquina universal servocontrolada e submetidas à carga axial até a ruptura, com uma taxa de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

2.1.3 Ensaio de ultrassom

A velocidade de pulso ultrassônico foi avaliada conforme a NBR 8802 (2013) [13], utilizando o método de transmissão direta. O equipamento empregado foi o Ultrasonic Pulse Velocity – Pundit Lab, com dois transdutores de 50 mm e frequência de operação de 54 kHz. A Figura 1 mostra a configuração de ensaio.

Figura 1: Configuração dos transdutores no ensaio de pulso ultrassônico



As superfícies dos corpos de prova foram previamente limpas e preparadas com aplicação de gel acoplante, garantindo o contato adequado entre os transdutores e a amostra. Foram realizadas três leituras por amostra, considerando a influência de variáveis internas como densidade e teor de umidade. A classificação da qualidade do concreto foi baseada nos critérios propostos por Whitehurst (1951) [14] (Tabela 4).

Tabela 4: Relação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e qualidade do concreto

Velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 – 3500	Regular
2000 - 3000	Ruim
< 2000	Péssimo

Fonte: Whitehurst (1951) [14]

2.1.4 Resistividade elétrica superficial (RES)

A resistividade elétrica superficial foi obtida por meio do método dos quatro eletrodos, em amostras com superfície saturada e seca (SSS), com o intuito de minimizar os efeitos da umidade na variabilidade dos resultados. O equipamento utilizado foi o Resipod (Proceq), com espaçamento entre eletrodos de 50 mm, frequência de 40 Hz e corrente entre 10 μ A e 200 μ A.

Foram realizadas seis leituras ao longo da lateral do corpo de prova, com aproximadamente 60° de separação angular entre as medições, conforme recomendado em normas técnicas e estudos como Wosniack et al. (2021) [1].

2.1.5 Resistividade elétrica volumétrica (REV)

A resistividade elétrica volumétrica (REV) foi determinada conforme a norma ASTM C1876 (2019), utilizando o equipamento Resipod (Proceq), frequência de 40 Hz e corrente entre 10 μ A e 200 μ A alternada aplicada entre chapas metálicas nas superfícies circulares dos corpos de prova. Para assegurar um contato eficiente entre os eletrodos e as amostras, empregaram-se esponjas saturadas e gel condutivo. O equipamento utilizado fornece diretamente os valores de tensão (V) e corrente (I), a partir dos quais se calcula a resistência elétrica aparente (R) por meio da Lei de Ohm, que estabelece a relação $R=V/I$. Posteriormente, aplica-se um fator geométrico (k), específico para amostras cilíndricas, a fim de obter a resistividade elétrica, de acordo com a expressão $\rho=R \times k = R \times \pi \times L/A$. O valor de k utilizado foi 0,377, sendo este determinado pela forma, tamanho da amostra e o caminho percorrido pela corrente elétrica [15].

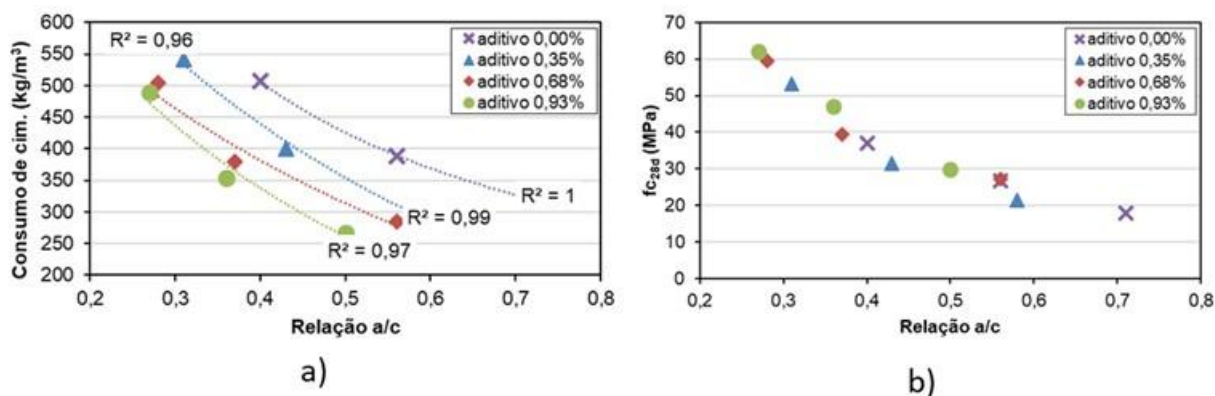
3. Resultados e discussões

A Figura 2a apresenta a variação do consumo de cimento dos concretos em comparação com a relação água/cimento para os diferentes teores de aditivo superplastificante e a Figura 2b apresenta a relação entre resistência à compressão do concreto e relação a/c aos 28 dias de idade.

A utilização do aditivo superplastificante à base de policarboxilato (PCE) promoveu redução no consumo de água em todas as formulações avaliadas neste estudo, com destaque para a mistura intermediária com teor de 0,93%, que apresentou redução superior a 36%. Tal comportamento é relatado na literatura e está relacionado ao mecanismo de ação dos PCEs, que atuam por adsorção nas superfícies das partículas cimentícias, promovendo a dispersão por repulsão estérica e eletrostática [4, 16]. Esse efeito permite a manutenção da trabalhabilidade mesmo com menor relação água/cimento (a/c), resultando em concretos mais densos e menos porosos, favorecendo a durabilidade.

Neste estudo, observou-se que o consumo de cimento diminuiu proporcionalmente com o aumento do teor de PCE, com $R^2 > 0,96$, indicando comportamento previsível da mistura. No entanto, a superdosagem do aditivo pode ser prejudicial. Segundo Kumar et al. [2], teores superiores a 1,8% podem comprometer a resistência inicial devido ao retardamento da hidratação que é intensificado pela presença de polímero livre na solução porosa, que interfere na nucleação dos produtos e no empacotamento das partículas cimentícias. Além disso, pode haver aumento do tempo de pega, exsudação e segregação [7].

Figura 2: a) Efeito do teor de aditivo (éter policarboxílico) no consumo de cimento e relação a/c. b) relação entre resistência à compressão do concreto e relação a/c aos 28 dias de idade.



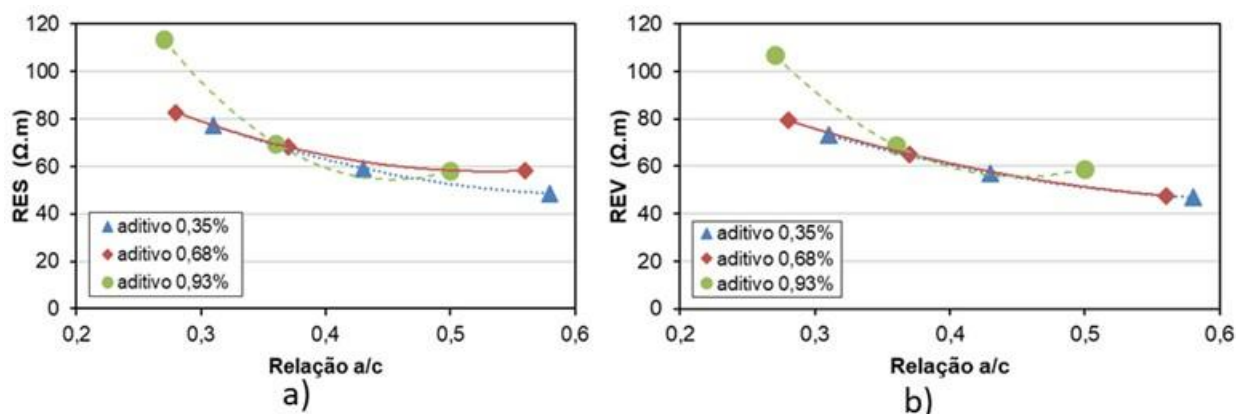
A análise do gráfico evidencia que a resistência à compressão aumenta com a redução da relação a/c para todas as misturas, com destaque para aquelas com adição de PCE, que apresentaram desempenho superior ao concreto de referência (0,00%). A dosagem de 0,93% de PCE resultou nos maiores ganhos, com aumentos de até 74% na resistência aos 28 dias, atribuídos à diminuição da relação a/c, melhor dispersão das partículas cimentícias e ao refinamento da microestrutura [4, 16].

A atuação do aditivo pode ter favorecido o empacotamento das partículas e o grau de hidratação, aspectos discutidos na literatura como fatores que potencializam a resistência e a durabilidade do concreto [5, 17]. As curvas obtidas mostraram consistência porque, em todos os traços analisados, a incorporação progressiva do aditivo PCE resultou na redução da relação a/c necessária para manter a mesma trabalhabilidade, evidenciando um comportamento repetitivo e confiável. Essa consistência permitiu a previsibilidade dos resultados, pois foi possível antecipar que o aumento do teor de PCE levaria à menor demanda de água e, por consequência, à redução do consumo de cimento, conforme previsto pelo mecanismo de ação do aditivo.

Os resultados da resistividade elétrica superficial (RES) do concreto e resistividade elétrica volumétrica (REV), obtidos pelo método dos quatro eletrodos, em função da relação água/cimento (a/c), aos 28 dias de idade estão apresentados na Figura 3a e 3b, respectivamente.

A adição de PCE resultou em valores mais elevados de resistividade elétrica superficial (RES) em todos os traços, com destaque para a mistura com 0,93% de aditivo, que apresentou aumentos de até 177% no traço rico, 150% no intermediário e 78% no pobre, em comparação à mistura de referência. Mesmo os teores intermediários (0,35% e 0,68%) proporcionaram ganhos significativos, como os 60% de aumento no traço rico com 0,35% de PCE. Para o traço rico, o aumento foi superior a 85% em todos os teores.

Figura 3: a) Relação entre a resistividade elétrica superficial (RES) em função da relação a/c, aos 28 dias. b) Relação entre a resistividade elétrica volumétrica (REV) em função da relação a/c, aos 28 dias.



Esse comportamento está associado à redução da porosidade e à menor conectividade capilar promovidas pela dispersão eficiente do cimento, o que dificulta o fluxo de corrente elétrica na matriz [1, 4].

A resistividade elétrica é reconhecida como indicador da durabilidade do concreto, estando diretamente relacionada à resistência contra a penetração de íons agressivos. Conforme Andrade [18], maiores valores de RES indicam maior expectativa de vida útil das estruturas.

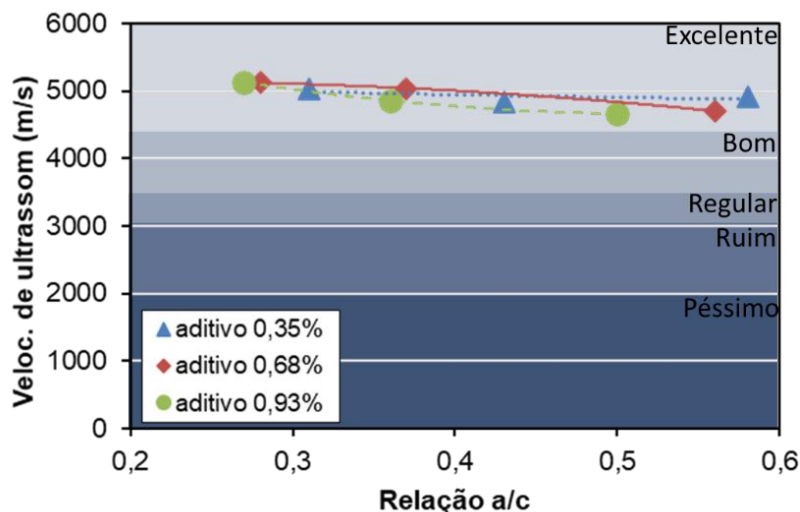
Os resultados demonstram que menores relações a/c resultam em maiores valores de REV, independentemente do teor de aditivo, devido à redução da porosidade e da conectividade capilar da matriz cimentícia. Observou-se ainda que o aumento do teor de PCE, especialmente na mistura com 0,93%, proporcionou incremento de até 134% na REV do traço rico, o aumento foi significativo para o menor teor (0,35%), chegando a 60% no traço rico, e 25% para o traço pobre, indicando a formação de uma estrutura interna mais densa e menos condutiva [4, 5].

A REV, segundo Wosniack et al. [1], é menos sensível a variações superficiais, fornecendo avaliações mais confiáveis da durabilidade frente à penetração de agentes agressivos, como íons cloreto. Assim, sua combinação com a RES amplia a compreensão da microestrutura do concreto.

O refinamento dos poros promovido pelo PCE e a consequente redução da conectividade iônica também são apontados como fatores críticos para o aumento da REV [18].

A Figura 4 apresenta os resultados médios da velocidade de pulso ultrassônico (VPU) obtidos para diferentes relações água/cimento (a/c) e teores de aditivo superplastificante à base de policarboxilato (PCE).

Figura 4: Correlação entre velocidade do pulso ultrassônico (VPU) e relação a/c, aos 28 dias



De forma geral, observou-se que maiores teores de PCE (0,68% e 0,93%) resultaram em valores mais elevados de VPU, especialmente em misturas com menor relação a/c. Embora o teor de 0,35% tenha apresentado o melhor desempenho no traço pobre, os maiores valores absolutos de VPU ocorreram nas misturas com maior compacidade e desempenho mecânico [8, 16].

A propagação ultrassônica está diretamente ligada à densidade da matriz e à continuidade interna, sendo favorecida por concretos com menor porosidade e melhor empacotamento. Diversos autores corroboram essa relação entre VPU, resistência à compressão e grau de hidratação [5, 8].

Todos os concretos apresentaram VPU > 4600 m/s, sendo classificados como de “qualidade excelente” segundo Whitehurst [14], demonstrando que o uso do PCE é eficiente e seguro quando bem dosado. Pequenas dispersões observadas no teor de 0,93% podem estar associadas a interações entre aditivo em excesso e o processo inicial de hidratação [2].

4. Conclusões

A redução da relação água/cimento (a/c), promovida pelo aditivo superplastificante à base de policarboxilato (PCE), resultou em menor porosidade e maior compacidade da matriz do concreto, reduzindo a permeabilidade e dificultando a entrada de agentes agressivos.

O aumento da resistência à compressão, especialmente com o teor de 0,93% de PCE, indicou uma estrutura mais densa e menos propensa à formação de fissuras. Os elevados valores de resistividade elétrica superficial e volumétrica apontam para menor conectividade entre os poros, o que reforça tanto o desempenho mecânico quanto a proteção contra deterioração.

Além disso, a melhora na velocidade de pulso ultrassônico (VPU) confirma a integridade interna do concreto, associada a uma matriz homogênea e resistente a fissuração e degradação ao longo do tempo. De modo geral, o PCE contribuiu para melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto, desde que utilizado em dosagens equilibradas, sem provocar efeitos adversos.

No entanto, a superdosagem do aditivo pode comprometer o desempenho do concreto, provocando atrasos na hidratação, redução da resistência inicial, aumento do tempo de pega, exsudação e risco de segregação. Por isso, é fundamental que sua dosagem seja tecnicamente controlada.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio do CNPq e da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Referências

- [1] Wosniack, L.M.; Real, L.V.; Silva, M.D.; Macioski, G.; Hoppe Filho, J.; Medeiros, M.H.F. (2021) Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. *Ambiente Construído*, 21(3):251–271.
- [2] Kumar, A.; Haq, M.Z.U.; Mathur, N.; Rana, V.S.; Sood, H.; Nandal, M. (2022) Sustainable effect of polycarboxylate ether based admixture: A meticulous experiment to hardened concrete. *Materials Today: Proceedings*, 62:8336–8343.
- [3] Lei, L.; Hirata, T.; Plank, J.; et al. (2022) 40 years of PCE superplasticizers – History, current state-of-the-art and an outlook. *Cement and Concrete Research*, 157:106826.
- [4] Sha, S.; Wang, M.; Shi, C.; Xiao, Y. (2020) Influence of polycarboxylate superplasticizer structure on cement-based materials – A review. *Construction and Building Materials*, 243:118268.
- [5] Wang, C.; Kong, F.; Pan, L. (2021) Effects of PCEs with different side-chain lengths on durability indicators of concrete. *Journal of Building Engineering*, 41:102431.
- [6] Harichane, A.; Kadri, A.; Mahdad, M.; et al. (2023) Effectiveness of the use of polymers in high-performance concrete containing silica fume. *Polymers*, 15(18):3730.
- [7] Nowak-Michta, A. (2020) Additional porosity as a side effect of polycarboxylate addition and its influence on concrete's scaling resistance. *Materials*, 13(2):316.
- [8] Medeiros, M.H.F.; de Souza Junior, T.F.; Silva, M.S.A.; Godinho, J.P. (2020) Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 13(5):e13505.

- [9] Pereira, E.I.; Medeiros, M.H.F. (2015) Avaliação da resistência à compressão in situ por meio de métodos não destrutivos. *Revista Matéria*, 20(3):635–644.
- [10] Itambé (2024) Dados técnicos – Ficha do cimento CP II-F-32. Instituto Cimento Itambé. Disponível em: www.cimentoitambe.com.br
- [11] HELENE, Paulo. *Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, São Paulo, 2005, p. 439-471
- [12] ABNT (2018) NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.
- [13] ABNT (2013) NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.
- [14] Whitehurst, E.A. (1951) Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*, 47(5):433–444.
- [15] AENOR (2014) UNE 83988-2:2014: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Medida de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método por el método de cuatro sondas.
- [16] Ferrari, L.; Flatt, R.J. (2010) A method to measure steric repulsion forces between cement particles. *Cement and Concrete Research*, 40(6):821–831.
- [17] Lei, L. et al. (2022) 40 years of PCE superplasticizers – A review. *Cement and Concrete Research*, 157:106826.
- [18] Andrade, C. (2004) Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration and resistivity tests. *Cement and Concrete Research*, 34(4):631–635.