

Durabilidade de traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas

M. Rendón Belmonte¹ , M. Martínez Madrid¹ , R. V. Martínez Pérez¹ , J. T. Pérez Quiroz¹ 

*Autor de Contacto: marielarb17@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

Recepção: 20/06/2018 | Aceitação: 28/02/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este artigo descreve propriedades relativas à durabilidade de cinco traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas (CVA) e cimento Portland tipo CPC 40. Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica aparente, permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão. A qualidade de todas os traços foi duradoura, o desenvolvimento da resistividade elétrica e a diminuição do nível de permeabilidade ao íon cloreto foi favorecido pelo conteúdo de CVA, embora a resistência à compressão em maior conteúdo de CVA tenha sido menor. O percentual máximo de substituição do CVA para atender aos critérios atuais de durabilidade foi de 65%.

Palavras chave: cinza volante ativada; durabilidade; concreto ecológico.

Citar como: Rendón Belmonte, M., Martínez Madrid, M., Martínez Pérez, R. V., Pérez Quiroz, J. T. (2019), “Durabilidade de traços de concreto com diferentes teores de cinzas volantes ativadas”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 200 – 214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.313>

¹ Instituto Mexicano del Transporte, México.

Informações legais

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

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Durability of concrete mixtures with different contents of activated fly ash

ABSTRACT

This article describes properties relating to the durability of five different mixtures of concrete with varying contents of activated fly ash (CVA) and Portland cement type CPC 40. The tests carried out were: apparent speed of ultrasonic pulse, electrical resistivity, fast ion permeability chloride and mechanical resistance to compression. The performance of all mixtures proved to be durable, the development of the electrical resistivity, and the decrease in the level of the chloride ion permeability was favored by the contents of CVA, although resistance to compression at higher content of CVA was minor. The maximum percentage of replacement of CVA to comply with the current criteria of durability was 65%.

Keywords: activated fly ash; durability; ecological concrete.

Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada

RESUMEN

Este artículo describe propiedades referentes a la durabilidad de cinco mezclas de concreto con distintos contenidos de ceniza volante activada (CVA) y cemento Portland tipo CPC 40. Los ensayos realizados fueron: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica aparente, permeabilidad rápida al ión cloruro y resistencia mecánica a la compresión. Los resultados indicaron que la calidad de todas las mezclas resultó durable, el desarrollo de la resistividad eléctrica y disminución del nivel de permeabilidad al ión cloruro fue favorecido por el contenido de CVA. En cuanto a las resistencias a la compresión, se notó que a mayor contenido de CVA estas resultaron menores. El porcentaje máximo de sustitución de CVA para cumplir con los criterios de durabilidad actuales resultó del 65%.

Palabras clave: ceniza volante activada; durabilidad; concretos ecológicos.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo moderno. As estimativas indicam que no ano de 2050 o consumo de cimento Portland poderá aumentar até 225% em relação aos valores atuais, principalmente devido à alta demanda deste aglomerante por países emergentes, como Índia, China, Brasil e México (Garcés et al, 2012). De acordo com a CANACEM (câmara nacional de cimento) em 2016 a produção de cimento foi de 40,6 milhões de toneladas e o consumo nacional de 40,1 milhões de toneladas.

Sabe-se que a produção mundial de cimento de 1,6 milhão de toneladas representa aproximadamente 7% da geração de dióxido de carbono na atmosfera (Mehta, 2001, Nath et al, 2011). Além disso, estruturas construídas com cimento Portland em ambientes corrosivos começam a se deteriorar após 20 a 30 anos, embora tenham sido projetadas para mais de 50 anos de vida útil (Chandra et al, 2015). A fim de reduzir o uso de recursos naturais, a quantidade de energia e as emissões de dióxido de carbono, está sendo investigado o desenvolvimento de concretos ecológicos que, além de serem amigáveis ao meio ambiente, proporcionam sustentabilidade e durabilidade para alcançar uma longa vida útil das estruturas. (Madhavi et al, 2014; Mishra, 2017).

Algumas opções consideradas para conseguir isso é a substituição parcial da quantidade de cimento Portland (CP), em particular com materiais como pozolanas naturais, sílica ativa, escória, cinzas volantes (Al-Amoudi et al, 1996; Malhotra, 1990; Mehta, 2002; Garcés et al, 2012; 2017, Moffatt et al, 2017; Mishra, 2017; Saha, 2018).

A cinza volante é um subproduto industrial gerado em grandes quantidades em todo o mundo, quase 800 milhões de toneladas por ano (Heidrich et al, 2013, International Energy Agency Coal Industry Advisory Board, 2014), mas uma quantidade significativa deste material (cerca de 50 %) é depositada em aterros, causando um grave risco ambiental e a diminuição da reatividade das cinzas devido às condições de intemperismo (Mishra, 2017).

Embora o uso de cinzas volantes como um aditivo ao concreto seja obsoleto e haja uma extensa pesquisa baseada em seu uso como material de substituição de cimento no concreto, o nível de substituição, de acordo com a literatura disponível, ainda é limitado a um máximo de 35% da massa de cimento, com base no argumento de que maiores porcentagens de substituição de cinzas volantes não melhoram as características de resistência em sua forma natural (Hemalatha et al, 2017). A fim de melhorar as propriedades e aumentar a porcentagem de substituição de cinzas volantes, diferentes abordagens foram exploradas, tais como: redução da relação água / materiais cimentícios, substituição do cimento Portland de alta resistência inicial por cimento Portland comum, substituição de uma porção da cinza volante por uma pozolana mais reativa, como sílica ativa ou cinza de casca de arroz, incorporação de nanomateriais, cura acelerada (Yu et al, 2017). Métodos químicos, mecânicos, térmicos ou combinados também foram usados para melhorar a reatividade desse resíduo (Mucsi, 2016; Sahoo, 2016). A ativação alcalina consiste em um processo químico que permite a transformação de um material com uma estrutura parcial ou totalmente amorfa em compostos cimentícios compactos (Palomo et al., 1999). Ativação mecânica é definida como ativação por meio de um processo de moagem ou por meio de peneiramento e a separação de ar e ativação térmica se refere ao resfriamento lento ou rápido, produzindo mudanças na relação vítreo/cristalino (Hela et al, 2013; Mucsi, 2016). Além desses métodos, existe a eletrometagenese, que envolve a ativação de cinzas volantes a partir da entrada de íons de uma solução alcalina pela aplicação de um campo elétrico através do concreto endurecido (Lizarazo et al., 2015). Atualmente, o uso de cinzas volantes é considerado uma solução eficaz (Zobal et al, 2017).

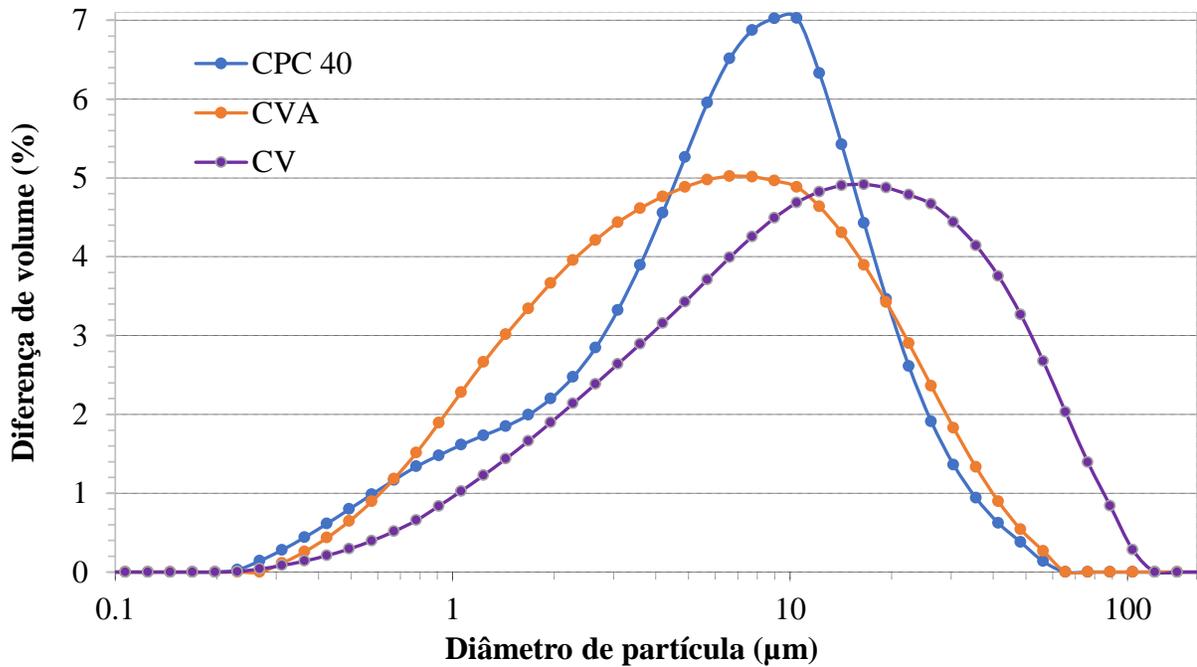
Considerando os antecedentes do uso de cinzas volantes, efeitos positivos nas propriedades do concreto, baixo custo e disponibilidade atual de cinzas volantes no México (armazenados), este artigo enfoca a determinação de propriedades como: qualidade do concreto (velocidade de pulso ultrassônico VPU), resistividade elétrica aparente (ρ), permeabilidade rápida ao íon cloreto e resistência mecânica à compressão, de traços com diferentes teores de cimento Portland tipo CPC 40 (cimento mais comercializado e usado na construção civil atualmente) e cinza volante submetida a um processo de ativação química através do uso de produtos químicos em pó e método de moagem, com o objetivo de melhorar sua reatividade, contribuir e enriquecer informações que promovam seu uso no setor de construção civil em nosso país.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

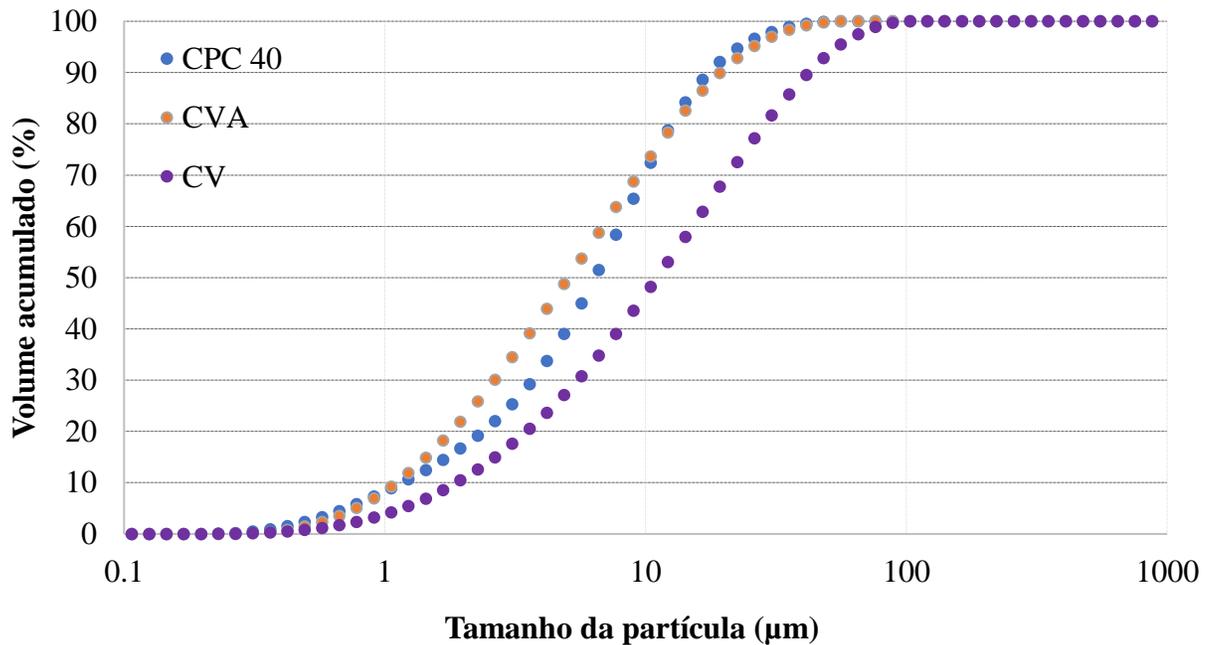
2.1. Materiais de partida

Para a elaboração dos traços de concreto, utilizou-se a marca de cimento Portland CPC 40, cinzas volantes ativadas pela adição de químicos em pós e moagem em moinho de bolas (CVA), agregados de produtos de britagem de calcário e água de rede potável.

A distribuição granulométrica do cimento (CPC 40), das cinzas volantes usadas antes da moagem (CV) e após a moagem (CVA) é mostrada na Figura 1. Esta análise foi obtida por scanner a laser. A suspensão de partículas foi preparada em etanol usando como meio de dispersão um banho de ultrassom por 5 minutos e a aproximação de Fraunhofer foi utilizada.



1a) Distribuição de partículas dos materiais de partida



2a) Tamanho da partícula dos materiais de partida

A Tabela 1 mostra as características dos agregados utilizados, valores obtidos de acordo com as normas ASTM C127 e C128.

Tabela 1. Características dos materiais utilizados para a preparação dos traços

Material	Densidade (kg/l)	Absorção (%)
Brita 5-20 mm (calcário triturado)	2.67	0.9
Areia 0-5 mm (calcário de mina/triturado)	2.40	2.40

2.2. Elaboração dos corpos de prova

Foram elaborados cinco traços com diferentes porcentagens de substituição de CVA (0, 30, 50, 65 e 75%) em relação ao peso do cimento denominado como M1, M2, M3, M4 e M5, respectivamente. A relação água / material cimentício foi de 0,35. Para alcançar esta relação, foram utilizados aditivos redutores de água e plastificante. Os traços estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Proporções dos 5 traços.

Material	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5
cimento CPC 40	kg/m ³	450	315	225	157.5	112.5
CVA	kg/m ³	0	135	225	292.5	337.5
Brita	kg/m ³	1006	1006	1006	1006	1006
Areia	kg/m ³	710	710	710	710	710
Condição de cura	°C	Sala de cura				
a/mc		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

*mc: material cimentício (CVA+CPC)

De cada traço foram obtidos 39 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento, moldados segundo o procedimento da norma NMX-C-159-16, hidratados com água potável da rede municipal e curados de acordo com a Norma NMX-C-148-10. Após o período de cura (28 dias), todas as amostras foram retiradas da sala de cura e mantidas à temperatura ambiente e em condições úmidas, condição obtida pela pulverização de água potável diária, e mantidas em recipientes plásticos com tampa.

2.2. Ensaios de durabilidade

Os ensaios realizados foram: velocidade de pulso ultrassônico (VPU) (ASTM C-597-02), resistividade elétrica (ρ) (NMX-C514-16), permeabilidade rápida ao íon cloreto (ASTM C1202-10) e resistência mecânica compressão (NMX C-083-02) em diferentes idades por um período de 122 dias. Deve-se mencionar que em cada idade do ensaio VPU e resistividade elétrica, foram avaliados quinze corpos de prova de cada traço, três corpos de prova para o caso de resistência mecânica à compressão, e duas amostras no ensaio de permeabilidade rápida ao íon cloreto foram avaliadas.

3. RESULTADOS

Em seguida, os resultados de cada ensaio realizado são descritos.

3.1 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A figura 2 apresenta o comportamento da velocidade de pulso ultrassônico.

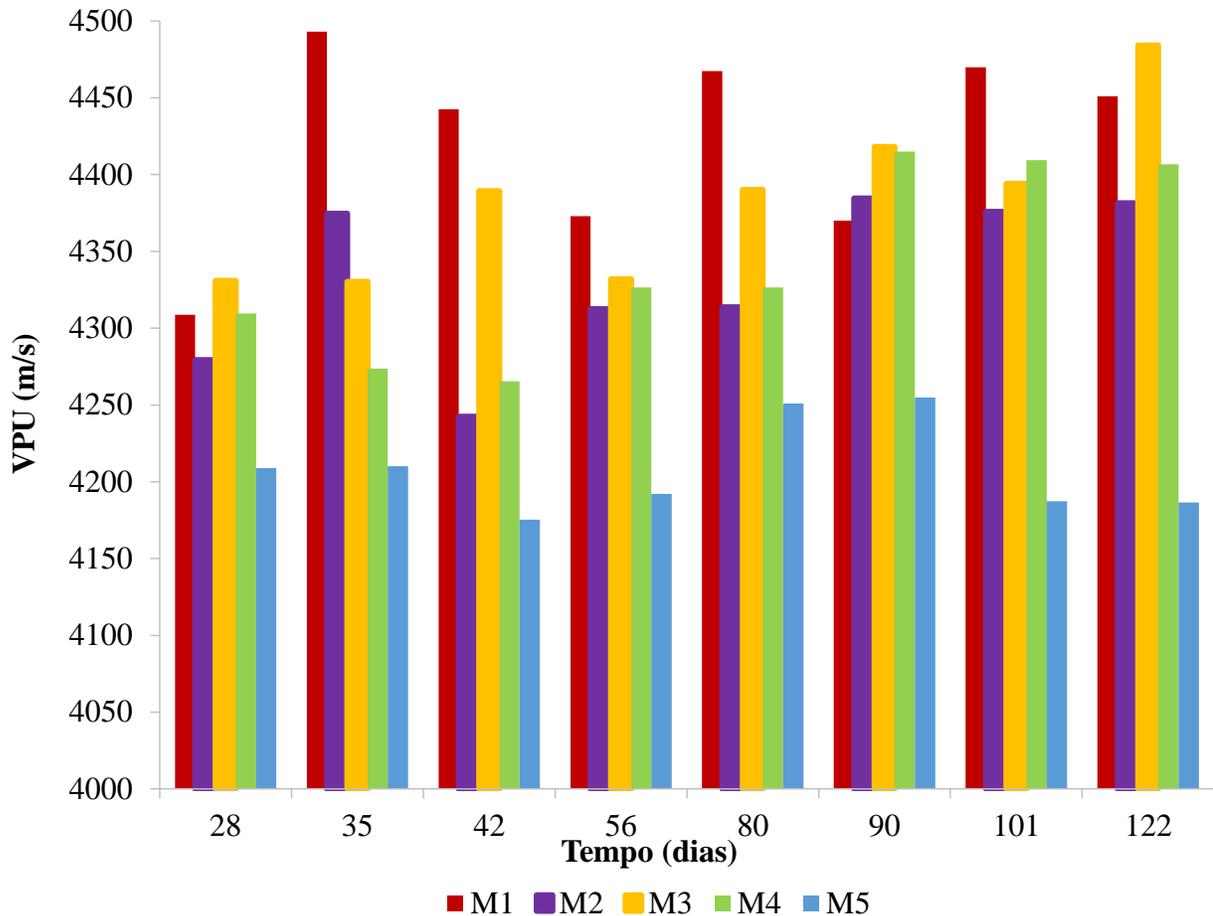


Figura 2. Velocidade de pulso ultrassônico em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

Os valores da velocidade do pulso ultrassônico obtidos nos cinco traços e em todas as idades do ensaio, relatados na Figura 2, foram superiores a 4.000 m/s, indicando que a qualidade em todos os casos resultou em durável. No entanto, no traço com maior teor de CVA (M5) foram observados menores valores em relação ao restante dos traços, este comportamento pode ser consequência da falta de hidróxido de cálcio contido no traço e fornecido pelo cimento Portland.

Considerando os resultados da VPU obtidos nesta investigação com o CVA e as informações relatadas por Al-Amoudi et al (1996), que avaliaram traços de concreto com e sem a substituição do cimento Portland por cinzas volantes (até 40%), os valores oscilaram na mesma ordem de grandeza ~ 4000 m/s.

3.2 Resistividade elétrica (ρ)

A figura 3 mostra o comportamento da resistividade elétrica aparente dos cinco traços elaborados em relação ao tempo. Deve-se mencionar que a norma NMX C-514-16 define resistividade elétrica aparente como a resistividade medida no concreto não saturado com água, condição na qual as medidas relatadas foram obtidas.

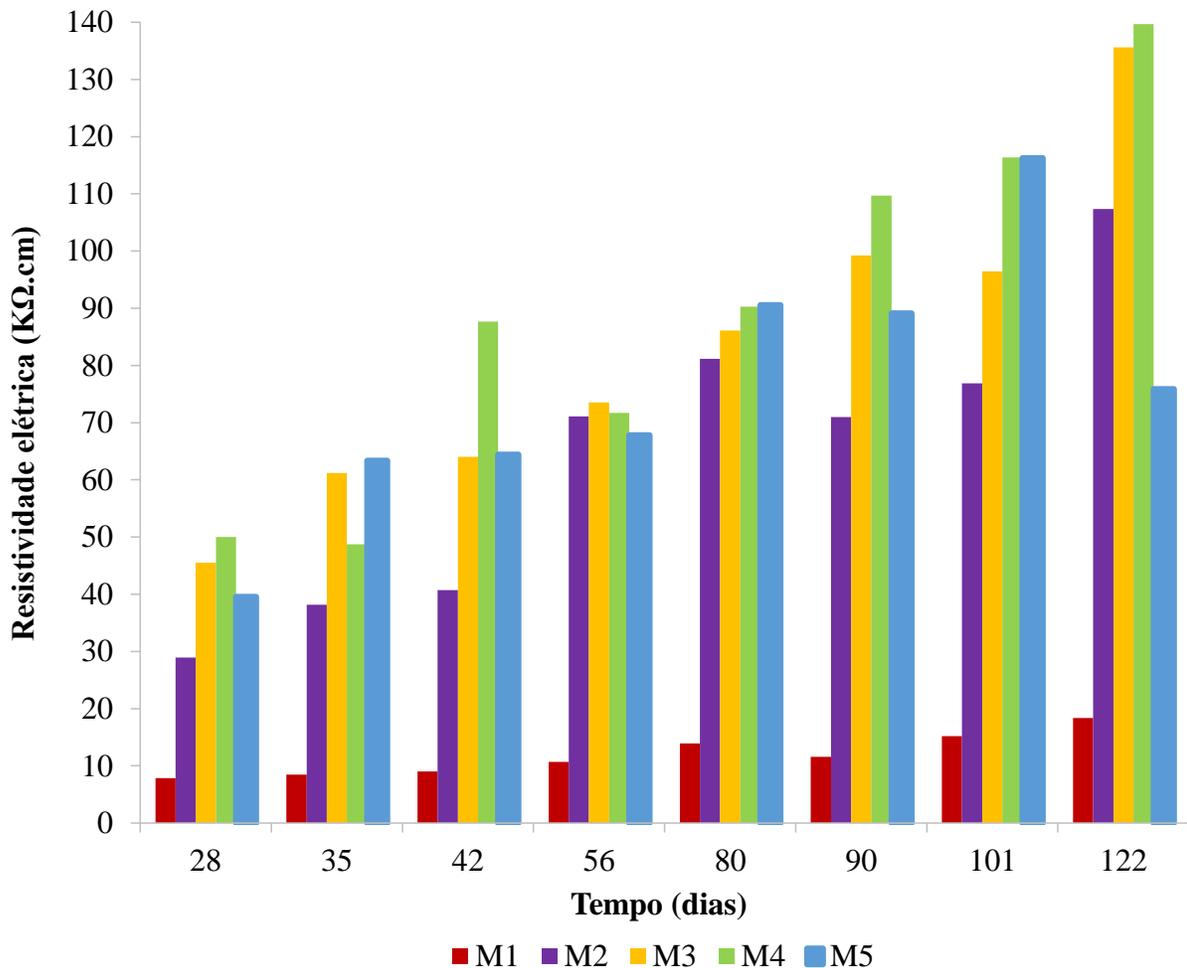


Figura 3. Resistência elétrica aparente em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

De acordo com a Figura 3, os traços com o teor de cinzas volantes ativadas apresentaram valores de resistividade elétrica mais elevados do que o traço sem o teor de CVA (M1), traço que atingiu um máximo de 18 KΩ.cm. Após 122 dias, M2 atingiu valores de 110 KΩ.cm, enquanto os traços M3 e M4 alcançaram valores próximos dos 140 KΩ.cm. No caso de M5, um decréscimo de resistividade foi observado na medição do dia 122, a partir de valores de 116 a 76 KΩ.cm, data em que um aumento no valor de permeabilidade ao íon cloreto também foi observado, como mostrado na Figura 3. Acredita-se que esse comportamento seja devido a duas causas possíveis: 1) nessa idade, a reação de CVA é mais sensível ao teor de umidade na matriz de concreto, retardando sua reação ou 2) o teor de cinzas no traço é excessivo para manter uma reação constante do CVA. No entanto, mesmo com a diminuição observada no M5, os valores de resistividade elétrica dos traços de CVA excederam os obtidos com o traço M1 (0% de cinza volante). Considerando os critérios estabelecidos na norma mexicana NMX C-514-16 e os valores da Figura 3, o traço M1 apresentou considerável porosidade interligada, enquanto os traços M2, M3 e M4 indicaram porosidade interconectada extremamente baixa e o M5 baixa porosidade interconectada.

3.3 Permeabilidade rápida ao íon cloreto

A Fig. 4 mostra o comportamento do ensaio de permeabilidade rápida do íon cloreto dos cinco traços elaborados. Os valores reportados correspondem às idades de 28, 56, 90 e 122 dias.

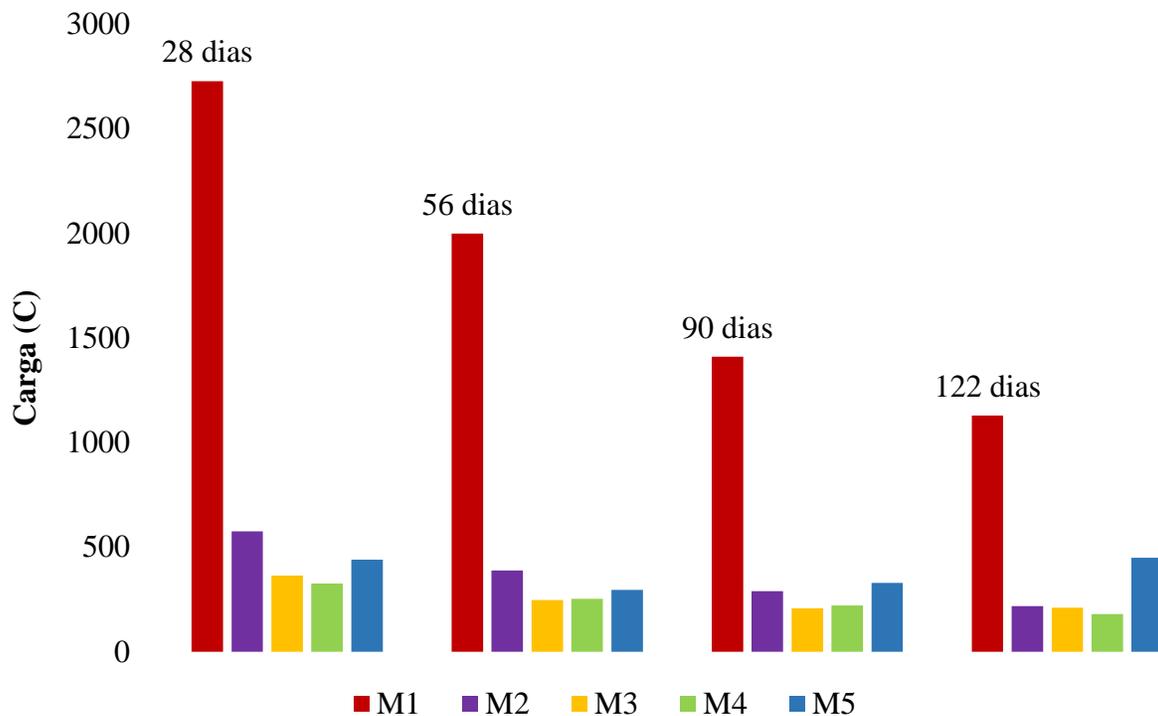


Figura 4. Rápida permeabilidade ao íon cloreto em diferentes idades dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

Levando em conta os valores da Fig. 4 e os critérios estabelecidos na norma ASTM C-1202-12, os resultados do traço sem cinzas volantes ativadas (M1) inicialmente apresentaram valores acima de 2500 C, mas com o passar do tempo diminuíram atingindo após 122 dias valores de 1100° C, com estes valores este traço atingiu um nível de permeabilidade do íon cloreto moderado e depois baixo. Para traços com substituição de cinzas volantes ativadas, a quantidade de carga que foi obtida em todas as idades de avaliação foi menor que 500 Coulombs (C), alcançando um nível muito baixo de penetração de íons cloreto. A tendência de permeabilidade em relação ao tempo dos traços M2, M3 e M4 foi decrescente, apenas para o caso do traço M5 o comportamento foi variável, mas em pouco tempo ultrapassou os 500° C.

Traços com cinzas volantes ativadas apresentaram menor permeabilidade de íons cloreto em comparação ao traço sem cinzas volantes ativadas, coincidindo com investigações que relatam que a presença de cinzas volantes promove um baixo nível de permeabilidade a esse íon (Malhotra, 1990; Nath et al, 2011; Saha, 2018; Mittal).

3.4 Resistência mecânica à compressão

A Fig. 5 mostra a resistência mecânica à compressão e o desvio padrão (σ em MPa) obtido a partir de três ensaios por traço nas idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias, obtidos de acordo com a norma NMX. C-083-14

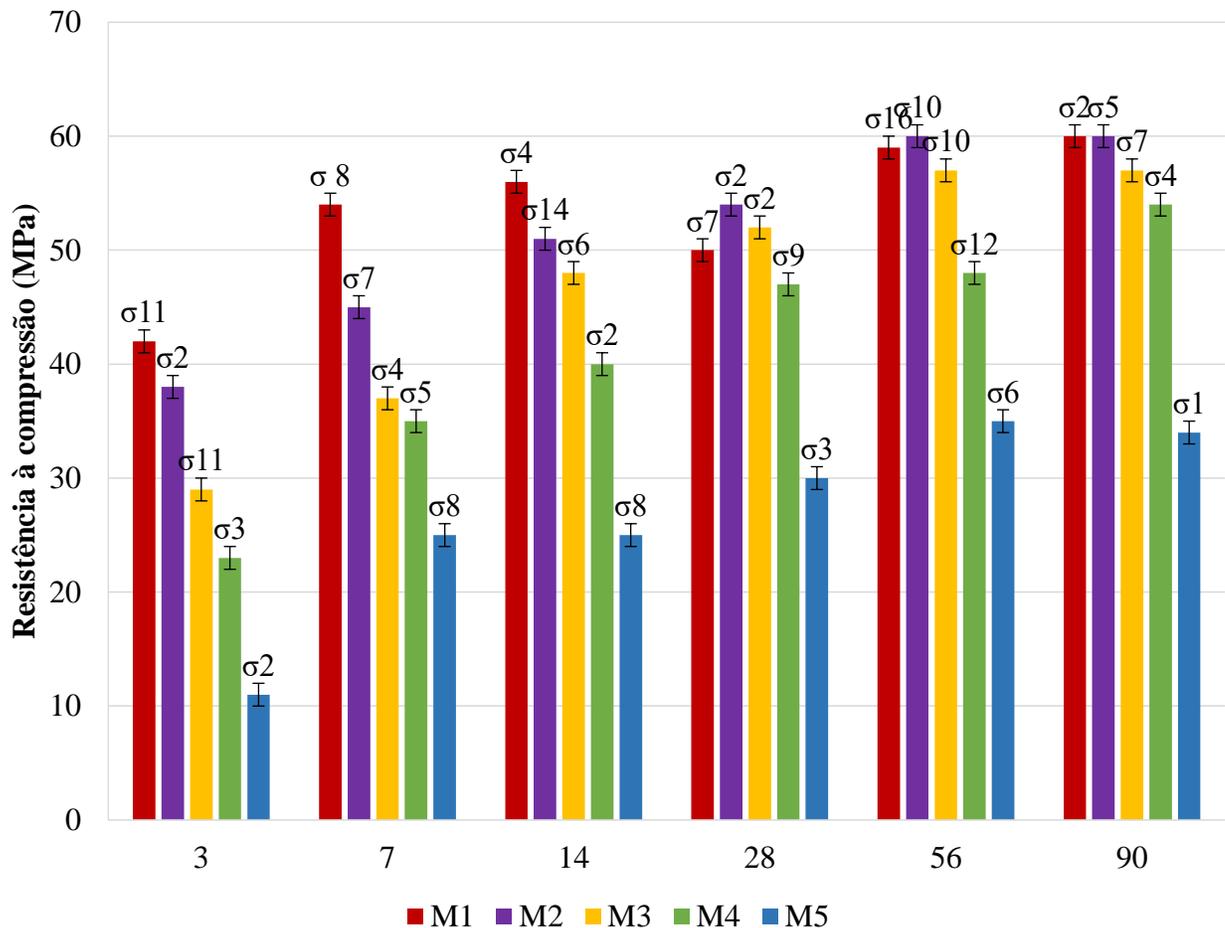


Figura 5. Resistência mecânica à compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5

De acordo com a Figura 6, a resistência à compressão em idades precoces (3 e 7 dias) das amostras com teor de cinzas volantes ativadas foi menor em comparação com as amostras de controle (0% de cinza volante ativada), entretanto, com a passagem do tempo aumentou gradualmente, comportamento associado à lenta reação pozolânica da cinza volante (Nath e Sarker, 2011, Mishra, 2017, Saha, 2018).

Os valores de resistência mecânica do traço M1 interromperam seu desenvolvimento após 56 dias com valores de 60 MPa. No caso dos traços M2 e M3 após 14 dias foram superiores a 45 MPa, enquanto M4 após 28 dias. O traço M5 apresentou valores de resistência aumentando com o tempo, mas, em todas as idades, a resistência mecânica foi menor que o restante dos traços, atingindo valores máximos de 35 MPa, este resultado é atribuído principalmente à falta de hidróxido de cálcio no traço (Saha, 2018), contribuído principalmente pelo cimento Portland, que neste caso o teor no traço M5 foi de 25% em relação ao peso total do material cimentício.

Os valores de resistência à compressão foram menores quanto maior o teor de cinzas volantes ativadas no traço, embora, aos 28 dias, os traços M2, M3 e M4 tenham excedido 45 MPa, valor de resistência mecânica considerado para concretos de alta resistência, de acordo com o Manual da Rede Durar.

Visando conhecer se existe ou não uma correlação entre as propriedades relatadas, são descritas as seguintes:

3.5 Resistividade Elétrica vs. Resistência Mecânica à Compressão

A Fig. 6 mostra o comportamento da resistividade elétrica em relação à resistência mecânica dos cinco traços após 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

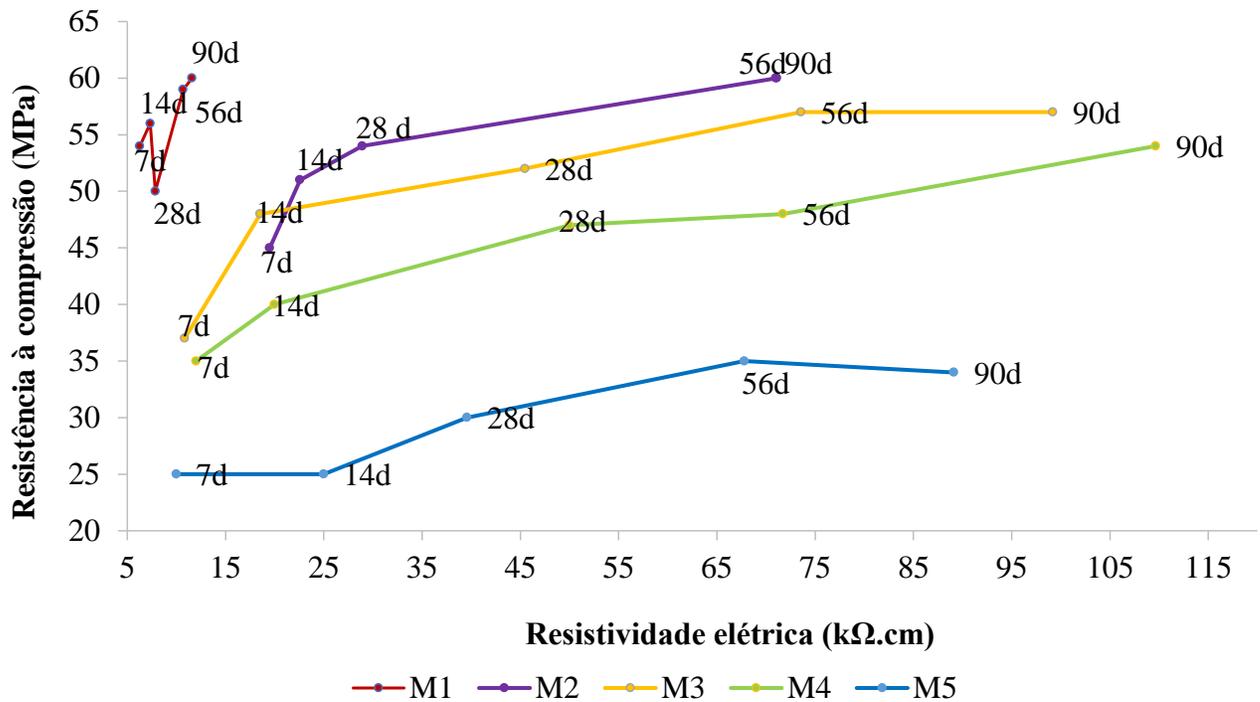


Figura 6. Resistividade elétrica vs. resistência mecânica à compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5 obtidas nas idades de 7, 14, 28, 56 e 90 dias

De acordo com a Fig. 6, o traço M1 apresentou valores de resistividade elétrica ascendente em relação à passagem do tempo, o valor inicial (7 dias) foi de 6 KΩ.cm e o final (90 dias) de 12 KΩ.cm. Quanto à resistência à compressão, a inicial foi de 54 MPa e a final de 60 MPa. Para este caso, embora tenha havido um aumento em ambos os parâmetros em relação ao tempo, não foi considerável como foi observado nos traços com teores de cinzas volantes ativadas (M2, M3, M4 e M5), onde ficou evidente que com o passar do tempo, a resistividade elétrica e resistência à compressão aumentaram. Este comportamento progressivo, nos traços com teores de cinzas volante, é atribuído ao benefício que a cinza volante proporciona na compactação do concreto em relação ao tempo.

Em todos os traços determinou-se que a evolução da resistividade é paralela à da resistência, comportamento também relatado por Andrade e D'Andrea (2011).

Considerando que a resistência mecânica à compressão considerada para um concreto durável deve ser de pelo menos > 45 MPa e uma resistividade elétrica > 50 KΩ.cm, as porcentagens que foram atingidas foram os traços com porcentagens de 30, 50 e 65% de CVA.

3.6 Velocidade de pulso ultrassônico vs. resistência mecânica

A Fig. 7 mostra o comportamento da compactação do concreto (VPU) em relação à resistência mecânica dos cinco traços após 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

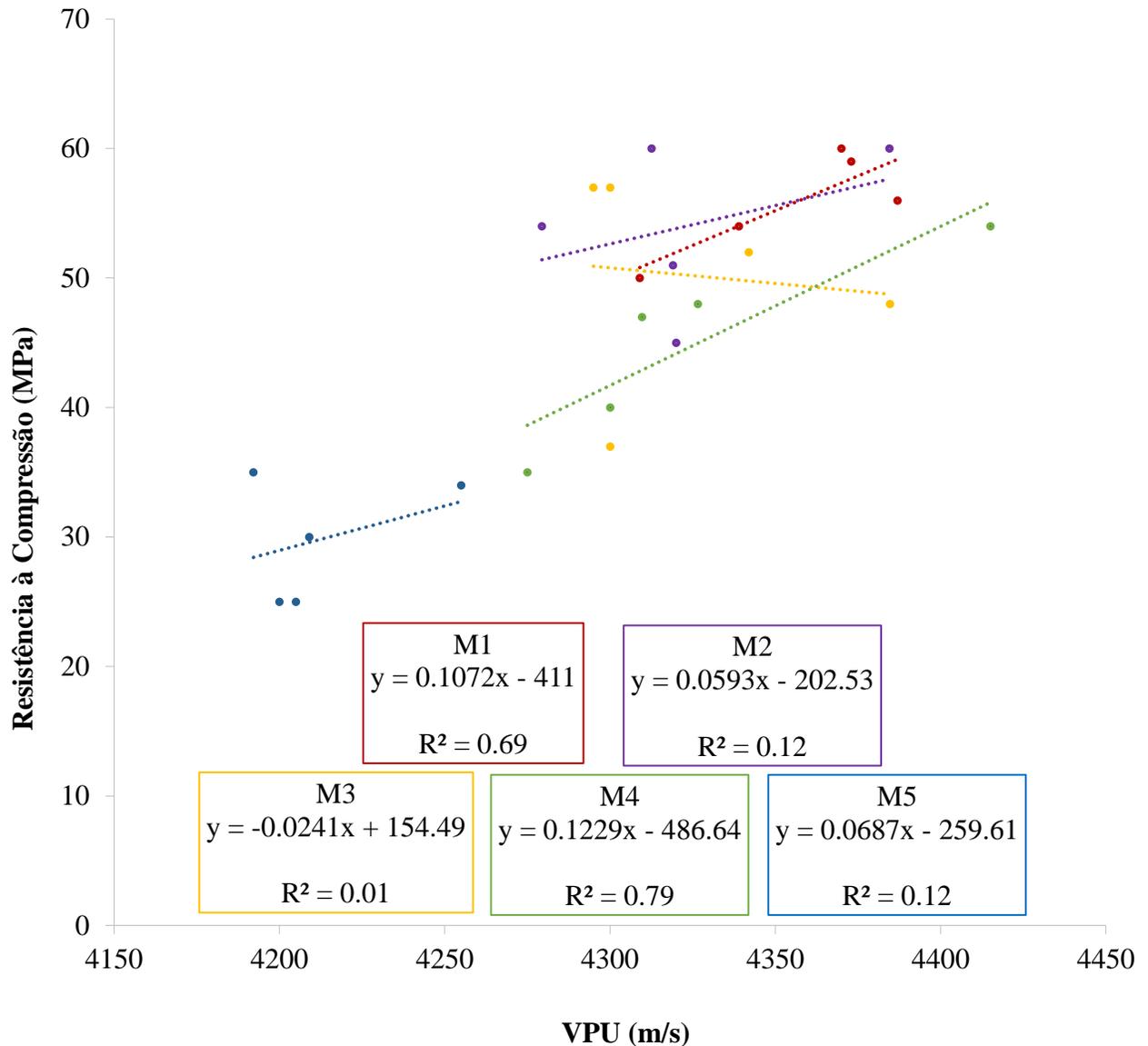


Figura 7. Velocidade de pulso ultrassônico vs. resistência mecânica de compressão dos traços M1, M2, M3, M4 e M5 obtidas nas idades de 7, 14, 28, 56 e 90 dias

De acordo com a Fig. 7, observa-se que os traços M1 e M2 foram fixados em valores superiores a 4275 m / s e 45 MPa em todas as idades testadas. No caso de M3 e M4 em todas as idades os valores VPU foram superiores a 4275 m / s, mas a resistência à 7 dias foi inferior a 45 MPa, valor que foi aumentado ao longo do tempo. Apenas para o caso do traço M5, os valores de resistência e VPU foram mais baixos em comparação com os traços com e sem substituição de cinzas volantes ativadas, atribuído ao elevado teor de substituição de cinzas volantes (75%) e a baixa quantidade de hidróxido de cálcio (25% CPC 40). A partir destes resultados, observa-se que valores de VPU menores do que 4250 m/s as resistências mecânicas obtidas foram mais baixas do que 35 MPa (M5) e, quando os valores de VPU excederam 4250 m/s resistências foram maiores do que 35 MPa. No entanto, observa-se que os valores de R² indicam que a taxa de pulso ultrassônico e a resistência mecânica à compressão não são proporcionais, portanto, é necessário avaliar cada parâmetro de forma independente.

3.7 Resistividade elétrica vs permeabilidade rápida ao íon cloreto

A Fig. 8 mostra que a resistividade elétrica se correlaciona com a resistência à penetração dos cloretos. Observou-se que quanto maior a resistividade elétrica, menor o nível de permeabilidade. Os traços com teor de cinzas volantes ativadas superaram os valores de resistividade elétrica em relação àquelas obtidas com M1 (traço sem cinza volante ativada) e, como consequência, o nível de permeabilidade foi menor. Considerando que a resistividade do concreto aumenta com o tempo devido ao refinamento da estrutura do poro (Andrade et al., 2009), a presença de cinzas volantes favoreceu o refinamento da estrutura do poro, resultando em menor permeabilidade

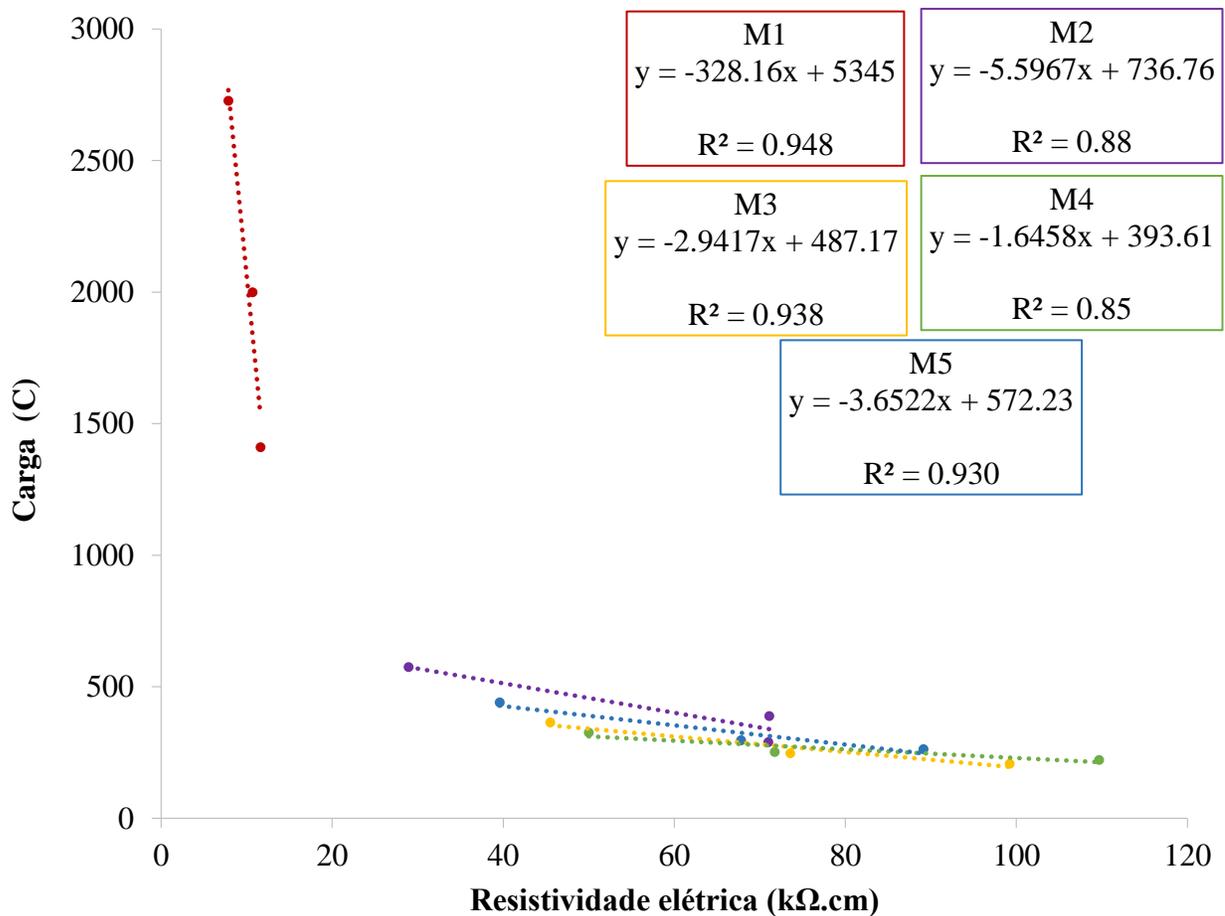


Figura 8. Resistividade elétrica vs permeabilidade rápida ao íon cloreto de M1, M2, M3, M4 e M5 obtidos nas idades de 28, 56 e 90 dias

4. CONCLUSÕES

1. O uso de cinzas volantes ativadas como material de substituição para o cimento Portland CPC 40 em traços de concreto favorece o aumento da resistividade elétrica, portanto, o transporte de agentes agressivos é muito menor do que no traço sem a adição de cinza volante ativada.
2. O nível de permeabilidade do íon cloreto nos traços de concreto com substituição de cinzas volantes foi muito baixo, isto expressa que a cinza volante, submetida a um tratamento químico e mecânico, é favorável para se atingir materiais que não são muito permeáveis a este íon, o que beneficia sua durabilidade.

3. O comportamento da resistência mecânica dos traços com porcentagens de 30, 50 e 65% de cinza volante ativada após 28 dias foi superior a 45 MPa, isso sugere que é possível fabricar concreto com desenvolvimento sustentável para o setor de a construção que não requer altas resistências em idades precoces.
4. O comportamento eletroquímico do aço da armadura incorporada nos traços descritos, a resistência aos sulfatos e a caracterização dos produtos de reação estão sendo estudados atualmente, resultados que serão relatados em trabalhos futuros

5. REFERÊNCIAS

- Al-Amoudi, O., Maslehuddin, M., and Asi, I. "Performance and Correlation of the Properties of Fly Ash Cement Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 71-77, DOI: <https://doi.org/10.1520/CCA10153J>. ISSN 0149-6123
- Andrade C., D'Andrea R., (2011), "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista ALCONPAT, V.1, No.2, pp. 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Andrade C., d'Andréa R., Castillo A., Castellote M. (2009), *The use of electrical resistivity as NDT method for specification the durability of reinforced concrete*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd
- ASTM International. (2002). *ASTM C597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- ASTM International. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0642-13>
- ASTM International. (2015). *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM International. (2015). *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- Chandra Debanath, O., Saiful Islam, Md., Moinul Islam, Md. (2015), "Use of Geopolymer Concrete as Green Construction Material- A Review", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE 2015) 26 – 29 November, 2015, Chittagong, Bangladesh
- Garcés, P., Zornoza, E., Baeza, F., Galao, O., Payá, J. (2012), "¿Es compatible la durabilidad con la sostenibilidad en la industria de la construcción?", ALCONPAT, V.2, No.2, pp. 57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2 i2.27>
- Hela R., Orsáková, D., (2013), "The Mechanical Activation of Fly Ash", Procedia Engineering V.65, pp. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.016>
- Heidrich, C., Joachim Feuerborn H., Weir, A. (2013), "Carbon combustion products: a global perspective". World Conference of Coal Ashes, pp. 22-25. URL: <http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>
- Hemalatha T., Ramaswamy Ananth, (2017), "A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete", Journal of Cleaner Production, V.147, pp. 546-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Madhavi T. Ch., Swamy Raju L., Mathur Deepak, (2014) "Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete", Journal of Civil Engineering Research, V. 4, pp. 7-11. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201401.02.html>

- Lizarazo Marriaga, J., García, F., Higuera Flórez, C. (2015), “*Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química*”, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, V. 35, No.2, pp. 305-314. eISSN: 2244-7113
- Malhotra, V. M., (1990), “*Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash*”, Cement and Concrete Composites, Volume 12, Issue 4, Pages 271-277, DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90006-J)
- Malhotra V. M. (1985), “*Métodos no destructivos para evaluar concreto*”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Moffatt, E., Thomas, M., Fahim. A. (2017) “*Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment*”, Cement and Concrete Research, V.102, pp. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.008>
- Mehta K. (2001), “*Reducing the environmental impact of concrete*”, Concrete International, pp. 61-66. URL: <http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>
- Mehta, K. (2002), “*Greening of the concrete industry for sustainable development*”, Concrete international, 24 (7) pp. 23-28.
- Mishra, D. K., Yu, J., Leung, C. K. Y. (2017), “*Very high volume fly ash green concrete for applications in India*”, Global Waste Management, International Society of Waste Management, Air and Water. pp. 480-487.
- Mittal A., Kaisare M.B., Shetti R., “*Experimental Study on use of fly ash in concrete*”, Tarapur Atomic Power Project 3 & 4, Nuclear Power Corporation of India Limited URL: https://www.sefindia.org/forum/files/experimental_study_on_use_of_fly_ash_in_concrete_by_m_r_amit_mittal_136.pdf
- .Mucsi, G. (2016), “*Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review*”, Journal of Silicate Based and Composite Materials, V. 68, No. 2, pp. 56-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- Nath, P., Sarker, P. (2011) “*Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*”, Procedia Engineering V.14, pp. 1149-1156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- NMX-C-148-ONNCCE (2010) “*Industria de la Construcción-Cementos hidráulicos Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulicos*”.
- NMX C-083 (2014) “*Industria de la Construcción Concreto Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Método de Ensayo*”.
- NMX-C-159-ONNCCE (2016) “*Concreto, elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*”.
- NMX-C514 (2016) “*Industria de la Construcción Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico Especificaciones y Métodos de Ensayo*”.
- Palomo, A., Grutzeck, M., Blanco, M., (1999), “*Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*”, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 8, August, Pages 1323-1329, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- DURAR (1998), “*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*”, Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática Durabilidad de la armadura. 2a Edición
- International Energy Agency (2014), “*The Impact of Global Coal Supply on Worldwide Electricity Prices*”. Report by the IEA Coal Industry Advisory Board, pp. 55, URL: https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ImpactGlobalCoalSupply_WorldwideElectricityPrices_FINAL.pdf

- Saha, K. A. (2018) “*Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*”, Sustainable Environment Research, Volume 28, Issue 1, January, Pages 25-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Sahoo S., (2016), “*A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength*”, Journal of Basic and Applied Engineering Research, Volume 3, Issue 10; July-September 2016, pp. 883-887. e-ISSN: 2350-0255, <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html>
- Yu, J., Lu, C., Leung C. K. Y., Li, G. (2017). *Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash*. Construction and building materials, 147, pp. 510-518. [Online] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- Zobal, O., Reiterman P., Plachý, T., Bittnar, Z. (2017), “*Durability of Concrete with Fly Ash from the Dam Orlik after 55 Years*”, Advanced Materials Research, V.1144, pp. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1144.81>