

INFLUÊNCIA DE POZOLANAS DE ALTA REATIVIDADE NO FATOR DE IDADE DO MODELO DE VIDA ÚTIL DE ANDRADE (2004)

Lígia Vitória Real (Doutoranda, Engenheira Civil, USP); ligivr@usp.br
Marcelo Henrique Farias Medeiros (Professor Doutor, UFPR)
Gustavo Bortolan Rivarola (Engenheiro Civil, UFPR/PPGECC)

Resumo: A preocupação com a construção de estruturas mais sustentáveis e o crescimento dos custos de manutenção têm motivado a comunidade científica a desenvolver modelos de estimativa de vida útil de estruturas de concreto. Neste trabalho estudam-se adições de pozolanas de alta reatividade, restringindo-se à sua influência sobre o fator de idade (q) do modelo proposto por Andrade (2004) ao caso de ataque por íons cloreto. Neste modelo, a resistividade elétrica superficial do concreto (RES) é o parâmetro fundamental, onde o fator de idade indica o quanto a RES irá crescer ao longo do tempo. Três diferentes adições ao traço de referência foram testadas, a saber: sílica ativa, sílica de casca de arroz e metacaulim – com o objetivo de analisar suas influências sobre “ q ” e seu desenvolvimento ao longo do tempo. Observou-se incremento de “ q ” bem como de RES sobre o traço de referência. Observou-se redução de “ q ” ao longo do tempo para os traços de sílica ativa e de sílica de casca de arroz. Já o traço de referência e o de metacaulim apresentaram tendência de estabilização de “ q ” ao longo do tempo.

Palavras-chave: modelo de vida útil de estruturas de concreto, adições minerais de alta reatividade pozolânica, fator de idade, resistividade elétrica superficial.

THE INFLUENCE OF POZZOLANS OF HIGH REACTIVITY ON THE AGE FACTOR OF THE SERVICE-LIFE ESTIMATION MODEL PROPOSED BY ANDRADE (2004)

Abstract: The concern about construction of more sustainable structures and the growth of maintenance costs have motivated the scientific community to develop models of service-life estimation for concrete structures. In this paper, additions of pozzolans of high reactivity are

being studied, restricted to their influence on the age factor (q) of the model proposed by Andrade (2004) to the case of chloride ions attack. In this model, the surface electrical resistivity of the concrete (SER) is the fundamental parameter, where “ q ” indicates how much SER will grow over time. Three different additions to the reference mix were tested, namely: active silica, rice husk silica and metakaolin – aiming to analyze their influence on “ q ” and its development over time. Increase of “ q ” as well as of SER over the reference mix was shown. “ q ” reduction was observed over time for the mixes of active silica and rice husk silica. However, the baseline mix and metakaolin showed a tendency to stabilize “ q ” over time.

Keywords: service-life estimation model for concrete structures, high pozzolanic reactivity mineral additions, age factor, surface electrical resistivity.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento de custos com manutenção e recuperação de estruturas de concreto tem despertado o interesse na questão da durabilidade. No Brasil, a norma de desempenho estabelece uma vida útil de projeto mínima de 50 anos. Visando atender essa necessidade, as normas NBR 12655 (ABNT, 2015) e NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelecem critérios relacionados à classe de agressividade ambiental, ao cobrimento mínimo de armadura, à composição do traço (consumo mínimo de cimento e máxima relação água/aglomerante), ao limite de abertura de fissuras, às formas arquitetônicas e aos dispositivos de drenagem, como por exemplo, a presença de pingadeiras.

A fim de quantificar a vida útil das estruturas de concreto armado sujeitas a corrosão na presença de cloretos, Andrade (2004) desenvolveu um modelo de vida útil que tem como principal parâmetro a resistividade elétrica superficial. O método foi desenvolvido e vem sendo estudado pelo grupo de pesquisa de durabilidade do concreto do Instituto de Ciência da Construção Eduardo Torroja, em Madrid, na Espanha. Recentemente, o modelo foi aplicado para o desenvolvimento do concreto para duplicação do Canal do Panamá, pois as autoridades responsáveis pela ampliação exigiram vida útil de 100 anos para os elementos estruturais de concreto armado (ANDRADE *et al.*, 2013).

A norma UNE 83988-2 (AENC, 2014) define a Resistividade Elétrica Superficial (RES) do concreto saturado como uma medida indireta de conectividade e tamanho dos poros e para um concreto não saturado, indica o grau de saturação do material. Ou seja, a

RES depende da estrutura de poros do concreto e da composição química da solução aquosa que os preenche. A continuidade dos poros assegura a movimentação de carga elétrica no concreto (BRAMESCHUBER *et al.*). Como o uso de adições pozolânicas gera refinamento e melhor distribuição dimensional de poros, bem como reduz a quantidade de íons presente na solução dos poros, contribui para a redução da condutividade elétrica, causando incremento direto na RES (HOPPE, 2005).

A influência das adições minerais no traço já foi observada em comparações de RES dos cimentos brasileiros CPIV32, CPIII40RS, CPIIF32 e CPV ARI no estudo de Medeiros Jr *et al.* (2014), onde os resultados apontaram as maiores RES para as amostras do CP III 40 RS, com alto teor de escória de alto forno. Santor (2011) também avaliou que provavelmente a adição mineral contribui com a redução da condutividade através do refinamento dos poros do concreto, refletindo em um aumento da RES medida.

Neste contexto apresentado, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da sílica ativa, metacaulim e sílica de casca de arroz no fator de idade, necessário para o emprego do modelo de vida útil de Andrade (2004).

1.1 Modelo de previsão de vida útil proposto por Andrade (2004)

O tempo de vida útil considerando o processo de corrosão em estruturas de concreto armado pode ser dividido em duas partes: iniciação e propagação. O período de iniciação ou de despassivação ocorre a partir do momento em que o agente agressivo penetra na superfície do concreto até o início da corrosão. O período de propagação consiste no desenvolvimento do processo corrosivo até o fim do grau aceitável desse fenômeno (TORRES, 2011). O Modelo de Andrade leva em consideração os dois períodos denominados: t_i e t_p . Entretanto este trabalho trata apenas do tempo de iniciação. De acordo com Andrade (2004) pode-se considerar t_i , o tempo de iniciação, como critério limite de vida útil assumindo a forma da Equação 1.

$$t_i = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q}{K_{Cl}} \cdot r_{Cl} \quad (1)$$

Onde: t_i = tempo de iniciação (em anos); x = profundidade de penetração da concentração limite de cloretos (pode ser considerado como o recobrimento da armadura); ρ_{ef} = resistividade elétrica superficial da primeira medição realizada para determinação do fator de idade (q); t_0 é a idade de cura do concreto quando da primeira tomada de medição

de RES utilizada para determinação de “q”; t, por sua vez é a correspondente idade quando da última medição de RES; q = fator de idade; r_{cl} = fator de reação; e K_{cl} = fator ambiental.

Foco do presente trabalho, o fator de idade representa o progresso da hidratação do cimento ao longo do tempo, o refinamento dos poros e o conseqüente aumento da RES (ANDRADE & D’ANDREA, 2010; MEDEIROS JR., 2014). É calculado através da Equação 2, a qual permite observar sua íntima ligação à RES, representando o quanto ela ainda será aumentada no decorrer do tempo.

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \quad (2)$$

Onde: ρ_t = resistividade elétrica em qualquer idade; ρ_0 = resistividade elétrica na primeira medição; t é a idade da última medição; t₀ é a idade da primeira medição e “q” é o fator de idade.

Graficamente o fator de idade pode ser obtido diretamente pela inclinação da curva de regressão, plotada em escala logarítmica, do inverso da resistividade em função do tempo, onde “-q” é o expoente da equação (ANDRADE & D’ANDREA, 2010).

2. METODOLOGIA

Visando avaliar o efeito de adições minerais de alta reatividade pozolânica foram realizadas medidas de RES pelo método de Wenner em quatro diferentes traços descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Traços unitários em massa

Traço	CPV ARI	Sílica Ativa	Sílica de Casca de Arroz	Metacaulim	Areia	Brita 1	a/a	Aditivo (%)
TCPV	1	-	-	-	2,25	3	0,45	1,8
TSA	0,9	0,1	-	-	2,25	3	0,45	1,8
TSCA	0,9	-	0,1	-	2,25	3	0,45	1,3
TM	0,9	-	-	0,1	2,25	3	0,45	1,9

a/a – relação água/aglomerante

As composições das misturas partiram do traço de referência (TCPV), sem qualquer tipo de adição. Os traços com pozolanas tiveram 10% do cimento, em massa, substituído pelos respectivos materiais cimentícios suplementares, a saber: sílica ativa, sílica de casca de arroz e metacaulim.

O consumo de cimento foi padronizado em 360kg/m³, o fck mínimo em 40MPa e a relação água/aglomerante em 0,45, o que atende aos parâmetros de garantia mais rígidos quanto à classe IV de agressividade descritos na norma NBR12655 (ABNT, 2015). As Tabelas 2 e 3 mostram a caracterização física e química do cimento utilizado neste programa experimental.

Tabela 2: Características físicas do CPV ARI

Massa Específica (g/cm ³)	Tempo de pega		BET (m ² /g)	Resistência à compressão (MPa)				observação
	Início	Fim		1d	3d	7d	28d	
3,12	2h47	3h23	1,070	22	37,9	43,3	51,15	adição ≤ 5% filer calcário

Dentre os cimentos fabricados no estado do Paraná, o CPV ARI é o mais puro, pois contém o menor teor de adições, observado na Tabela 2 – por esta razão foi escolhido para compor os traços estudados nesta pesquisa.

Tabela 3: Características químicas do CPV ARI

Características Químicas (%)					
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃
18,63	2,63	60,64	2,85	4,83	4,33
Perda ao fogo	CaO livre	Resíduo Insolúvel	Equivalente alcalino	Teor de C ₃ A	
2,89	0,92	0,66	0,61	7,00	

O critério de escolha das adições cimentícias suplementares priorizou as de alta reatividade pozolânica. Apresentam-se nas Tabelas 4 e 5, os resultados dos ensaios de caracterização das adições minerais. Foram realizados os ensaios: Chapelle modificado (ABNT, 2010), análise química através da fluorescência de raios X; massa específica (ABNT, 2017) e área específica pelo método de BET.

Tabela 4: Massa específica e atividade pozolânica das adições

Adição Mineral	Massa Específica (g/cm ³)	BET (m ² /g)	Chapelle Modificado (mg Ca(OH) ₂ /g amostra)
Metacaulim	2,5	23,258	1193
Sílica ativa	2,18	20,238	1542
Sílica de casca de arroz	2,12	14,692	1336

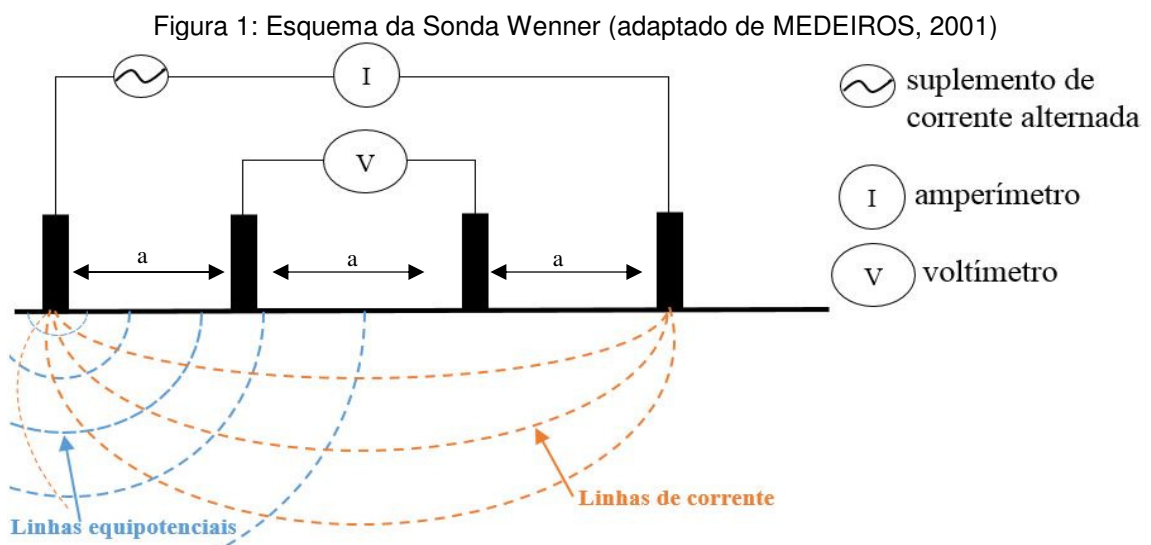
Tabela 5: Análise química por fluorescência de raios X das adições minerais

Adição Mineral	Composição Química (%)								
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₆	TiO ₂	K ₂ O	MgO
Metacaulim	57,8	3,9	0,14	1,63	46,05	-	2,22	-	-
Sílica ativa	92,49	0,13	0,51	2,08	1,91	-	-	2,76	-
Sílica de casca de arroz	88,94	0,11	1,1	2,08	2,42	0,24	-	4,18	-

Foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração com o objetivo de se obter a mesma trabalhabilidade em todos os traços. Os agregados utilizados foram areia natural de quartzo e brita1 de origem granítica.

2.1 Ensaio de resistividade elétrica superficial

Conforme mencionado anteriormente, o método utilizado para avaliar as RES dos diferentes traços foi o de Wenner. Nesse ensaio, a resistividade elétrica superficial da amostra é obtida através da medição da voltagem decorrente da indução de uma corrente conhecida através do corpo de prova. A Figura 1 mostra um esquema do equipamento de medição de RES pelo método de Wenner que segue o procedimento da norma UNE 83988-2 (AENC, 2014).



A indução da corrente e leitura da voltagem são feitas com o auxílio de um equipamento que possui quatro eletrodos alinhados a uma distância fixa (a) conhecida, que em contato com o corpo de prova imprime uma corrente conhecida entre os dois eletrodos externos. A voltagem consequente é captada pelos eletrodos internos (MEDEIROS 2001). O espaçamento (a) entre os eletrodos do equipamento de medição de RES foi igual a 50mm, frequência igual a 40Hz e corrente variando entre 10 a 200 μ A. Até o momento das leituras, as amostras permaneceram em câmara úmida, garantindo saturação do concreto conforme requisito da UNE 83988-2 (AENC, 2014). As medições foram realizadas nas idades de 7, 28, 56, 91, 154, 273, 364 e 400 dias de idade.

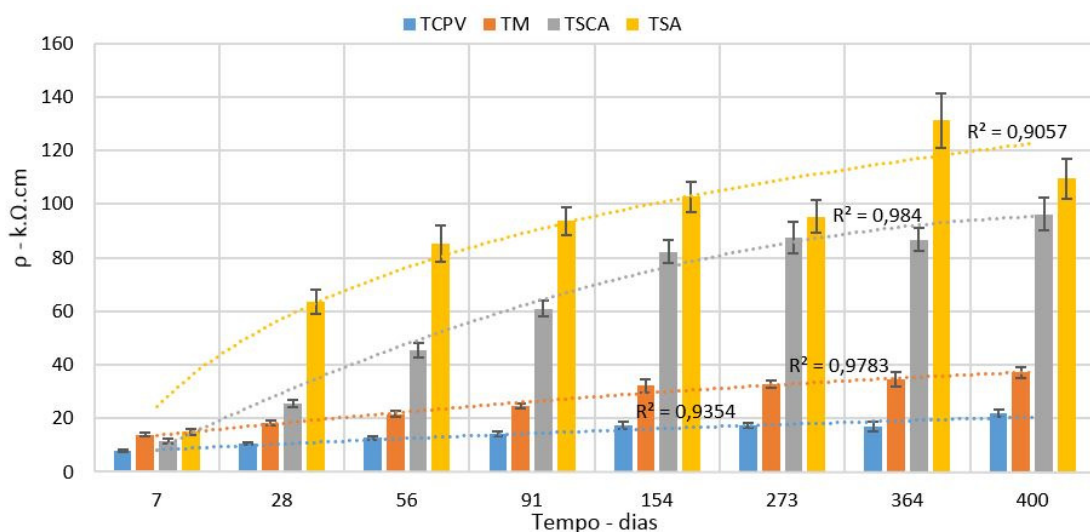
Observando as recomendações de Medeiros (2001), Gowers & Millard (1999), Lencioni & Lima (2010), optou-se por moldar cubos de aresta de 250mm, maiores do que o prescrito na norma europeia a fim de simular um meio semi-infinito e conseqüentemente não haverá influência da geometria da peça sobre a leitura de resistividade. Foram moldados 5 corpos de prova por amostra, sendo tomadas 6 medidas, uma em cada face, totalizando 30 leituras por traço.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistividade elétrica superficial

Apresentam-se na Figura 2 os resultados de RES ao longo do tempo para cada pozonala avaliada. Depois da sílica ativa, a sílica de casca de arroz foi a pozolana que mostrou maior capacidade de elevação da resistividade elétrica do concreto. O traço referencia com cimento CPV ARI foi o que menos aumentou ao longo do tempo, tendo desenvolvido sua capacidade de reação praticamente completa nas primeiras idades. Todas as 3 pozolanas testadas apresentaram capacidade de aumentar a resistividade do concreto, indicando serem adições que dificultam o avanço do processo de corrosão, caso ela seja iniciada.

Figura 2: Evolução da RES ao longo do tempo em função da influência das adições pozolanicas testadas

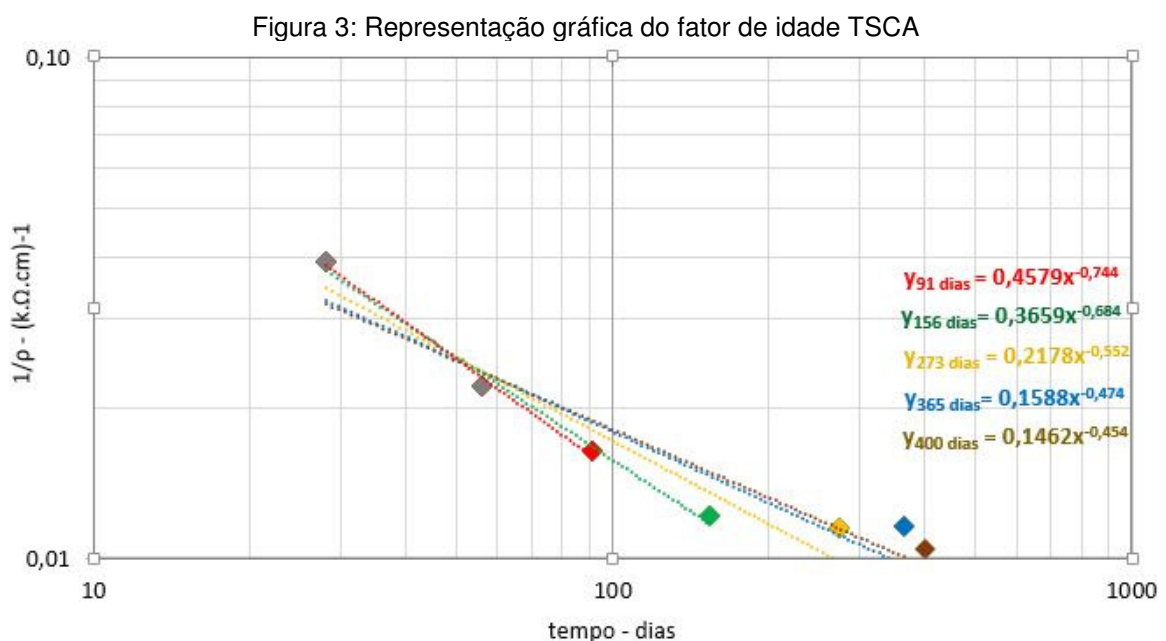


Todas as linhas de tendência de crescimento logarítmico apresentaram coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,90. Comparando todas as adições testadas, o

crescimento mais acentuado da RES foi observado para o traço com adição de sílica ativa. As barras de erro representam o desvio padrão de uma população de 30 dados.

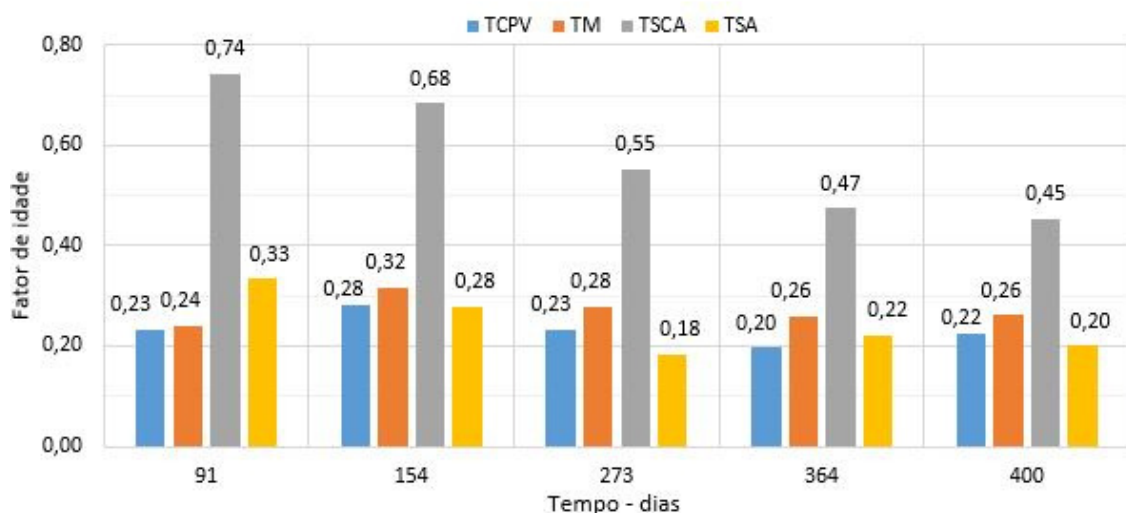
3.2 Fator de idade

A Figura 3 exemplifica para o traço TSCA, a representação gráfica para diferentes idades de cura (t), respectivamente iguais a 91, 154, 273, 364 e 400 dias. Todos os cálculos foram feitos tomando-se a idade da primeira leitura de RES em $t_0 = 28$ dias.



Para os traços em estudo, a Figura 4 representa a evolução dos valores de “q” obtidos para as diversas idades de cura.

Figura 4: Evolução do fator de idade por traço



Observa-se a tendência de redução do fator de idade para os traços com as adições de sílica ativa e de sílica de casca de arroz com a tendência mais acentuada para este último. Por outro lado, para o traço de referência e para o traço com adição de metacaulim ocorreu uma estabilidade de resultados com leve tendência de crescimento aos 154 dias.

O traço de referência apresentou o menor dentre todos os valores do fator de idade. Pelo fato do CPV-ARI possuir alta finura, alta superfície específica e reatividade, as reações de hidratação ocorrem de maneira mais rápida, justificando-se os valores obtidos.

As adições minerais, como observado nos resultados, tendem a aumentar o fator de idade do concreto, porém observa-se que isso não acontece com o metacaulim. Por se tratar de uma adição mineral com teor de 46% de Al_2O_3 , rica em alumínio, ela reage muito rapidamente com o hidróxido de cálcio presente na mistura formando aluminatos de cálcio hidratados (AMBROISE *et al.*, 1994; BARATA, 1998). O traço TSA também apresentou baixo fator idade, provavelmente pela sílica ativa ser a adição mais reativa dentre as demais no presente estudo. Assim as reações ocorreram de forma mais intensa logo nas primeiras idades. Paralelamente, observa-se que este traço se destacou por apresentar elevada resistividade já aos 28 dias.

Deve-se observar que de acordo com a Equação 1, quanto maior o fator de idade, maior o tempo de iniciação estimado de acordo com Andrade (2004). Isso significa que os dados deste trabalho mostram que a adição de sílica de casca de arroz foi a adição que teve maior contribuição do fator de idade para aumento do tempo de iniciação do concreto armado.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta como considerações finais:

- A resistividade elétrica superficial foi influenciada pelo uso de adições pozolânicas no concreto, sendo as séries organizadas em ordem crescente de RES:TCPV < TM < TSCA < TSA;
- A sílica de casca de arroz apresentou os maiores valores de fator idade entre as séries testadas neste experimento. Esta adição indicou uma redução do fator de idade ao longo do tempo de cura, mostrando que este fator de entrada no modelo vida útil pode sofrer alterações em função do tempo usado para seu cálculo;

- As séries de referência com metacaulim apresentaram tendência de aumento do fator de idade até 154 dias e a partir de 273 dias mostrou estabilidade deste parâmetro.

REFERÊNCIAS

AMBROISE, J.; MAXIMILIEN, S.; PERA, J. Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**, v.1(4), p. 161-168, mai. 1994.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity. In: INTERNATIONAL RILEM SYPOSIUM ON CONCRETE SCIENCE AND ENGINEERING: A TRIBUTE TO ARNON BENTUR, 2004. **Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering**, J. Weiss, K. Kovler, J. Marchand, and S. Mindess, RILEM Publications S.A.R.L., 2004. p. 23 - 30.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modeling of service life of reinforced concrete structures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SERVICE LIFE DESIGN FOR INFRASTRUCTURES, n. 2, 2010, Delft. **2nd International symposium on service life design for infrastructure**. Bagnaux: K. van Breugel, Guang Ye, Yong Yuan, RILEM Publications S.A.R.L., 2010. P. 379 - 388.

ANDRADE, C.; REBOLLEDO, N.; CASTILLO, A.; TAVARES, F.; PÉREZ, R.; BAZ, M. Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y la resistencia a la difusión de cloruros. **REVISTA ALCONPAT**, Mérida, v. 4, n. 2, p. 96 - 112, Mai. 2014.

ASSOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN E CERTIFICACIÓN. **UNE 83988-2: Durabilidade del hormigón - métodos de ensayo - determinación de la resistividad eléctrica - parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner**. Madrid, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2017.

BARTATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. 1998. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BRAMESCHUBER, W.; RAUPACH, M.; SCHRÖEDER, P.; DAUBERSCHMIDT, C. Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NON DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING, 2003, Berlin. **International symposium non-destructive testing in civil engineering**, Berlin, 2003. p. 1 - 8.

GOWERS, K. R; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique. **ACI material Journal**, v. 96-M66, p. 536-541, 1999.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G de. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto - estado-da-arte. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, n. 6, Córdoba, 2010 **VI congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas**, anais, Córdoba, 2010.

MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, Guimarães, v.12. 2001.

MEDEIROS JR., R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 4, n. 2, p 113 - 128, mai. 2014.

SANTOR, M. S. **Influência de materiais de proteção superficial na resistividade elétrica e na absorção capilar do concreto.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise.** 2011. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.