

III-072 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS COMPOSTOS COM RESÍDUOS AGRO- INDUSTRIAIS

Fábio Dischkaln do Amaral ⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela UNIFRA. Mestre em Construção Civil e Preservação Ambiental UFSM/PPGEC.

Antonio Luiz Guerra Gastaldini, ⁽²⁾

Professor Titular da Universidade Federal de Santa Maria

Mirdes Fabiana Hengen ⁽³⁾

Mestre em Construção Civil e Preservação Ambiental – UFSM/PPGEC

Renan Gustavo Scherer ⁽⁴⁾

Mestrando em Construção Civil e Preservação Ambiental – UFSM/PPGEC

Laura Hubber Antes ⁽⁵⁾

Engenheira Civil – UFSM

Endereço ⁽¹⁾: Rua Arthur Milani 808, Apto 503. Centro CEP: 98400-000 Frederico Westphalen - RS.- e-mail: fabio_amaral@ymail.com

RESUMO

Neste trabalho investigou-se a resistividade elétrica de concretos compostos com diferentes adições minerais, argila calcinada, escória de alto forno e cinza de casca de arroz, em misturas ternárias e quaternárias, de acordo com o método dos quatro eletrodos (Wenner), dos 7 aos 91 dias. A resistência à compressão também foi avaliada nas mesmas relações a/ag, 0,35, 0,50 e 0,65 para idade de 28 dias. Dos resultados obtidos constatou-se que a resistividade elétrica aparente aumentou com a redução da relação água/aglomerante e aumento no grau de hidratação. Quando comparado ao concreto de referência as misturas ternárias e quaternárias apresentaram acréscimos nos valores de resistividade elétrica que variaram entre 22% e 40% e para resistência à compressão de 9% a 31%. Para um mesmo nível de resistência à compressão e mesma relação a/ag a mistura quaternária apresentou melhor desempenho do que a ternária.

PALAVRAS-CHAVE: Argila calcinada, cinza de casca de arroz e escória de alto forno.

INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional tem sido responsável pela demanda cada vez maior por produtos e serviços, que por sua vez induz ao crescimento das atividades industriais e consequente consumo de materiais.

A indústria do cimento tem sido foco de preocupações, devido ao impacto ambiental gerado em seu processo produtivo que no passado, conforme Mehta e Monteiro (2008), liberava uma tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer produzido e nas fábricas mais modernas essa relação é de aproximadamente 0,7 t CO₂/ t clínquer. No Brasil, no ano de 2014, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, foram produzidos aproximadamente 71 milhões de toneladas. Portanto, qualquer alternativa que possibilite a redução no consumo de cimento, sem prejuízo de suas qualidades técnicas, contribui para a sustentabilidade das construções.

Assim, contribui para essa redução a substituição parcial do cimento por adições minerais. Para cada tonelada de aço produzido resulta em aproximadamente 360 kg de escória e para cada tonelada de arroz resulta em 200 kg de casca, que quando queimada resulta em 40 kg de cinza. Dessa forma, além da contribuição ambiental essas adições possibilitam redução de custo, preservam as jazidas minerais e promovem alterações nas características de durabilidade do concreto, sendo em alguns casos mandatório a sua utilização para garantia da integridade das estruturas de concreto, Neville (1997).

A incapacidade do concreto de exercer sua função protetora tem como consequência a corrosão das armaduras. Após iniciada, a velocidade do processo corrosivo será função da disponibilidade de oxigênio e da resistividade-

de elétrica do concreto, Mehta e Monteiro (2008).

A resistividade elétrica é a medida da dificuldade com que íons se movimentam no interior do concreto. Dessa forma, é uma propriedade passível de ser empregada como medida da durabilidade das estruturas, pois antes de iniciado o processo corrosivo serve como medida da facilidade de ingresso do CO₂ e íons cloreto, e depois de iniciada a corrosão serve como medida da velocidade de avanço da mesma, Andrade e Gonzales (1998), Andrade et al (2014), Sengul (2014).

O principal objetivo deste trabalho foi de investigar a resistividade elétrica e a resistência à compressão de concretos compostos com escória de alto forno, argila calcinada e cinza de casca de arroz em misturas ternárias e quaternárias. As misturas foram avaliadas também em igualdade de resistência à compressão, por ser o parâmetro tomado como referência no dimensionamento das estruturas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais Utilizados

Cimento: cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), com massa específica = 3,16 g/cm³ e finura # 0,075 mm = 0,22%. Adição Mineral: argila calcinada (AC) a 600°C por 1 hora e moída por duas horas; escória de alto forno (EAF) procedente de siderúrgica nacional e cinza de casca de arroz (CCA) obtida com queima controlada, com teor de carbono grafítico de 0,4%.

Agregados - miúdo: areia natural, quartzosa, lavada para retirada de impurezas, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm, com módulo de finura 1,85, dimensão máxima característica de 1,2 mm, massa específica de 2,65 kg/dm³ e massa unitária de 1,62 kg/dm³; Graúdo : pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara/RS, com módulo de finura de 6,92, dimensão máxima característica de 19 mm, massa específica de 2,48 kg/dm³ e massa unitária de 1,38 kg/dm³.

Misturas investigadas

Foram investigadas quatro misturas aglomerantes, sendo uma composta com 100% de cimento, denominada REF, duas misturas ternárias compostas com 20% de argila calcinada e 5% e 10% de escória de alto forno denominadas 5 EAF e 10 EAF respectivamente; e uma mistura quaternária composta com 5% de escória de alto forno, 5% de cinza de casca de arroz e 15% de argila calcinada denominada 5 CCA.

O abatimento especificado de 100 ± 10 mm foi conseguido em algumas misturas à custa de aditivos plastificante e superplastificante. Na Tabela 1 é apresentado o consumo de materiais por m³ de concreto.

Tabela 1 - Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto.

Mistura	Relação a/ag	Ag	Cim	AC	CCA	EAF	Areia	Brita	Água	Adit. Plast.	Adit. Super.
		Kg.m ⁻³									
REF	0,35	488	488	-	-	-	634	1077	171	1,46	-
	0,50	359	359	-	-	-	740	1057	180	-	-
	0,65	284	284	-	-	-	804	1045	185	-	-
5 EAF	0,35	487	366	97	24	-	614	1077	171	4,87	2,92
	0,50	359	269	72	18	-	728	1055	179	3,23	-
	0,65	284	213	57	14	-	794	1044	184	1,7	-
10 EAF	0,35	487	341	97	49	-	614	1076	170	4,87	2,44
	0,50	359	251	72	36	-	728	1055	179	2,87	-
	0,65	284	199	57	28	-	794	1043	184	1,42	-
5 CCA	0,35	487	366	73	24	24	609	1077	171	4,87	2,19
	0,50	359	269	54	18	18	725	1055	179	3,23	-
	0,65	284	213	43	14	14	791	1044	184	1,13	-

ENSAIOS

A determinação da resistência à compressão axial foi realizada em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm de acordo com as normas ABNT NBR 5738 e 5739. Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida (temperatura = $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar $> 95\%$) até 28 dias.

Para os ensaios de resistividade elétrica do concreto foram utilizados corpos de prova com dimensões 10 x 10 x 17 cm. Os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida até as datas de ensaio, 7, 14, 28 e 56 e 91 dias, retornando à câmara úmida após cada ensaio.

O ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova, através dos eletrodos mais externos, à passagem de uma corrente elétrica alternada de onda senoidal de frequência de 10 Hz, fixada de tal forma que a diferença de potencial entre esses eletrodos seja de 5 V. O corpo-de-prova é mantido nestas condições por 10 minutos e após são feitas duas leituras espaçadas por 1 minuto. Nestas leituras é medida a diferença de potencial entre os eletrodos internos e a corrente elétrica passante entre os eletrodos externos do corpo-de-prova. A equação a seguir, adaptada por Medeiros Filho (1979), foi proposta para medir a resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos.

$$\rho = (4 \cdot \pi \cdot d \cdot V) / i \cdot \{ 1 + [2 \cdot d / \sqrt{(d^2 + 4 \cdot b^2)}] - [d / \sqrt{(d^2 + b^2)}] \}$$

Onde ρ é resistividade elétrica aparente do concreto, em $\Omega \cdot \text{m}$; V é diferença de potencial medida, em Volts; i é corrente elétrica, em Ampères; d é distância média entre os eixos dos eletrodos, em metros e b é profundidade de penetração dos eletrodos no concreto, em metros.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente são apresentados na Tabela 1. Constata-se nesta tabela que todas as misturas com adições minerais apresentaram valores de resistividade elétrica muito superiores àqueles da mistura de referência.

O aumento no grau de hidratação resultou, como esperado, em aumento nos valores de resistividade elétrica das misturas investigadas. Isso é devido principalmente a modificações na estrutura de poros Lübeck (2008). O crescimento médio da resistividade elétrica, considerando as três relações água/aglomerante, dos 7 aos 91 dias, foi de 66%, 141%, 188% e 300% para as misturas REF, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA respectivamente. O aumento no teor de escória de 5% para 10% (5 EAF x 10 EAF), resultou num aumento médio de resistividade elétrica de 45%. Assim como, o acréscimo de 5% de CCA e respectiva redução no mesmo teor de argila calcinada, (5 EAF x 5 CCA) resultou em acréscimo médio de 127%.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aparente.

Mistura	Relação a/ag	Resistividade elétrica aparente ($\Omega \cdot \text{m}$)				
		Idade (dias)				
		7	14	28	56	91
REF	0,35	104,6	139,6	151,1	170,6	197,2
	0,50	63,9	82,1	86,0	96,5	100,3
	0,65	53,5	65,7	65,9	76,3	80,9
5 EAF	0,35	87,7	116,0	186,5	222,6	261,7
	0,50	72,4	90,4	128,6	155,3	173,5
	0,65	65,7	83,9	112,1	117,8	120,6
10 EAF	0,35	93,2	119,4	176,3	218,3	292,6
	0,50	81,9	97,9	129,0	158,3	239,4
	0,65	63,8	80,1	122,7	137,6	165,0
5 CCA	0,35	71,8	121,7	199,2	254,6	335,8
	0,50	62,7	100,9	148,1	208	246,7
	0,65	53,5	83,5	122,0	176,2	180,9

Na Tabela 2 é apresentado um critério de classificação de resistividade elétrica proposto pelo CEB 192, Whiting e Nagi (2003).

Tabela 2 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica - CEB 192 (Whiting e Nagi, 2003).

Resistividade do concreto ($\Omega.m$)	Indicação de probabilidade de corrosão
< 50	Muito Alta
50 a 100	Alta
100 a 200	Baixa
> 200	Desprezível

A Tabela 3 apresenta uma classificação das misturas investigadas conforme os critérios do CEB 192. Da análise desta verifica-se que aos sete dias todas as misturas, com exceção da REF a/ag = 0,35, se enquadram na classificação de alta probabilidade de risco de corrosão. Aos 14 dias todas as misturas investigadas com relação a/ag 0,35 e a mistura 5 CCA na relação a/ag 0,50 se enquadram na classificação de baixa probabilidade de corrosão. A partir dos 28 dias todas as misturas com adições minerais, independentemente da relação a/ag, se enquadram na classificação de baixa probabilidade de corrosão. Essa mesmas misturas na relação a/ag 0,35 apresentaram aos 56 dias valores de resistividade elétrica superiores a 200 $\Omega.m$, ou seja, com probabilidade de corrosão desprezível, fato não observado para a mistura de referência mesmo na idade de 91 dias.

Tabela 3 - Classificação das misturas investigadas quanto à probabilidade de ocorrer corrosão, segundo critérios do CEB 192 (ABREU, 1998).

Mistura	Relação a/ag	Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$) Idade (dias)				
		7	14	28	56	91
REF	0,35	B	B	B	B	B
	0,50	A	A	A	A	B
	0,65	A	A	A	A	A
5 EAF	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	B
	0,65	A	A	B	B	B
10 EAF	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	A	B	B	D
	0,65	A	A	B	B	B
5 CCA	0,35	A	B	B	D	D
	0,50	A	B	B	D	D
	0,65	A	A	B	B	B

Mostardeiro Neto (2011) investigou concretos compostos com 10%, 20% e 30% de CCA com teores de carbono grafítico de 0,4% e 3,6%, em substituição a massa de cimento e relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.. Constatou que mesmo para a relação a/ag = 0,65 todas as misturas se enquadraram na faixa de baixa probabilidade de corrosão (>200 $\Omega.m$) a partir dos 28 dias de idade.

Hoppe et al. (2005) investigaram concretos com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de cimento por CCA com teor de carbono grafítico de 5% e verificaram, aos 91 dias, um crescimento nos valores de resistividade elétrica, em relação ao concreto de referência, de 41%, 157% e 341% para a relação a/ag 0,35; de 88%, 268% e 442%, para a relação a/ag 0,50 e de 78%, 243% e 404% para a relação a/ag 0,65. Esses mesmos autores analisaram a evolução da resistividade elétrica, dos 28 aos 91 dias, para essas mesmas misturas (10%, 20% e 30% de CCA) e constataram aumento de 36%, 160% e 133% para relação a/ag 0,35; para a relação a/ag 0,50 os aumentos foram 41%, 121% e 194% e para a relação a/ag de 0,65 os aumentos foram de 45%, 122% e 109% respectivamente para os teores de substituição de cimento por CCA de 10%, 20% e 30%.

Assim, a idade, a relação a/ag, o tipo e teor de adição mineral exercem papel determinante na resistividade elétrica do concreto, devido às alterações produzidas na microestrutura do material, já que a resistividade elétrica aparente sofre grande influência da estrutura de poros e da composição iônica da solução dos poros do material.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão axial (f_c) aos 28 dias, para todas as misturas investigadas, assim como os coeficientes das equações do tipo $f_c = A/B^{a/ag}$ e os seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 4 - Coeficientes “A” e “B” da equação $f_c = A/B^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , das misturas investigadas para a idade de 28 dias, cura úmida.

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Resistência à compressão axial (MPa)			Coeficientes		
								A	B	R^2
REF	28	0,35	0,50	0,65	54,7	40,7	28,8	116,59	8,48	0,99
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	69,1	53,5	35,6	153,63	9,12	0,99
10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	53,8	36,3	24,7	133,23	13,40	0,99
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	72,9	53,7	31,4	202,40	16,57	0,99

Da análise da Tabela 4 constata-se que as misturas 5 EAF e 5 CCA apresentaram valores superiores ao concreto de referência nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 de 26%, 31% e 24% - 5 EAF e 33%, 32% e 9% - 5 CCA respectivamente. Contudo, a mistura 10 EAF apresentou menores valores de resistência à compressão para as três relações a/ag, ou seja, -2% (0,35), -11% (0,50) e -14% (0,65).

Com os valores de resistividade elétrica aparente aos 28 dias, e suas respectivas relações a/ag, foram calculados os coeficientes das equações $\rho = C/D^{a/ag}$, apresentados na Tabela 5.

Tabela 1 - Coeficiente “C” e “D” da equação $\rho = C/D^{a/ag}$ e coeficientes de determinação, R^2 , para cada mistura investigada, idade de 28 dias.

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag			Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)			Coeficiente		
								C	D	R^2
REF	28	0,35	0,50	0,65	151,1	86,0	65,9	378,60	15,90	0,95
5 EAF	28	0,35	0,50	0,65	186,5	128,6	112,1	324,81	5,46	0,95
10 EAF	28	0,35	0,50	0,65	176,3	129,0	122,7	257,58	3,35	0,91
5 CCA	28	0,35	0,50	0,65	199,2	148,1	122,0	346,27	5,11	0,98

A partir da Tabela 4 foram determinadas as relações a/ag para obtenção dos níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa aos 28 dias. Com essas relações a/ag e as equações $\rho = C/D^{a/ag}$ (Tabela 5) foi possível determinar os valores de resistividade elétrica aparente para esses níveis de resistência à compressão, Tabela 6.

Dos resultados apresentados na Tabela 6, observa-se que para o nível de resistência à compressão de 36,6 MPa, as relações a/ag variam de 0,50 a 0,65. Deste modo, somente REF e 10 EAF enquadram-se na classe de agressividade III (forte), e as demais misturas enquadram-se na classe de agressividade I (fraca), de acordo com a ABNT NBR 12655. Contudo, os valores de resistividade elétrica das misturas variaram de 84,7 $\Omega.m$ (REF, relação a/ag = 0,54) à 141,2 $\Omega.m$ (10 EAF, a/ag = 0,50). Assim, observa-se que a mistura REF enquadra-se com probabilidade de corrosão considerada alta, de acordo com a Tabela 2. Contudo, as misturas 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, apresentam probabilidades de corrosão baixa.

Tabela 6 - Relações a/ag e resistividade elétrica aparente (ρ) para os níveis de resistência à compressão de 36,6 MPa e 56,6 MPa, idade de 28 dias.

Mistura	Ensaio (dias)	Relação a/ag		Resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$)	
		fcj = 36,6 MPa	fcj = 56,6 MPa	fcj = 36,6 MPa	fcj = 56,6 MPa
REF	28	0,54	0,34	84,7	148,7
5 EAF	28	0,65	0,45	108,0	150,9
10 EAF	28	0,50	0,33	141,2	172,9
5 CCA	28	0,61	0,45	128,2	165,1

Com o aumento do nível de resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, as relações a/ag variaram de 0,33 à 0,45. Com isso, todas as misturas satisfizeram as condições de enquadramento ao nível IV (muito forte) de acordo com a ABNT NBR 12655. Porém, os valores de resistividade elétrica das misturas variaram de 148,7 $\Omega.m$ (REF, relação a/ag = 0,34) à 172,9 $\Omega.m$ (10 EAF, relação a/ag = 0,33). Logo, observa-se que todas as misturas apresentaram valores de resistividade elétrica com probabilidades de corrosão consideradas baixas, de acordo com a Tabela 2.

Com o aumento da resistência à compressão de 36,6 MPa para 56,6 MPa, ocorreram aumentos significativos da resistividade elétrica, sendo de 75,6%, 39,7%, 22,4% e 28,8% para as misturas REF, 5 EAF, 10 EAF e 5 CCA, respectivamente.

As misturas REF e 10 EAF alcançaram o nível de resistência aos 28 dias de 56,6 MPa com relações a/ag semelhantes (0,34 e 0,33), contudo, apresentaram valores de resistividade elétrica de 148,7 $\Omega.m$ (REF) e 172,9 $\Omega.m$ (10 EAF). Credita-se esse comportamento a alteração na estrutura de poros e na solução dos poros devido às adições minerais, escória e argila calcinada.

As misturas 5 EAF e 5 CCA atingiram esse mesmo nível de resistência mecânica, 56,6 MPa, com a mesma relação a/ag 0,45, entretanto, apresentaram valores de resistividade elétrica distintos, 150,9 $\Omega.m$ e 165,1 $\Omega.m$.

CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nesta pesquisa observa-se acréscimo significativo nos valores de resistividade elétrica quando se substitui parte do cimento por adições minerais.

As misturas ternárias e quaternárias apresentaram aos 28 dias, para as três relações a/ag adotadas, valores de resistividade elétrica que as classificam de acordo com o CEB 192 como de baixa probabilidade de corrosão. A mistura de referência só apresentou esse comportamento aos 91 dias nas relações a/ag 0,35 e 0,50.

Para mesmo nível de resistência à compressão (56,6 MPa) e mesma relação a/ag (0,45) a mistura quaternária (5CCA) apresentou melhor desempenho do que a ternária 5EAF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, A. G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Porto Alegre. 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
2. ANDRADE C.; ALONSO C.; GONZÁLEZ JA. Relation between resistivity and Corosion Rate of Reinforcement in carbonated mortar made with several cement types. Cem Concr Res 1988; 18:687-698.
3. ANDRADE, C., et al. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. Cement and Concrete Composites, 47 (2014):41-46
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

5. _____. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
6. _____. NBR 12653: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
7. CLIFTON, J. R. Predicting the Service Life of Concrete. ACI Materials Journal, v.90, n. 6 p. 611-617, 1993
8. HOPPE, T. F.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; MISSAU, F.; SACIOTO, A. P. Influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC 2005, 2005. Anais ... São Paulo: CBC, 2005. V. 5, trabalho 47CBC0143, p. V933-944.
9. LÜBECK, A. Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno. Santa Maria, 2008, 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
10. MEDEIROS FILHO, S. Fundamentos de medidas elétricas. 2 ed. Recife: Universitária. Universidade Federal de Pernambuco. 1979. 307p.
11. MEHTA. P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
12. MOSTARDEIRO NETO, C. Z. Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico. Santa Maria. 2011. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
13. SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. Construction and Building Materials, 73(2014):434-41.
14. WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete: a literature review. R&D Serial No. 2457. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2003.