

DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETO DE ELEVADO DESEMPENHO, COM POZOLANAS

G. Isaia*, P. Helene**

* Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS,
e Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil

** Escola Politécnica da Univ. de São Paulo, Caixa Postal
61548, 05424-970 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho realiza estudo comparativo entre resistência à compressão axial e penetração de cloretos em concretos de alto desempenho com adição de microssílica, cinza volante e cinza de casca de arroz em teores entre 10 % e 50 %. A resistência mecânica foi determinada em c.p. cilíndricos 10 x 20 cm e a penetração de cloretos foi realizada pela norma ASTM C 1202. Os resultados revelam que o tipo e a qualidade da pozolana alteram com maior significância o valor da corrente elétrica em Coulombs, do que o valor da resistência à compressão em MPa. São apresentadas curvas de regressão $f_c \times a/ag$ e Coulombs $\times a/ag$, cuja correlação destas últimas variáveis foi similar à das equações de Abrams. Conclui-se que as pozolanas reduziram a corrente elétrica passante nos concretos, enquanto que a resistência variou conforme o tipo e quantidade da adição ativa. Para a mesma relação a/ag , as pozolanas exerceram maior influência sobre a redução da penetração de cloretos do que sobre o aumento ou diminuição das respectivas resistências.

A CORROSÃO E A DIFUSÃO DE CLORETOS

A permeabilidade do concreto tem sido apontada como uma das principais causas da corrosão de armaduras, pois a sua ocorrência decorre da falta de qualidade do concreto de cobrimento, ou seja, da sua espessura e permeabilidade (HELENE, 1986, 1992a), tanto à água quanto a agentes agressivos, principalmente o ataque de cloretos, que são os íons mais comuns e nocivos à estabilidade química da armadura (HELENE, 1992b).

As pozolanas têm sido empregadas com o objetivo de diminuir a porosidade do concreto pelo refinamento dos poros e precipitação dos produtos das reações pozolânicas nos vazios intersticiais. Além disso, o teor de substituição de pozolanas, principalmente o de cinza volante (ISAIA, 1991), tem sido aumentado em relação à quantidade de cimento em razão da diminuição dos custos, aumento de resistência e acréscimo de durabilidade, notadamente frente à ação de cloretos (ISAIA, 1992). A corrosão da armadura nas estruturas de concreto depende da destruição da camada de passivação da superfície do aço, cuja ocorrência está ligada a duas causas principais

(ANDRADE, 1992): a presença de quantidade suficiente de cloretos e a diminuição da alcalinidade do concreto.

O ingresso de cloreto no concreto depende, segundo MEHTA, SCHIESSEL e RAUPACH (1992), dos mecanismos de transportes da solução dos poros intersticiais e da difusão iônica do próprio cloreto. A determinação da penetração de cloretos é realizada, conforme descreve HELENÉ (1992b), por ensaio eletroquímico com o uso de duas células, uma com e outra sem cloreto, através das quais gera-se uma diferença de potencial, dando origem a corrente que provoca a percolação do ion cloreto pelo c.p.

Um dos principais métodos de determinação da permeabilidade a cloretos é o AASHTO T 277-83, recentemente aperfeiçoado pelo método ASTM C 1202-91, baseado quase integralmente no ensaio anterior, que possibilita medição rápida da resistência à penetração dos íons cloreto, através da condutância elétrica. A TABELA 1 apresenta a classificação dos concretos conforme a carga elétrica passante, segundo a ASTM C 1202.

TABELA 1 Penetração de cloretos baseada na carga em Coulombs (ASTM C 1202)

Carga medida (C)	Penetração	Observações
> 4000	Alta	concreto comum a/c > 0,6
2000 - 4000	Moderada	idem a/c entre 0,4 e 0,5
1000 - 2000	Baixa	idem a/c < 0,4
100 - 1000	Muito baixa	concreto látex-modificado
< 100	Desprezível	concreto polímero

ESTUDO EXPERIMENTAL

O objetivo desta pesquisa é comparar valores entre resistência à compressão axial e de penetração de cloretos de concreto de elevado desempenho, quando são usados teores entre 10 e 50 % pozolanas, isoladas ou em conjunto.

Materiais

Foi empregado cimento portland de alta resistência inicial, atendendo os requisitos da EB-2/NBR 5733. Utilizou-se cinza volante proveniente do Pólo Petroquímico (Triunfo - RS), com moagem em laboratório por uma hora, com peneiração na # 0,3 mm. A microsílica usada era não densificada tendo sido fornecida por um fabricante nacional. A cinza de casca de arroz foi composta com 50 %, em massa, de cinza queimada sem controle de temperatura em forno de olaria da região, com 50 % de cinza queimada em laboratório com temperatura de 650 °C durante uma hora. A mistura sofreu moagem durante uma hora, sendo após peneirada na # 0,3 mm. A TABELA 2 apresenta as características físicas do cimento e pozolanas utilizados.

TABELA 2 Características físicas do cimento e pozolanas

	Cimento	C.Volante	C.C.Arroz	Micros.
Massa esp. kg/dm ³	3,08	2,33	2,11	2,17
Fin. Blaine m ² /kg	427	373	1432	4576
Perda ao fogo %	2,6	1,1	12,6	5,1
Finura # 0,075 mm	0,3	1,0	0,9	n.d.
Finura # 0,045 mm	0,1	2,3	0,9	0,7
Poz.c/cim. 28 d.%	100	88	104	108

Empregou-se areia natural com $MF = 2,83 \text{ mm}$, $D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$ e massa específica de $2,61 \text{ kg/dm}^3$. O agregado graúdo usado foi a pedra britada basáltica, com $MF = 6,97$, $D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$ e massa específica de $2,49 \text{ kg/dm}^3$. Utilizou-se aditivo superfluidificante de pega normal, do tipo F da ASTM C 494, com densidade de $1,18 \text{ kg/dm}^3$, teor de sólidos de $32,5 \%$ e $\text{pH} = 7,68$.

Dosagem e ensaio dos concretos

Foram dosados traços com relações água/aglomerante fixas de 0,3, 0,4 e 0,5, com teores de substituição de cimento, em massa, das seguintes pozolanas ou de suas composições: cinza volante (CV) = (25 e 50)%, microsilílica (MS) = (10 e 20)%, cinza de casca de arroz (CCA) = (10, 20 e 30)%, (CV + MS) = (15 + 10)% e (30 + 20)% e, (CV + CCA) = (15 + 10)%, (30 + 20)% e (20 + 30)%.

Foram testados um total de 39 traços de concreto, tendo-se mantido constante o volume de argamassa em 51 %, acertando-se a consistência pelo abatimento do cone de Abrams, fixado em $60 \pm 15 \text{ mm}$, pela variação da massa de aditivo. A TABELA 3 mostra a quantidade de materiais empregados em cada traço, por m^3 de concreto.

Os aglomerantes foram previamente misturados com água e aditivo em misturador mecânico portátil, sendo após colocados em betoneira de eixo vertical para mistura e homogeneização com os agregados graúdo e miúdo.

Para a resistência à compressão axial foram moldados 3 c.p. $10 \times 20 \text{ cm}$ de acordo com a NBR 5738. Para o ensaio de penetração de cloretos foram moldados 2 c.p. cilíndricos de $95 \times 53 \text{ mm}$ que, após 3 dias de cura úmida, tiveram suas faces lixadas mecanicamente para reduzir a altura para 51 mm. Este procedimento objetivou a exposição do agregado graúdo pela remoção da camada superficial de argamassa simulando-se, assim, superfície cortada com disco abrasivo. Os ensaios foram realizados na idade de 28 dias conforme a NBR 5739 para a compressão axial e a ASTM C 1202 para a penetração de cloretos. Os resultados obtidos encontram-se na TABELA 3.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A FIGURA 1 mostra os resultados das resistências à compressão, em MPa, com os respectivos valores da penetração de cloretos, em Coulombs. As curvas de Abrams que correlacionam $f_c \times a/ag$ mostram que, de um modo geral, todos concretos com pozolanas tiveram resistências mais elevadas do que o de referência, com exceção daqueles com 25 % (exceto $a/ag = 0,3$) e 50 % de cinza volantes. As resistências mais elevadas foram obtidas na seguinte ordem de substituição de cimento por pozolana: 20 % de MS, 30 % de CCA, (30% CV + 20% MS) e (15% CV + 10% CCA).

A adição de cinza volante à microsilílica reduziu os níveis de resistência à compressão em média de 14 %, para os teores de 10 e 20 % de MS. Para a cinza de casca de arroz a introdução de cinza volante determinou, em média, queda de 5 % da resistência para teores de substituição de 10 % de CCA, de 11 % para 20 % de CCA e de 18 % para 30 % de CCA.

A regressão linear entre os valores do ensaio de penetração de cloretos e as relações a/ag , com a mesma equação da resistência à compressão, mostraram resultados similares com os das equações de Abrams, pois os coeficientes de determinação evidenciam que, em média, 98% da variação da penetração de cloretos nos c.p. é explicada pela relação a/ag . A FIGURA 1 revela que todos os concretos com pozolanas tiveram redução da penetração de cloretos em relação ao concreto de referência. Segundo a classificação da ASTM C 1202, somente este último apresentou penetração moderada (2000-3000 C), enquanto que os concretos com 25 % e 50 % de CV, 10 % e 20 % de CCA e (15% CV + 10% CCA) foram classificados como de penetração baixa (1000-2000 C). Dentro de faixa muito baixa (100-1000 C) se enquadraram todos os concretos com MS (com e sem CV), com 30 % de CCA e (20% CV + 30%) CCA. Este último concreto apresentou no ensaio de cloretos a menor média

geral, 345 C, seguida do concreto com 20% de MS, média de 392 C, e do concreto com 30% de CCA, média de 405 C.

A mistura da cinza volante com a microssilica não foi benéfica pois aumentou em 24 % a condutância elétrica dos concretos com (15% CV + 10% MS) e de 28 % nos de (30% CV + 20% MS). Ao contrário, as cinzas volantes propiciaram redução da corrente quando associadas à CCA nas seguintes proporções: -3 % para (15% CV + 10% CCA), -19 % para (30% CV + 20% CCA) e de -13 % para (20% CV + 30% CCA).

TABELA 3 Dosagem dos materiais e resultados dos ensaios

a/ag	Pozol. %	CPARI kg/m ³	C. V. kg/m ³	M. S. kg/m ³	C.C.A. kg/m ³	água kg/m ³	Adit. kg/m ³	fc28 MPa	Pen.CI. Coulomb
0,3	0	614	-	-	-	172	12,3	62,8	1815
	25	461	153	-	-	169	15,4	69,6	1481
	10	553	-	61	-	169	15,4	75,2	304
	10	553	-	-	61	166	18,4	69,6	1250
	15+10	461	92	61	-	166	18,4	70,3	460
	15+10	461	92	-	61	166	18,4	74,1	1049
	50	307	307	-	-	157	27,6	57,9	1198
	20	491	-	123	-	163	21,5	84,9	337
	20	491	-	-	123	160	24,6	71,0	1029
	30	430	-	-	184	154	30,7	85,5	328
	30+20	307	184	123	-	158	26,1	79,3	400
	30+20	307	184	-	123	154	30,7	72,0	695
	20+30	307	123	-	184	150	33,8	70,0	306
0,4	0	440	-	-	-	169	6,6	53,5	2135
	25	330	110	-	-	169	6,6	50,0	1672
	10	396	-	44	-	167	8,8	70,0	406
	10	396	-	-	44	166	9,9	61,6	1454
	15+10	330	66	44	-	166	9,9	59,8	542
	15+10	330	66	-	44	166	9,9	59,9	1344
	50	220	220	-	-	172	4,4	41,7	1522
	20	352	-	88	-	164	12,1	75,0	376
	20	352	-	-	88	162	14,3	58,8	1169
	30	308	-	-	132	158	17,6	69,8	414
	30+20	220	132	88	-	164	12,1	62,8	474
	30+20	220	132	-	88	158	17,6	54,5	955
	20+30	220	88	-	132	156	19,8	55,7	337
0,5	0	338	-	-	-	167	2,4	43,6	2632
	25	254	84	-	-	166	3,4	38,6	2050
	10	304	-	34	-	165	4,2	64,7	704
	10	304	-	-	34	164	5,1	53,3	1812
	15+10	254	50	34	-	163	5,9	53,5	720
	15+10	254	50	-	34	163	5,9	44,1	1873
	50	169	169	-	-	167	2,5	27,0	1794
	20	270	-	68	-	161	7,6	62,0	462
	20	270	-	-	68	163	5,9	49,4	1563
	30	237	-	-	101	161	8,5	55,9	472
	30+20	169	101	68	-	161	7,6	49,9	620
	30+20	169	101	-	68	162	6,8	35,9	1428
	20+30	169	68	-	101	161	8,5	47,5	392

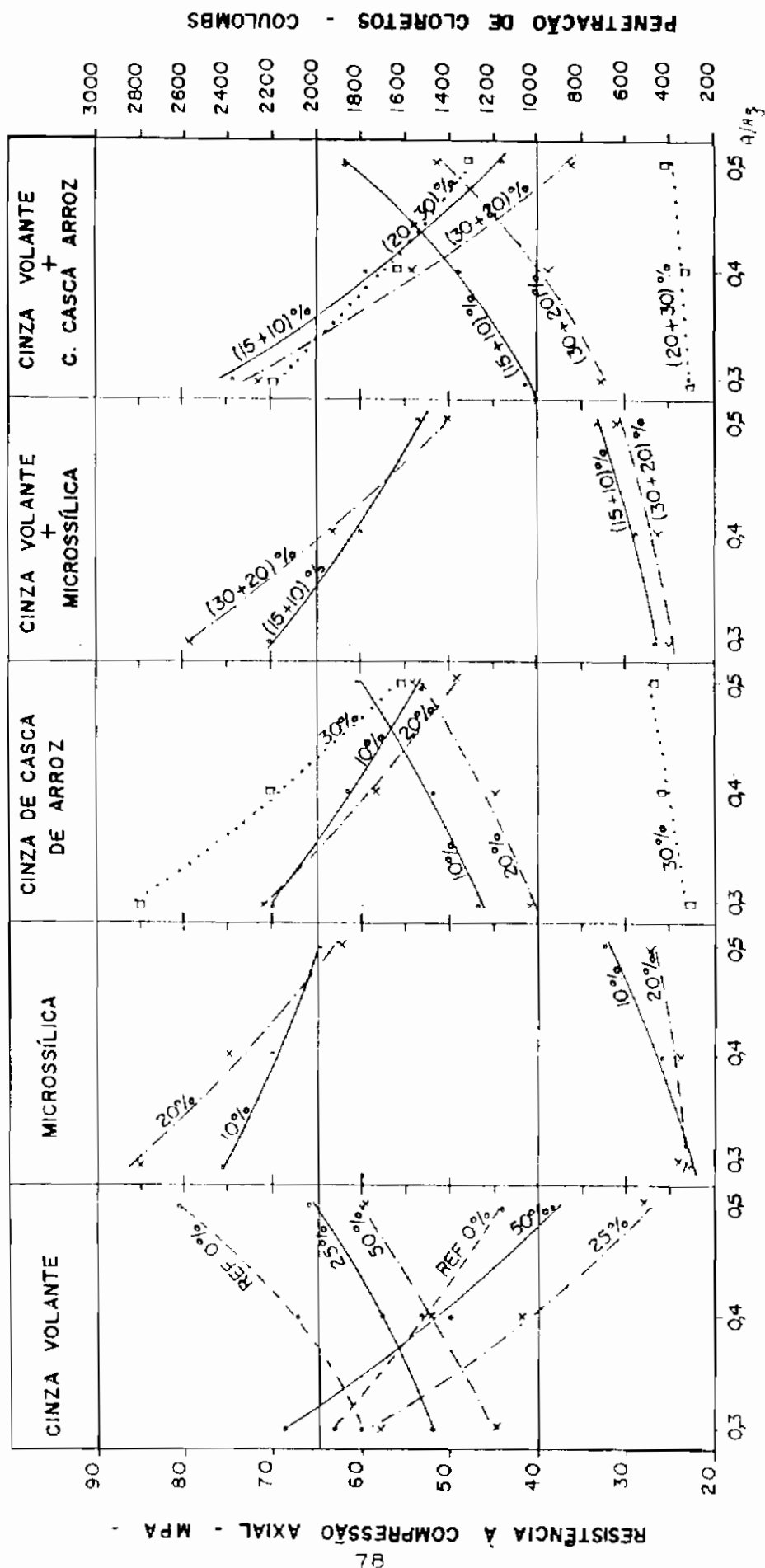


Figura 1 - Curvas de resistências e penetração de cloretos

Para mesma relação a/ag, o valor da corrente elétrica variou com o tipo e teor da pozzolana empregada. Por exemplo, para a relação a/ag = 0,50, o concreto de referência apresentou 2632 C (43,6 MPa), baixando para 2050 C (38,6 MPa) com 25 % de CV, para 1812 (53,3 MPa) com 10 % de CCA, para 704 C (64,7 MPa) com 10 % de MS e para 392 C (47,5 MPa) com (20% CV + 30% CCA). Este exemplo e os dados da TABELA 3 mostram que, para mesma relação a/ag, o tipo e/ou quantidade da pozzolana exerceram maior influência sobre a redução da corrente elétrica que atravessa o concreto, do que sobre o aumento ou a diminuição da respectiva resistência à compressão.

CONCLUSÕES

- a) a durabilidade do concreto contra a corrosão depende da qualidade do revestimento que protege as armaduras, que é causada principalmente pela penetração de cloretos e pela despassivação da armadura;
- b) a cinza volante, microssílica e cinza de casca de arroz são adições minerais que podem melhorar a durabilidade dos concretos pela redução da penetração de cloretos, protegendo a armadura contra corrosão;
- c) o ensaio de resistência à penetração de cloretos, como o da ASTM C 1202 é de realização fácil e de boa reprodutibilidade;
- d) o estudo experimental demonstrou que existe boa correlação entre a corrente elétrica e as respectivas relações a/ag, empregando-se a mesma equação de Abrams que correlaciona resistência x a/ag;
- e) as resistências à compressão mais elevadas foram obtidas com 10% e 20% de MS e 30% de CCA. A associação destas pozzolanas com cinza volante diminuiu o nível da resistência original;
- f) estas pozzolanas também apresentaram os menores valores de penetração de cloretos, acrescidos dos concretos com (15% CV + 10% CCA), (30% CV + 20% CCA) e (20% CV + 30% CCA). Ao contrário da resistência, a mistura de CV com MS e CCA melhorou muito o comportamento à penetração de cloretos;
- g) para mesma relação a/ag, as pozzolanas influenciaram em maior grau sobre a penetração de cloretos do que sobre a resistência mecânica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, M. C. (1992). *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução e adaptação Antonio Carmona e Paulo Helene. Pini, São Paulo.
- HELENE, P. R. L. (1986). *Corrosão em armaduras para concreto armado*. São Paulo, Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
- HELENE, P. R. L. (1992a). *Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto*. 2 ed. Pini, São Paulo.
- HELENE, P. R. L. (1992b). Metodologias de avaliação da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. In: Seminário Internacional EPUSP/FOSROC sobre Patologia de estruturas de concreto. Uma visão moderna. *Anais*. Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- ISAIA, G. C. (1991). *Metodologia de avaliação técnico-econômica de concreto de alta resistência com elevados teores de cinza de carvão*. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (Dissertação de Mestrado).
- ISAIA, G. C. (1992). Discussão sobre o desempenho econômico de concreto de alta resistência com cinzas volantes. *Revista IBRACON*, 4, p. 80-84.
- MEHTA, P. K., SCHIESSL, P., RAUPACH, M. (1992). Performance and durability of concrete systems. In: 9th International Congress on the Chemistry of Cement. *Proceedings*. National Council for Cement and Building Materials, 6 v., v. 1, p. 571-659.

Este trabalho apresenta resultados parciais da tese de doutorado do autor, sob a orientação do co-autor, em elaboração na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.