

EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA EM CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE ADIÇÃO MINERAL NA PERMEABILIDADE A CLORETO

Márcia Dal Ri (1); Antônio Luiz G. Gastaldini (2); Geraldo C. Isaia (2)

(1) Mestranda, UFSM
email: dalri@conex.com.br

(2) Professor Doutor, Departamento de Estruturas e Construção Civil
Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
email: gastaldn@ct.ufsm.br
Rua Appel 655/303 97015-030 Santa Maria/RS

(2) Professor Doutor, Departamento de Estruturas e Construção Civil
Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
email: gisaia@pro.via-rs.com.br
Rua das Camélias 175, 97020-120 Santa Maria/RS

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo investigar a influência da adição de cal hidratada em concretos compostos com altos teores de adições minerais, cinza de casca de arroz, cinza volante e escória granulada de alto forno, em misturas binárias e ternárias, na permeabilidade a cloretos. Para cada mistura aglomerante analisada, relação água cimento adotada 0,35 – 0,45 e 0,55 e idade de ensaio, 28 e 91 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e permeabilidade a cloretos. Dos resultados obtidos observa-se diminuição na permeabilidade a cloretos devido a substituição de parte do cimento pelas adições minerais, estando este comportamento subordinado às características de cada adição. Tanto nas misturas binárias quanto nas ternárias, a adição de cal hidratada resulta num aumento nos valores de resistência à compressão e permeabilidade a cloreto. Há uma forte correlação entre os valores de resistência à compressão axial e a permeabilidade a cloreto. Credita-se esse comportamento a alterações no composição da solução dos poros.

Palavras-Chave: adições minerais, íons cloreto, cal hidratada, resistência a compressão.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais causas da diminuição da vida útil das estruturas de concreto deve-se à corrosão das armaduras, seja pela ação do dióxido de carbono ou ao ingresso de íons cloretos, que em determinados teores causam destruição da camada protetora de passivação na superfície do aço.

O ingresso de íons cloreto pode se dar através da incorporação de materiais com estes íons durante a fabricação do concreto, bem como, podem penetrar na estrutura pronta devido ao ambiente externo agressivo, por difusão ou succção capilar da água que contenha esses íons, (HELENE 1993).

O seu ingresso está subordinado a estrutura de poros que é significativamente alterada pela adição ou substituição de parte do cimento por adições minerais, diminuindo assim, a permeabilidade a cloretos (WIENS, MULLICK 1997, GASTALDINI et al 1999). Além deste fato, (TALBOT 1995, GASTALDINI et al 1999) justificam a menor permeabilidade a cloretos dos concretos compostos com adições minerais devido a modificações que causam na composição da solução aquosa dos poros e (DHIR 1997) acrescenta ao primeiro fator a capacidade intrínseca de cada adição na fixação de cloretos.

Este trabalho faz parte de uma pesquisa maior onde se investiga a adição de cal hidratada no concreto com adições minerais, no sentido de prover a diminuição de Ca(OH)_2 devido a substituição parcial do cimento e reações pozolânicas assim diminuir o efeito da carbonatação. Tem por objetivo verificar a influência da adição da cal hidratada a permeabilidade a cloreto do concreto.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais Utilizados

Foi utilizado um cimento portland de alta resistência inicial, cinza volante da Riocel, moída em laboratório por 1 hora, utilizando-se a fração passante na # 0,3mm; cinza de casca de arroz, queimada em forno de olaria, sem controle de temperatura, moída em laboratório por uma hora, utilizando-se a fração menor do que 0,3 mm; escória granulada de alto forno procedente de siderúrgica nacional, moída na finura Blaine de $400 \text{ m}^2/\text{kg}$; cal calcítica hidratada de fornecedor nacional.

Na tabela 1 são apresentadas as características químicas e físicas do cimento e adições minerais.

Empregou-se areia natural com $D_{\text{máx}} = 4,8 \text{ mm}$, $MF = 2,74$ e massa específica de $2,63 \text{ kg/dm}^3$ e agregado graúdo proveniente de rocha diabásica, lavado, com $D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$, $MF = 6,93$ e massa específica de $2,49 \text{ kg/dm}^3$.

2.2 Misturas Utilizadas – Ensaios

Foram ensaiadas 11 misturas aglomerantes constituídas de cimento portland de alta resistência, cinza volante, cinza de casca de arroz, escória granulada de alto forno e cal hidratada, nas proporções apresentadas na tabela 2 para obtenção de misturas binárias e ternárias.

O proporcionamento do concreto foi realizado segundo a metodologia proposta por Helene e Terzian (1993). O teor de argamassa foi mantido constante, 53 % em volume, e a consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone em $60 \pm 15 \text{ mm}$, variando-se a quantidade de aditivo superplasticificante.

Os ensaios para a determinação da permeabilidade a cloreto foram realizados conforme a norma ASTM C 1202, em corpos de prova cilíndricos de $95 \times 51 \text{ mm}$. Para cada uma das 05 misturas investigadas e relação água/aglomerante adotada, 0,35, 0,45 e 0,55, foram ensaiados dois exemplares nas idades de 28 e 91 dias, adotando-se a média como valor representativo, desde que satisfeitas as prescrições de norma quanto a diferença nestes resultados.

Para a avaliação da resistência à compressão axial, moldou-se 4 c.p. cilíndricos de dimensões $10 \times 20 \text{ cm}$, em duas camadas, utilizando-se mesa vibratória para adensamento. Após 24 hs foram desmoldados e conservados em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ até a data de ensaio, 28 e 91 dias, procedimento este conforme prescrições das NBR 5738 e 5739.

TABELA 1 - Características físicas e químicas do cimento e adições minerais.

Características Dos Materiais	Cimento ARI	Escória	Cinza Volante	Cinza C. Arroz	Sílica Ativa
Características Físicas					
Resíduo # 0,075 mm	0,84	1,05	0,90	0,52	Nd
Resíduo # 0,045 mm	1,32	2,10	2,07	0,64	0,6
Massa Específica (g/cm ³)	3.10	2.90	2.20	1,93	2.17
Área Específica Blaine (m ² /Kg)	457	400-700	416	1715	2590
Resistência à Comp. Axial (MPa)	fc ₂₈ = 50,9				
Características Químicas					
P. F. (%)	3.20	0	0.91	11.57	2.25
SiO ₂ (%)	19.24	34.07	63.28	82.78	95.14
Al ₂ O ₃ (%)	4.52	12.94	24.44	0.72	0.07
Fe ₂ O ₃ (%)	3.20	0.55	4.07	0.74	0.27
CaO (%)	62.43	41.05	2.67	1.00	0.44
MgO (%)	1.56	8.28	0.96	0.60	0.44
SO ₃ (%)	3.53	0	0.26	0.04	0.10
Na ₂ O (%)	0.04	0.16	0.17	0.10	0.18
K ₂ O (%)	0.60	0.55	1.40	1.55	1.20
R. I. (%)	0.69	-	-	-	-
Equivalente alcalino	0.43	0,52	1,09	1,12	0,97

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 3 e figura1 são apresentados os valores de resistência à compressão aos 28 dias de idade e os valores dos índices médios de resistência à compressão de cada mistura aglomerante investigada. Este último corresponde à média das relações entre os valores de resistência à compressão das misturas aglomerantes investigadas divididos pela resistência à compressão obtida pela mistura de referência em igual relação água/aglomerante.

Ao se substituir parte do cimento por adições minerais ocorrem alterações no comportamento mecânico e aspectos ligados a durabilidade do concreto, sobretudo ao se adicionar cal hidratada a essas misturas aglomerantes. O comportamento diferenciado deve-se às características físico-químicas e mineralógicas dessas adições.

Dentre as misturas binárias àquelas compostas com cinza de casca de arroz, em teor de substituição em massa de cimento de 50%, foram as que apresentaram maiores valores de resistência à compressão, seguidas daquelas compostas com 70% de escória de alto forno (70E) e 50% de cinza volante (V50). Esse comportamento deve-se a maior finura e teor de sílica amorfa desta adição, apresentando valores de índice médio de resistência à compressão superior ao da mistura de referência. Ao se adicionar cal hidratada a estas misturas binárias, constata-se que mesmo aquelas compostas com escória de alto forno e cinza volante apresentaram valores de índice médio de resistência superior à da mistura de referência porém, muito inferiores ao obtido com a cinza de casca de arroz.

Nas misturas ternárias compostas com 50% de cinza volante e 20% de cinza de casca de arroz, VA52 ou 20% de cinza volante e 70% de escória de alto forno, VE27, verifica-se que a adição de cal hidratada resulta em valores de índice médio de resistência à compressão de 31% e 18% respectivamente superiores às mesmas misturas sem a adição de cal hidratada.

O nível de resistência de 32 MPa é conseguido em misturas contendo cal hidratada e 70 % de adição mineral, 50% de cinza volante e 20% de cinza de casca de arroz, relação água/aglomerante de 0,45 ou 90% de adição mineral, 20% de cinza volante e 70% de escória de alto forno e relação água/aglomerante de 0,35.

Tabela 2. Quantidade de materiais empregados.

Série	A/Agl	C (%)	C.V. (%)	C.C.A. (%)	E (%)	CAL (%)
REF.	0,35	100				
	0,45	100				
	0,55	100				
V50	0,35	50	50			
	0,45	50	50			
	0,55	50	50			
V50C	0,35	50	50			15
	0,45	50	50			15
	0,55	50	50			15
A50	0,35	50		50		
	0,45	50		50		
	0,55	50		50		
A50C	0,35	50		50		18
	0,45	50		50		18
	0,55	50		50		18
70E	0,35	30			70	
	0,45	30			70	
	0,55	30			70	
70EC	0,35	30			70	15
	0,45	30			70	15
	0,55	30			70	15
VA52	0,35	30	50	20		
	0,45	30	50	20		
	0,55	30	50	20		
VA52C	0,35	30	50	20		18
	0,45	30	50	20		18
	0,55	30	50	20		18
VE27	0,35	10	20		70	
	0,45	10	20		70	
	0,55	10	20		70	
VE27C	0,35	10	20		70	18
	0,45	10	20		70	18
	0,55	10	20		70	18

3.2 PERMEABILIDADE A CLORETO

Os resultados de permeabilidade a íons cloreto, total e índice médio de permeabilidade a cloretos, em Coulombs, das diferentes misturas aglomerantes investigadas são apresentados na tabela 3 e figura 2. O índice médio de permeabilidade corresponde à média das relações entre os valores de permeabilidade a cloreto das misturas aglomerantes investigadas divididos pela permeabilidade a cloreto obtida pela mistura de referência em igual relação água/aglomerante.

Observa-se como esperado uma diminuição na permeabilidade a cloretos com a diminuição da relação água/aglomerante, assim como todas as misturas compostas com adições minerais apresentaram

menores valores de permeabilidade total e índice médio de permeabilidade a cloretos, em Coulombs. Esse decréscimo variou de 1,7 a 5 vezes.

Na tabela 4 são apresentados as relações entre os valores de carga passante e a permeabilidade a cloretos propostos pela ASTM C 1202.

Confrontando-se os resultados desta tabela da ASTM com aqueles obtidos das misturas aglomerantes investigadas, observa-se que as misturas binárias contendo escória, com e sem adição de cal hidratada, e as misturas ternárias contendo 50% de cinza volante e 20% de cinza de casca de arroz, VA52, exceto para a relação água/aglomerante de 0,55, apresentaram valores de carga passante que se classificam como de baixa permeabilidade a cloretos. As demais misturas aglomerantes se enquadram como de muito baixa permeabilidade a cloretos, com exceção da mistura binária composta com 50% de cinza volante com cal e relação água/aglomerante de 0,55.

Tabela 3 - Resistência à compressão, penetração total de cloreto e índice médio de resistência e penetração de cloretos aos 28 dias.

Série	A/ AG	Fc28 MPa	Ifc médio	C 28 Coulombs	C médio
	0,35	53,82		2682	
REF.	0,45	39,38	1,00	3275	1
	0,55	28,81		3561	
	0,35	40,77		1172	
V50	0,45	29,48	0,73	1521	0,49
	0,55	21,31		2065	
	0,35	54,79		1423	
V50C	0,45	39,37	0,99	1950	0,60
	0,55	28,29		2395	
	0,35	67,98		250	
A50	0,45	50,42	1,27	305	0,10
	0,55	37,40		400	
	0,35	74,01		763	
A50C	0,45	53,98	1,36	807	0,23
	0,55	39,37		809	
	0,35	43,44		1083	
70E	0,45	34,94	1,11	1147	0,42
	0,55	28,10		1296	
	0,35	50,34		1234	
70EC	0,45	42,20	1,16	1370	0,43
	0,55	35,38		1470	
	0,35	31,73		512	
VA52	0,45	26,90	0,68	607	0,20
	0,55	22,81		697	
	0,35	44,98		1054	
VA52C	0,45	37,88	0,96	1136	0,37
	0,55	31,90		1313	
	0,35	35,77		653	
VE27	0,45	23,50	0,59	767	0,24
	0,55	15,44		851	
	0,35	46,33		795	
VE27C	0,45	31,71	0,80	987	0,31
	0,55	21,71		1139	

As misturas que apresentaram melhor desempenho frente a cloretos foram aquelas compostas com 50% de cinza de casca de arroz, com e sem adição de cal hidratada e às compostas com 50% de cinza volante e 20% de cinza de casca de arroz, sem a adição de cal hidratada.

Para todas as misturas aglomerantes investigadas constatou-se que a adição de cal hidratada resultou num aumento da corrente passante, em relação a mesma mistura sem a adição. Esta diferença variou de 1,14 a 3,05 vezes dependendo da adição mineral. Credita-se esse comportamento a alterações na composição da solução aquosa dos concretos.

Tabela 4 – Penetração de cloretos: carga em Coulomb (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
0-100	Desprezível	Concreto polímero

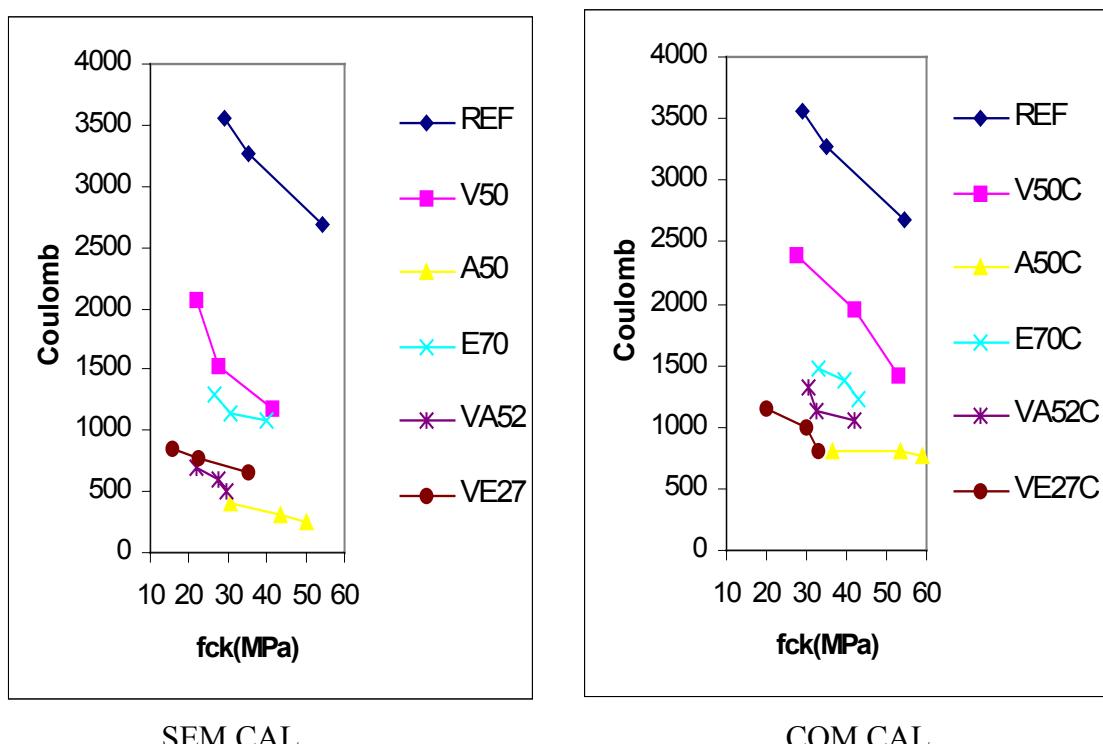


Figura 1. Resistência a compressão relacionada a penetração de cloretos aos 28 dias das misturas com e sem a adição de cal.

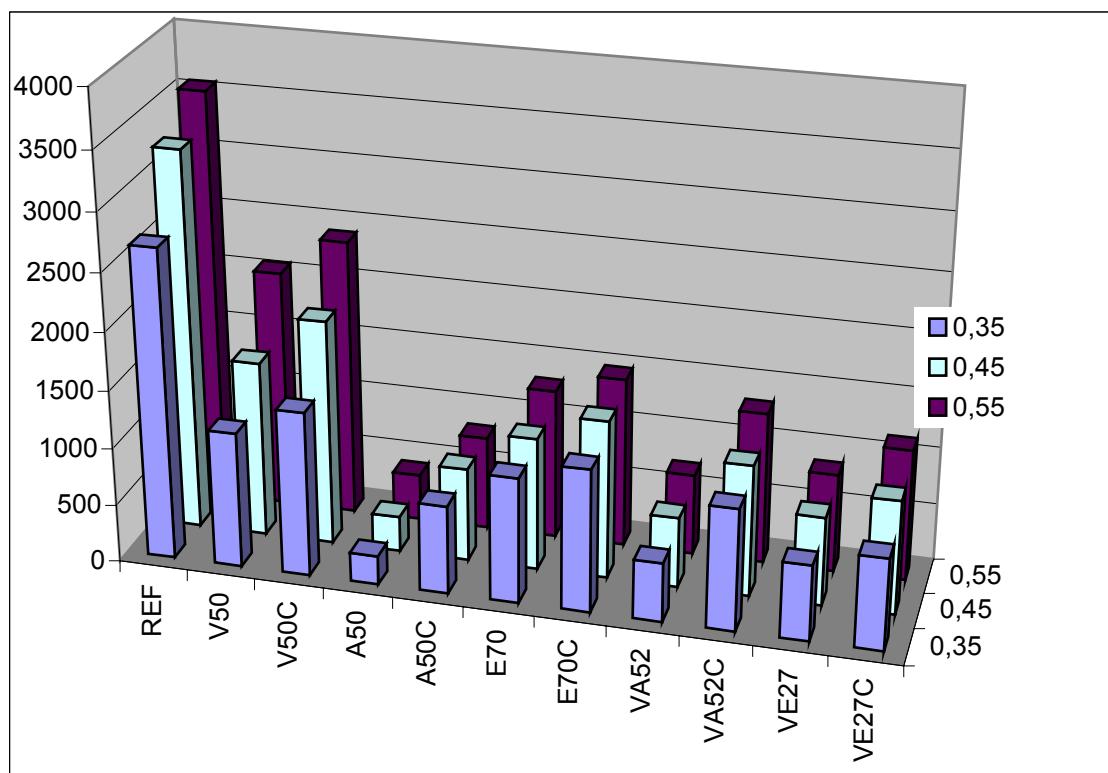


Figura 2: Resultados de permeabilidade a cloreto a 28 dias d as misturas com e sem adição de cal hidratada.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos constata-se modificações no comportamento mecânico e na permeabilidade a cloreto do concreto, quando se substitui parte do cimento por escórias e pozolanas.

A resistência a compressão em concretos com a adição da cal foi superior a mesma mistura sem esta adição, consequência da maior quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível para as reações pozolânicas, tendo assim maior quantidade de C-S-H formado, tornando a estrutura da pasta mais densa.

A menor permeabilidade a cloreto em concretos com adições minerais em relação a mistura de referência deve-se entre outros ao refinamento da estrutura dos poros.

Em concretos onde há a reposição da cal consumida pelas reações pozolânicas, a permeabilidade a cloreto é maior, se relacionado com a mesma mistura sem esta adição, porém inferior a mistura de referência. Esse comportamento é devido a alterações na composição da solução aquosa do concreto e consequentemente na condutividade elétrica da solução dos poros.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- WIENS, U., BREIT,W., SCHIESSL,P. **Influence of high silica fume and high fly ash contents on alkalinity of pore solution and protection of steel against corrosion.** In: MALHOTRA, V. M. (ed) International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other mineral by-products in concrete, 5 th, Wisconsin, 1995. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 2v.v.1, p.741-761 (SP - 153).
- MULLICK, A.K. **Why concrete is not always durable.** In: International Congress on the Chemistry of Cement, 9 th , New Delhi, 1992. Proceedings. New Delhi: National Council of Cement and Building Materials, 1992, 6 v., v.1, p.1-31.
- GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G.C. **Resistência à Compressão e Distribuição de Tamanho de Poros de Misturas Binárias e Ternárias de Adições Minerais.** In: V Congresso Ibero

Americano de Patologia de Lás Construcciones e VII Congresso de Control de Calidad, 1999, Montevideo. Conpat. Montevideo, Uruguay: Saga&Associados Ltda., 1999. v.1, p.339-346.

TALBOT, C. et al. **Properties of mortar mixtures containing high amount of various supplementary cementitious materials**. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other mineral by-products in concrete, 5 th, Wisconsin, 1995. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 2v. V.1, p.125-131 (SP - 153)

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G.C. **Composição da aquosa de pastas com adições minerais**. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador-Ba. Anais. São Paulo, 1999. v.1, p.189 CD ROM.

DHIR, R. K. et al. **Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA**. *Cement and Concrete Research*, v.27, p.1633-1639, 1997.

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G.C. **Chloride Permeability of High Performance Concrete With Mineral Addition: Binary and Ternary Mixtures**. In: International Conference on High-Performance Concrete and Performance Quality of Concrete, 1999, Gramado-RS. Proceedings of 2nd CANMET/ACI International Conference. Farmington Hills, Mi:American Concrete Institute, 1999. v.1.

HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1992.