

Estudo da Penetração de Cloretos em Concretos com Misturas Binárias e Ternárias de Escória Granulada, Cinza Volante e Cal Hidratada na Camada de Cobrimento

Rubin, Cassio ¹; Isaía, Geraldo ²; Gastaldini, Luís ³; Cantarelli, Gustavo ⁴; Ternus, Carlise ⁵

¹*Mestrando do Curso de Engenharia Civil – UFSM, Santa Maria RS*
cassiorubin@hotmail.com

²*Departamento de Estruturas e Construção Civil - UFSM, Santa Maria RS -*
gisaia@terra.com.br

³*Departamento de Estruturas e Construção Civil - UFSM, Santa Maria RS -*
gastaldini@ct.ufsm.br

⁴*Mestrando do Curso de Engenharia Civil – UFSM, Santa Maria RS -*
gustavomc@net.crea-rs.org.br

⁵*Acad. do Curso de Engenharia Civil, UFSM, Santa Maria RS -* carlise@mail.ufsm.br

RESUMO

No intuito de estudar a influência de altos teores de adições minerais na microestrutura da camada de cobertura estrutural do concreto, foram moldados peças protótipos curados em condições ambientais compostos por misturas de cimento portland (referência) e dosagens com teores de 70% e escória de alto forno e 20% de cinza volante, em substituição ao cimento, e a estes traços com adições foi adicionado 20% de cal hidratada. Extraíram-se testemunhos para realização do ensaio de penetração rápida a cloretos – ASTM C 1202 – e analisadas em 3 profundidades entre 0 a 5,5 cm da camada de penetração para as idades 91 e 300 dias respectivamente, juntamente com ensaios de resistência à compressão para 28, 91, 182 e 300 dias. Resultados demonstram valores inferiores de carga passante em Coulombs em concretos com adições em comparação ao concreto de referência.

PALAVRAS CHAVE: escória de alto forno, cinza volante, cal hidratada, penetração a cloretos, concreto de alto desempenho, durabilidade

1 - INTRODUÇÃO

Recentemente, estudos mostram a condução de um projeto de estruturas de concreto baseado no princípio “Resistência através de Durabilidade” ao invés de “Durabilidade através de Resistência”, devido ao aumento de desempenho do concreto com as adições minerais pozolânicas, conjuntamente com superplastificantes, na microestrutura, fabricação, durabilidade e propriedades mecânicas.

Este artigo é fruto de uma pesquisa que objetiva-se estudar a microestrutura da camada

de cobertura, especialmente a variação da sua constituição, em termos de compostos hidratados, estrutura dos poros e composição da solução dos poros, em diversas profundidades a partir da superfície do concreto, até 50 mm de espessura. De modo similar, em termos de durabilidade, pretende-se estudar a variação das principais variáveis que influem no desempenho do concreto. Um dos intuítos desta pesquisa é comprovar o efeito benéfico das adições minerais na prevenção do ingresso de agentes agressivos – íons cloretos – responsáveis pelo início do processo de corrosão da armadura.

A utilização de adições minerais deve-se a diversos estudos realizados comprovando o benefício de sua utilização. A adição de escória a concretos beneficia melhoras nas propriedades do concreto fresco e endurecido, como melhoria na trabalhabilidade, diminuição do pico de temperatura do calor de hidratação, obtenção de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, entre outros. Daubbe e Baker (1986) mostraram que quando o concreto possui 60% de escória adicionada ao material cimentício, em relações a/c 0,5, o coeficiente de difusão do concreto à penetração de íons cloretos é cerca de 10 vezes menor a concretos isentos de adições. Conforme Neville (1992), isto é devido à densificação da pasta cimentícia devido ao preenchimento dos poros com C-S-H do que com cimento com adições.

Estudos como o de Zhang (2003) comprovam o benefício da adição de cinza volante ao concreto devido a sua atividade pozzolânica, que conforme o seu acréscimo até 60% aumenta consideravelmente o grau de hidratação do cimento entre 5 a 20%, conforme a idade de cura do concreto e teor de adição ao cimento.

ROY (1986) apud MASLEHUDDIN et al (1990) relatam que a baixa capacidade de difusão de íons cloreto em concretos com a adição de pozolanas pode ser devido à baixa concentração de íons hidroxila na solução dos poros. A difusão de íons cloreto no concreto é fortemente influenciada pelo tipo de cimento e, tipo e proporção de pozolanas utilizadas. MASLEHUDDIN et al (1990) observaram, em misturas com 20% de cinza volante e 60% de escória de alto forno, menor penetração de cloretos e creditaram esse fato à diminuição da penetração devido ao refinamento dos poros.

Segundo Helene (1993), a presença de íons cloreto, dependendo da relação Cl/OH, pode acarretar a despassivação da armadura - destruição do filme protetor que é formado naturalmente nas armaduras - quando em contato com concretos jovens e de elevada alcalinidade, como é o caso de concretos com elevados teores de adições. Assim, quando grandes quantidades de cloretos estão presentes, o concreto tende a conservar mais umidade aumentando o risco de corrosão com a conseqüente diminuição da resistividade elétrica do concreto.

2 - ESTUDO EXPERIMENTAL

O estudo experimental foi baseado na elaboração de traços variando a sua dosagem em relação aos materiais empregados e sua relação água;cimento. Foram utilizados: a) cimento portland de alta resistência inicial pois é o que fornece maior teor de C-H após a hidratação e contém o menor teor de adições; b) cinza volante proveniente de usina geradora de vapor de uma fábrica de celulose da região; c) escória granulada de alto forno proveniente da Siderúrgica Tubarão, ES; d) cal hidratada cálcica, de procedência nacional; e) areia natural lavada, com $D_{máx} = 4,8$ mm; f) pedra britada com $D_{máx} = 19$ mm, de rocha diabásica; g) aditivo superplastificante, quando necessário, com base éter carboxílica, de produtor

nacional. Todos estes materiais serão previamente caracterizados com a realização dos ensaios pertinentes, no que couber, pela determinação da composição química, análise granulométrica por peneiramento ou a laser, superfície específica Blaine e BET, massa específica absoluta e unitária.

Os estudos desenvolvidos nesta pesquisa baseiam-se em 3 composições de traços com 3 relações água/materiais cimentícios, que se compuseram na seguinte forma descrita na tabela 1:

Tabela 1 – Traços desenvolvidos para os concretos isentos e com presença de adições minerais

TRAÇO	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO	RELAÇÕES a/mc ESTUDADAS	SIGLAS A SEREM UTILIZADAS
Referência – R	Concreto isento de adições	0,4 ; 0,6 ; 0,8	R4 ; R6 ; R8
Adições Minerais – E	70% Escória + 20% Cinza Volante (substituição)	0,3 ; 0,4 ; 0,5	E3 ; E4 ; E5
Adições Minerais + Cal Hidratada – EC	70% Escória + 20% Cinza Volante (substituição) + 20% Cal hidratada (adição)	0,3 ; 0,4 ; 0,5	EC3 ; EC4 ; EC5

A partir das dosagens definidas e dimensionadas, foram moldados corpos de prova com dimensões 10x20 cm e peças protótipos de dimensões 75 x 20 x 15 cm, desmoldados em 1 dia, curados 7 dias em cura úmida e, após esta data, curados em condições ambientais conforme mostrado na Foto 1.



Foto 1: Armazenamento dos protótipos ata a data de ensaio

Destes protótipos foram extraídos testemunhos com dimensões 10x20cm, no total de 6 testemunhos por protótipo. Para o ensaio de resistência á compressão, conforme norma NBR 5739-94, ensaiaram-se testemunhos com idades a 28, 91 e 182 dias, onde serão avaliados por grupos de igualdade de resistência à compressão para efeito de análise e discussão dos resultados das variáveis em relação à microestrutura e durabilidade, de acordo com Massazza (1998) e Bentur et al. (1997)

Para o ensaio de penetração rápida a cloretos – ASTM C 1202, os testemunhos extraídos foram preparados em corpos-de-prova com dimensões 5x10cm e realizado o seu corte em função da camada a ser estudada, conforme Foto 2, sendo estas camadas analisadas em 3 profundidades:

- 0-1,0cm (camada 1);
- 2,0-3,0cm (camada 2);
- 4,5 - 5,5 cm (camada 3);



Foto 2: Corte dos testemunhos no preparo do ensaio

Após o corte, os corpos-de-prova foram lavados e secos ao ar por 1 hora. Em seguida selou-se as laterais com resina epoxi.

Os corpos de prova foram colocados em um dessecador sendo aplicado vácuo por 3 horas. Após este período colocou-se água deaerada, ou seja, fervida e na temperatura ambiente, em quantidade suficiente para cobri-los. Aplicou-se vácuo por mais uma hora. Após este período desligou-se o vácuo e manteve-se os corpos de prova submersos por 18 ± 2 horas. Ao final, retirou-se os corpos de prova e colou-se entre duas células de acrílico, uma com solução de NaCl a 3 % e outra com solução de NaOH 0,3N. Aplicou-se entre os bornes uma diferença de potencial de 60 V durante 6 horas, medindo-se a corrente passante a cada 30 minutos, conforme Foto 3.



Foto 3: Ensaio de penetração de cloretos

Para cada uma das nove misturas foram ensaiados dois corpos de prova de cada camada em cada idade, adotando-se a média como valor representativo, quando os valores individuais diferiram entre si com menos de 10% em relação à média. Após o término do ensaio, os corpos de prova foram removidos das células e em seguida, conforme recomenda a ASTM C 1152/97, foi realizada a coleta do material da face que esteve em contato com a solução de cloreto de sódio, na profundidade de 0-15mm. Foi usada uma perfuratriz com broca de vídia, com diâmetro de 12,5 mm, realizando-se a coleta de pó proveniente de pelo menos 8 furos contíguos. Após a perfuração o pó foi moído e peneirado na #200 (0,075 mm) para o ensaio de teor de cloretos totais retidos. Os ensaios de teor de cloretos totais retidos ainda não foram realizados, sendo estes resultados futuramente integrados nesta pesquisa.

Para avaliação dos resultados em termos qualitativos utiliza-se os parâmetros conforme norma ASTM C 1202/97 descritos na tabela 2:

Tabela 2 – Penetrabilidade de íons cloreto baseado na Carga Passante conforme norma ASTM C 1202/97

CARGA PASSANTE (COULOMBS)	PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETO
> 4000	ALTA
2000 – 4000	MODERADA
1000 – 2000	BAIXA
100 – 1000	MUITO BAIXA
< 100	NEGLIGÍVEL

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Resultados Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão para idades de 28, 91, 182 e 300 dias estão dispostos na Tabela 3. Em todos os quadros estão presentes os resultados dos CP's extraídos de testemunhos curados ao ambiente.

Tabela 3 – Resistências à compressão a 28, 91, 182 e 300 dias

Mistura	a/ag	fc ₂₈ MPa	fc ₉₁ MPa	fc ₁₈₂ MPa	fc ₃₀₀ MPa	fc = a + b.ln t (r)	fc = a + b.lnM (r)
R4	0,400	55,0	62,5	68,3	71,7*	0,998	0,999
R5	0,491	43,9**	48,9**	52,5**	54,8**	0,999	0,999
R6	0,600	39,4	41,0	42,3	43,1*	0,997	0,999
R8	0,827	17,8	21,6	23,8	25,7*	0,999	1,000
(r) fc = a.(a/ag)^b		0,956	0,983	0,993	0,997		
E3	0,302	35,4	51,6	55,1	62,1*	0,990	0,984
E4	0,402	30,3	45,3	47,9	52,4*	0,979	0,971
E5	0,491	24,3	32,8	37,0	41,0*	0,999	0,998
(r) fc = a.(a/ag)^b		0,980	0,942	0,963	0,979		
EC3	0,331	53,6	58,1	60,5	62,4*	1,000	0,999
EC4	0,402	39,8	48,0	50,2*	52,0	0,982	0,979
EC5	0,491	30,1	40,4	42,8*	44,9	0,977	0,971
(r) fc = a.(a/ag)^b		0,999	0,999	0,999	0,998		

* dados corrigidos por inferência estatística

** dados calculados por interpolação

fc = a.(a/ag)^b – equação de Abrams

fc = a + b.ln t – equação da progressão da resistência com o tempo

t = idade de ensaio

fc = a + b.ln M – equação da progressão da resistência com a maturidade

M = maturidade = dias x °C (temperatura média diária)

r = coeficiente de correlação

Percebe-se uma clara influencia das adições minerais no acréscimo de resistência a medida que aumenta a idade do concreto devido as reações de C-S-H secundarias serem de maior influencia na microestrutura. O concreto com adição de cal hidratada apresentou valores de resistência maiores.

A análise estatística mostra a correlação aceitável dos valores por seus coeficientes apresentarem, na sua maioria, valores maiores que 0,95. A maturidade foi calculada com a coleta diária da temperatura media vezes a idade do concreto em questão, parâmetro que indica o grau de exposição de cura ambiental e sua variação de temperatura ao longo do

tempo. Este fator influencia no processo de cura do concreto, principalmente nas primeiras idades.

3.2. Resultados Permeabilidade a Cloretos

Os resultados estão dispostos na Tabela 3 conforme a dosagem do concreto e a camada ensaiada. Estes resultados são de ensaios realizados a 91 e 300 dias e comparados a influência da adição mineral na densificação da microestrutura com o aumento da idade do concreto.

Tabela 4 – resultados dos ensaios de determinação rápida de cloretos – ASTM C 1202 em idade de 91 e 300 dias – valores em Coulombs

Mistura	a/ag	Camada C1	Camada C2	Camada C3	(C1-C3)/C1 x 100	(C2-C3)/C3 x100	Coef. Variação %	ASTM C 1202-97
91 DIAS								
R4	0,400	2457	2353	2156	12,2	9,1	6,6	MODERADA
R5**	0,491	4046**	3882**	3731**	7,8	4,0	4,1	MODERADA
R6	0,600	5667	5420	5450	3,8	-0,6	2,4	ALTA
R8	0,827	7891	7646	7207	8,7	6,1	4,6	ALTA
r		0,999	1,000	0,994				
E3	0,302	393	394	408	-3,8	-3,4	2,1	M. BAIXA
E4	0,402	478	465	481	-0,6	-3,3	1,8	M. BAIXA
E5	0,491	503*	493*	501*	0,4	-1,6	1,1	M. BAIXA
r		0,979	0,990	0,977				
EC3	0,331	462	476	485	-5,0	-1,9	2,4	M. BAIXA
EC4	0,402	547	498	502	8,2	-0,8	5,3	M. BAIXA
EC5	0,491	560*	508*	549*	2,0	-7,5	5,1	M. BAIXA
r		0,917	0,976	0,983				
300 DIAS								
R4	0,400	1808	1954	2120	-17,3	-7,8	8,0	MODERADA
R5*	0,491	3338**	3401**	3560**	-6,7	-4,5	3,3	MODERADA
R6	0,600	5018*	5034*	5271	-5,0	-4,5	2,8	ALTA
R8	0,827	6687*	6440	6325	5,4	1,8	2,9	ALTA
r		0,994	0,989	0,977				
E3	0,302	277	280	300	-8,3	-6,7	4,4	M. BAIXA
E4	0,402	347*	286*	297	14,4	-3,7	10,5	M. BAIXA
E5	0,491	362	308	304	16,0	1,3	10,0	M. BAIXA
r		0,967	0,942	0,542				
EC3	0,331	312	289	280	10,3	3,2	5,6	M. BAIXA
EC4	0,402	392	338	338	13,8	0	8,8	M. BAIXA
EC5	0,491	411*	382*	349*	15,1	9,5	8,1	M. BAIXA
r		0,939	0,999	0,928				

r = coeficiente de correlação da equação exponencial: Difusão = $a \cdot e^{b(a/ag)}$

Desvio máximo relativo = $[(\text{maior} - \text{menor})/\text{média}] \times 100$

* dados corrigidos por inferência estatística

** dados calculados por interpolação

Para melhor visualização, foram divididos os resultados de penetração rápida a cloretos em concretos isentos de adições na Figura 1, os concretos com presença de adições sem adição de cal hidratada na Figura 2 e com presença de adições e com cal hidratada na Figura 3. Todos os resultados e sua diferença em grandeza numérica pode ser visualizada na Figura 4.

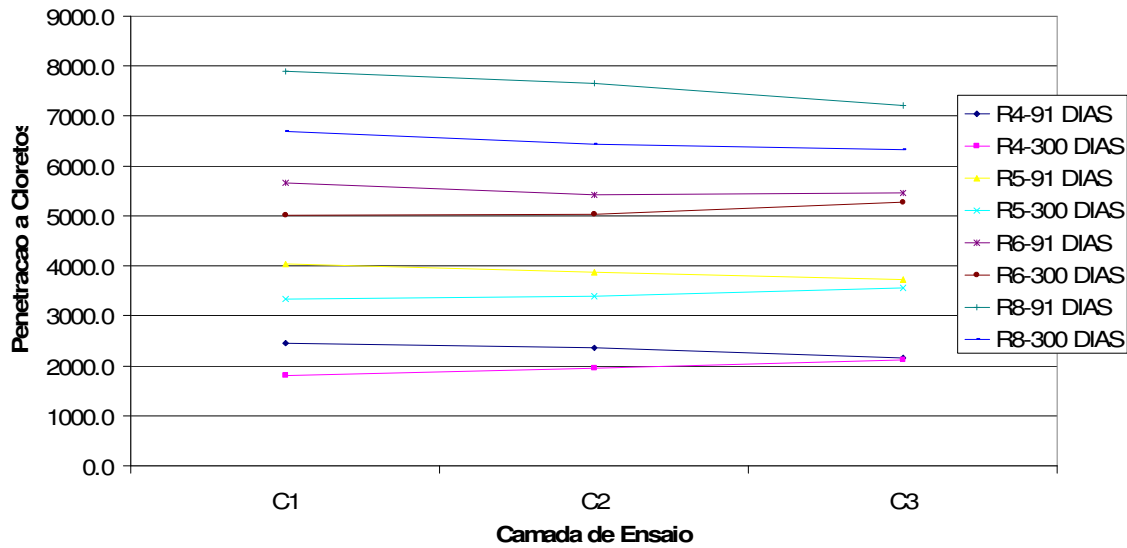


Figura 1 - Penetração de Cloretos (em Coulombs) versus camada de ensaio aos 91 e 300 dias por traço estudado em concretos isentos de adições

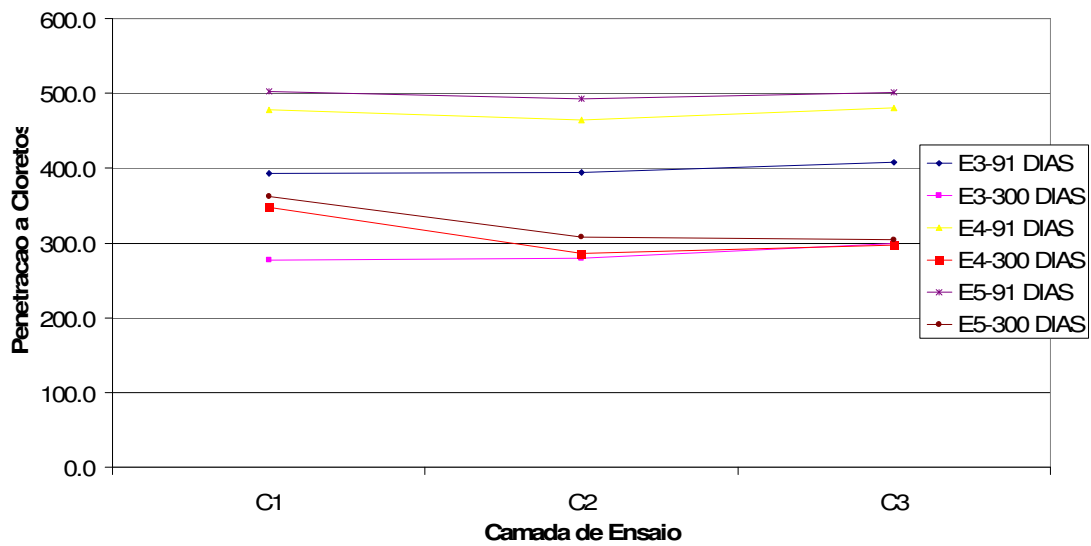


Figura 2 - Penetração de Cloretos versus camada de ensaio aos 91 e 300 dias por relação a/ag em concretos com presença de adições (s/ cal hidratada)

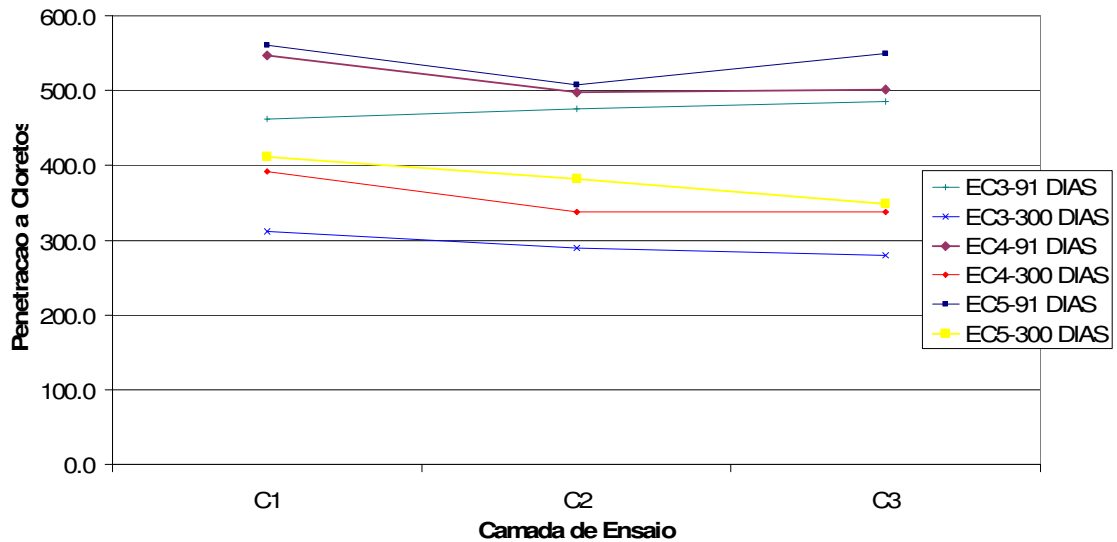


Figura 3 - Penetração de Cloretos versus camada de ensaio aos 91 e 300 dias por relação a/ag em concretos com presença de adições (c/ cal hidratada)

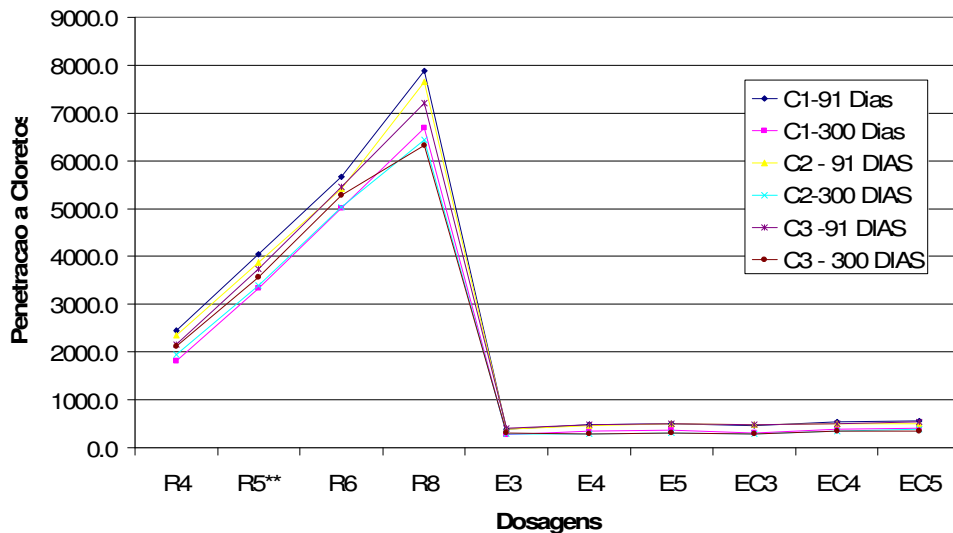


Figura 4 - Penetração de Cloretos versus dosagens estudadas por camada de ensaio aos 91 e 300 dias

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados de Ensaios de Resistência à Compressão

Os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão demonstram maiores resistências nos concretos isento de adições às primeiras idades. Isto é devido influencia das adições minerais nas primeiras idades do concreto, produzindo resistências menores devido ao lento processo que envolve a reação de hidróxido de cálcio em silicato de cálcio hidratado (C-S-H secundários).

Os concretos com adição de cal hidratada apresentaram valores de resistência maiores devido a reposição da reserva alcalina (íons OH-) com consequência diminuição da porosidade devido a uma adição maior de finos (efeito filler) acarretando uma densificação na microestrutura e consequente aumento da resistência, e como nas adições, devido ao aumento do teor de C-S-H devido às reações pozolânicas no concreto.

Quanto à durabilidade, deve-se notar que uma cura adequada em geral tem como consequência, uma hidratação mais avançada e com isto uma redução da permeabilidade. Em relação a idade, conforme o passar do tempo a resistência aumenta devido as reações de hidratação serem contínuas e efetivas porém o maior aumento se dá entre 28 a 91 dias (conforme observado nos resultados desta pesquisa).

4.2 Resultados de Determinação Rápida de Cloretos

Em se tratando da análise da permeabilidade do concreto a cloretos, os concretos isentos de adições apresentaram índices de carga passante (Coulomb – medida de referência do ensaio) elevadíssimas em relação ao concreto com adições minerais.

Em comparação aos concretos com adições minerais, os concretos no qual ocorreu a adição de cal hidratada apresentaram valores de carga passante maiores em relação aos concretos apenas com adições. DAL RI apud HEIKAL et al (2002) explicou que esta maior penetração deve-se ao aumento na condutividade na solução aquosa dos poros devido a maior concentração de íons Ca⁺⁺, apesar da cal diminuir a porosidade pela ação química e física de refinamento dos poros.

De modo geral, a camada 1 (0 - 1,0 cm) apresentou valores de permeabilidade maiores que as camadas 2 (2,0 - 3,0 cm), e os valores da camada 2 em relação aos resultados da camada 3 (4,5 - 5,5 cm) consequentemente. Isto se deve a uma menor densificação da microestrutura e da influência do efeito parede na camada de cobertura da armadura (onde se localiza a camada 1 estudada). Os valores da camada 3 maiores que o da camada 2 deve-se a uma melhor densificação da estrutura com um melhor empacotamento dos agregados no interior da peça estrutural, não sendo afetado por problemas executivos.

Comparando entre si os resultados de permeabilidade a cloretos entre as idades de 91 e 300 dias para os traços estudados, os concretos sem adições minerais não apresentaram variações significativas ao longo do tempo na permeabilidade a cloretos devido às reações químicas primárias serem maiores e a existência de uma microestrutura mais aberta quando comparada a concretos com adições. Com relação aos traços compostos com adições minerais, estes apresentaram sensíveis aumentos de resistência à penetração de cloretos aos 300 dias em relação aos resultados encontrados à 91 dias, com ganhos de resistência à penetração entre 15 a 35%. Os traços com adições isentos de cal os traços com fator a/c maiores apresentaram os maiores ganhos percentuais e no traço com adição de cal o fator a/c mais baixo (a/c= 0,3) apresentou o maior ganho percentual.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios em concretos com elevados teores de adições apresentam valores inferiores de carga passante em Coulomb em relação aos obtidos pelo concreto de referência (isento de adições), comprovando o benefício dos efeitos filler e pozolânico e sua consequente densificação das zonas de transição do concreto, diminuindo assim a conectividade entre os poros e dificultando o transporte de fluidos e íons agressivos. As

misturas com cal hidratada apresentaram valores de permeabilidade e de resistência à compressão maiores que as misturas sem a presença da cal, devido aos efeitos físicos e químicos benéficos da cal já explicitados neste artigo. Em relação ao aumento de idade, o aumento de resistência a penetração de cloretos confirmou-se em todos os traços, mais significativa nos traços com maiores fatores a/ag (devido a maior permeabilidade da mistura e reações mais significantes e efetivas dentro do intervalo de tempo estudado) e nos traços com adição de cal hidratada (pelos fatores já explicados neste artigo).

Em relação às diferentes profundidades analisadas, no estudo da corrosão em vistas à proteção da camada de revestimento estrutural, a camada 1 (0-1,0 cm) apresentou maiores valores de permeabilidade, tanto para 91 quanto para 300 dias, comprovando uma menor densificação da microestrutura e da influência do efeito parede na camada de revestimento da armadura, apresentando um efeito local de relação água/aglomerante maior que no restante do mesmo concreto, com conseqüente maior porosidade e maior condutividade dos poros do concreto. Comparando esta camada entre os 3 concretos dosados, e analisando as diversas relações a/ag, os resultados demonstraram que houve um grande aumento no impedimento do ingresso de cloretos quando esta camada foi analisada em concreto com adições minerais, vindo de valores conforme ASTM C 1202-97 considerados altos e moderados em concretos isentos de adições para valores considerados muito baixos nos concretos com adições minerais com e sem a presença de cal hidratada, para ambas as idades estudadas.

6. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C1152-90.*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. *Standard test method for electrical indication of concret's ability to resist chloride ion penetration- ASTM C1202-97.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - NBR 5739-94.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - NBR 7680-83.*

Bentur, A., Diamond S., Berke, N. *Steel corrosion in concrete.* London: E & F N Spon, 1997.

DAL RI, M. *Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.* Dissertação de Mestrado. UFSM Santa Maria, 2002

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, Departamento de Engenharia Civil

ISAÍÁ, G. C. *Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura*. Tese. Universidade de São Paulo, 1995.

DAUBE, J.; BAKKER, R.. *Portland blast-furnace slag cement: a review, in Blended Cements*, Ed. G. Frohnsdorfl, ASTM Sp. Tech. Publ. No. 897, pp 5-14 (Philadelphia, Pa, 1986)

LI, S.; ROY, D.M. *Investigation of relations between porosity, pore structure, and Cl- diffusion of fly ash and blended cement pastes*. Cement and Concrete Research, Pergamon Journals (ed), V.16, p. 749-759, 1986.

Massazza, F. *Pozzolana and pozzolanic cements*. In: Hewlett, P. C. (ed) *Lea's chemistry of cement and concrete*. London: Arnold, 1998, p. 471-632.

MASLEHUDDIN, M.; AL-MANA, A.I.; SARICIMEN, H.; SHAMIM, M. *Corrosion of reinforcing steel in concrete containing slag or pozzolans*. Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, V.12, n.1, p 24-31, 1990.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do concreto*. Editora PINI, 2^a.edição, São Paulo, 1997.