

# **Durabilidade da camada de cobrimento ao ataque por cloretos de protótipos de concreto estrutural com altos teores de cinza volante**

**Bianca P. Moreira<sup>1</sup>, Geraldo C. Isaia<sup>2</sup>, Antônio L. G. Gastaldini<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Engenheira Civil, Mestranda da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/RS. E-mail: [bianca@net.crea-rs.org.br](mailto:bianca@net.crea-rs.org.br)*

<sup>2</sup>*Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil, professor da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/RS. E-mail: [gisaia@terra.com.br](mailto:gisaia@terra.com.br)*

<sup>3</sup>*Arquiteto, Doutor em Engenharia Civil, professor da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/RS. E-mail: [gastaldn@ct.ufsm.br](mailto:gastaldn@ct.ufsm.br)*

## **RESUMO:**

Visando aproximar resultados de laboratório aos de uma construção real, juntamente com corpos de prova foram moldadas peças protótipos com dimensões semelhantes às de uma estrutura que, após a desmoldagem foram colocadas a céu aberto até a idade de 91 dias para os ensaios acelerados. A partir das peças protótipos foram extraídos testemunhos, parte foram seccionados a cada 2,5 cm de distância da camada de cobrimento, da superfície até 5 cm de profundidade, submetidos ao ensaio permeabilidade a cloretos e parte foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, juntamente com corpos de prova moldados. Este procedimento tem por objetivo traçar o perfil da variação das propriedades estudadas com a espessura da cobertura da camada de cobrimento e comportamento das variáveis de durabilidade em misturas de concreto com elevados teores de cinza volante.

**PALAVRAS CHAVE:** concreto, cloreto, camada de cobrimento

## **1. INTRODUÇÃO**

O emprego em escala crescente de quantidades elevadas de subprodutos ou resíduos industriais e agrícolas como, por exemplo, pozolanas, na construção e, em particular, nas estruturas de concreto, tem sido a resposta dos pesquisadores para inquietações que preocupam a comunidade científica e a população em geral, quais sejam: sustentabilidade, ecoeficiência e poluição ambiental, de um lado, economia e durabilidade das construções, de outro.

O concreto é um material composto de três fases: agregado, pasta e interface pasta-agregado, dependendo a durabilidade e os mecanismos de transporte de fluidos das duas últimas fases, em especial da sua porosidade e da conectividade dos poros, segundo uma abordagem clássica da constituição da microestrutura do concreto estrutural. Os poros capilares são os maiores responsáveis pela permeação de fluidos através da estrutura porosa e, também, as vias de acesso ou de saída da água para realizar o equilíbrio higrométrico com o meio ambiente.

Devido ao efeito parede que se estabelece, no concreto, entre a pasta e o agregado há acúmulo de água nesta zona acarretando aumento da relação água/materiais cimentícios e provendo espaço para formação de compostos de maior tamanho como os cristais de

hidróxido de cálcio e etringita. Esta zona com menor teor de sólidos apresenta maior porosidade, sendo local preferencial para a formação de fissuras devido ao acúmulo de tensões, que são transferidas grão a grão e aumentam de tamanho com o passar do tempo, seja por aumento de carga ou variações das condições termo-higrométricas (retração).

A metodologia de abordagem quando se realiza pesquisa em laboratório em corpos de prova moldados não está em completa sintonia com o concreto de uma estrutura real porque as porosidades da pasta e da interface dos corpos de prova são levadas em conta nos estudos, de modo conjunto, ao se medir ou determinar as variáveis ligadas à microestrutura ou durabilidade e os diversos elementos que compõem o arcabouço de uma construção apresentam volume, forma e dimensões distintas, em especial devido às diferenças entre a interface fôrma/concreto e o concreto do interior da peça.

Observa-se que a durabilidade de uma estrutura real de concreto será bastante distinta de um concreto moldado em corpos de prova em laboratório, pois não leva em conta as variações da microestrutura da camada de cobrimento da armadura nem as diferenças e variações de micro clima que ocorrem durante a vida útil desta estrutura. Assim, o concreto da superfície de uma dada peça apresenta características distintas do seu interior, ou seja, é mais poroso e mais suscetível à percolação e trocas de fluidos em ambos os sentidos. Assim como na interface pasta/agregado, a interface forma/concreto também apresenta o efeito parede tornando esta zona mais porosa, em escala distinta, pois na primeira a espessura não excede de alguns micrometros e na segunda de alguns centímetros.

A camada de cobrimento da armadura é a porção da peça de concreto que deveria ter maior estabilidade dimensional, maior resistência e compacidade para possibilitar uma maior proteção ao aço e durabilidade à estrutura.

Existem diferenças de constituição e de necessidades entre a microestrutura da superfície e microestrutura do interior de uma peça de concreto, porque, a superfície é o envoltório externo e deveria ser mais compacto e resistente à penetração de agentes agressivos externos para prover maior durabilidade à estrutura.

O concreto com adições minerais apresenta sua microestrutura mais densa e impermeável, dificultando o transporte de substâncias agressivas através dos canais capilares (ref. [9]). Desta forma, o tema da pesquisa em pauta se fundamenta no estudo do comportamento da durabilidade da camada de cobrimento do concreto de testemunhos extraídos de protótipos moldados e curados em laboratório em condições mais próximas possíveis das condições ambientais das estruturas convencionais; e, na pesquisa de traços de concreto com altos teores de cinzas volantes, visto que este material é uma pozolana encontrada com abundância no estado do Rio Grande do Sul.

## **2. OBJETIVOS**

No campo técnico pretende-se contribuir com esta pesquisa, através do incremento da durabilidade do concreto, para o aumento do desempenho das estruturas durante sua vida útil; no econômico, por meio de menor número de intervenções no decorrer da utilização das construções, diminuir os custos de manutenção e trazer melhores relações custo/benefício durante a vida da construção; no social, pela adição de altos teores de adições pozolânicas, este estudo visa diminuir os custos ambientais da produção do concreto, ou seja, uso de subprodutos industriais ou agrícolas minimizando a poluição dos ecossistemas, redução do

consumo de energia na fabricação de clínquer e, finalmente, diminuição da emissão de gases poluentes para atmosfera reduzindo o efeito estufa.

Esta pesquisa visa estudar a durabilidade da camada de cobrimento, em diversas profundidades a partir da superfície do concreto, até 50 mm de espessura. Onde será objeto de estudo as correlações de parâmetros de durabilidade referentes à permeabilidade a cloretos nos concretos estudados, comparando concretos de referência e pozolânicos (cinza volante), com e sem a adição de cal hidratada, entre ensaios acelerados de curta duração, sob condições laboratoriais, e de longa duração, sob ação natural dos agentes ambientais.

A não consideração, nos ensaios de laboratório, das diferenças microestruturais do concreto do cobrimento em relação ao do interior e a diferença que existe entre o volume de concreto sob ação de uma dada variável em corpo de prova moldado e o concreto de uma peça estrutural moldada e curada em condições reais demonstra que muitos problemas ligados à falta de durabilidade das estruturas de concreto são originados da falta de integração entre realidade virtual (laboratório) e realidade real (obra), em especial com respeito aos modelos para predição da vida útil de uma estrutura. Outros fatores importantes são os problemas decorrentes da modelagem dos mecanismos de deterioração do concreto em laboratório que são, muitas vezes, bastante distintos da realidade devido às diferenças de escala ou volume de concreto ensaiado, à idade do ensaio ou as correlações imprecisas entre ensaios acelerados e em escala natural (ref.[8]).

Outro aspecto a ser considerado no tema desta pesquisa é devido ao fato que os produtores de cimento, produtores de concreto e construtores, com o intuito de preservar e conservar o meio ambiente, têm procurado nos dias de hoje, aumentar o desempenho técnico e potencializar os ganhos econômicos e ecológicos pela introdução de teores crescentes de adições minerais em concreto estrutural.

As pozolanas, quando utilizadas como adições minerais, atuam na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado através da formação de compostos hidratados secundários que refinam os poros e o tamanho dos grãos, por efeito químico e, ainda, pela obstrução e densificação das partículas finas, por efeito físico (ref. [6]). Por isso, a microestrutura do concreto com adições minerais torna-se mais fina e homogênea, aumentando a compacidade, resistência e durabilidade da pasta cimentícia. Da mesma forma, reduzem a conectividade dos poros da pasta, também atuam na microestrutura da zona de cobrimento da armadura, tornando-a mais compacta e impermeável.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

Para realização desse estudo foram moldadas vigas de concreto – protótipos, com traços discriminados na Tabela 1, abaixo, de onde foram extraídas as amostras para os ensaios.

Tabela 1: Traços empregados em massa \*

Denominação	Traço em Massa
R 45	1 : 1,60 : 2,40 : 0,45
R 60	1 : 2,511 : 3,156 : 0,60
R 80	1 : 4,472 : 3,417 : 0,80
CV 40	0,50 : (0,50) : 1,117 : 2,133 : 0,3979 : 0,003
CV 55	0,50 : (0,50) : 1,984 : 2,933 : 0,54942 : 0,00083

CV 75	0,50 : (0,50) : 3,75 : 3,389 : 0,74883 : 0,00167
CV 40 c	0,50 : (0,50) : (0,20) : 0,507 : 1,778 : 0,39759 : 0,00345
CV 55 c	0,50 : (0,50) : (0,20) : 1,229 : 2,444 : 0,54839 : 0,0023
CV 75 c	0,50 : (0,50) : (0,20) : 2,316 : 3,21 : 0,75

\* cimento ; (cinza volante): (cal) : areia : brita : água : aditivo

As moldagens das vigas, coletas do material para estudo e ensaios, utilizaram as instalações e equipamentos do Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

A pesquisa foi conduzida conforme as seguintes etapas descritas abaixo.

### 3.1 Moldagem dos Protótipos

Foram confeccionados trinta e três protótipos de concreto de 75 cm X 20 cm X 15 cm para coletas de material estudado com idade de 91 dias e setenta e dois corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm X 20 cm, para ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 5739/94, nas idades de 28 e 91 dias. Traços de cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) – CP V, cinza volante, cal hidratada, areia média lavada de rio, brita 1, água e aditivo plastificante (GLENIUN).



Fotografia 1: Armazenamento dos protótipos ata a data de ensaio

### 3.2 Extração de testemunhos

As extrações dos concretos foram realizadas sobre uma base firme e fixa, com equipamento adequado em boas condições de utilização.

Para cada protótipo de 75 cm X 20 cm X 15 cm foram extraídos seis testemunhos com 100 mm de diâmetro, de acordo com a NBR 7680/83, totalizando 198 testemunhos.

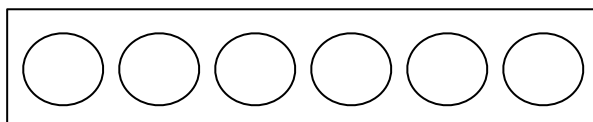


Figura 1 – Esquema de extração de testemunhos

### 3.3 Penetração de íons cloreto

O ensaio de penetração de cloretos foi conduzido conforme a norma ASTM 1202/97 em testemunhos de 100mm de diâmetro, extraídos por perfuratriz apropriada dos protótipos, aos 91 dias, os quais, foram devidamente preparados antes de serem submetidos a ensaio conforme exemplificado por Winck [10].



Fotografia 2: Corte dos testemunhos no preparo do ensaio



Fotografia 3: Ensaio de penetração de Cloretos

### 3.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido conforme a norma NBR 5739/80 nos corpos de prova moldados e nos testemunhos de 100mm de diâmetro, extraídos por perfuratriz apropriada dos protótipos, aos 28 e 91 dias.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resistência à compressão

A Tabela 2 apresenta o valor médio da resistência a compressão aos vinte e oito dias dos traços descritos na Tabela 1.

Tabela 2: Resultados da resistência à compressão aos 28 dias

a/ag	Referência		a/ag	CV (a/ag)		a/ag	CV (a/ag) c	
	CP	Testemunho		CP	Testemunho		CP	Testemunho
0,45	60,2	64,9	0,40	36,1	41,2	0,40	41,2	44,0
0,60	38,4	39,6	0,55	21,5	27,2	0,55	28,0	27,5
0,80	23,3	23,8	0,75	13,9	8,8	0,75	12,2	12,6
R	0,999	1,000		0,999	0,964		0,977	0,989

A Tabela 3 apresenta o valor médio da resistência a compressão aos noventa e um dias dos traços descritos na Tabela 1.

Tabela 3: Resultados da resistência à compressão aos 91 dias

a/ag	Referência	a/ag	CV (a/ag)	a/ag	CV (a/ag) c
------	------------	------	-----------	------	-------------

	CP	Testemunho		CP	Testemunho		CP	Testemunho
0,45	64,3	75,5	0,40	51,2	50,6	0,40	56,2	57,1
0,60	38,9	44,1	0,55	35,0	34,7	0,55	36,3	37,4
0,80	28,0	30,0	0,75	20,4	15,0	0,75	19,8	19,5
R	0,993	0,995		0,993	0,975		0,995	0,992

#### 4.2 Penetração de íons cloreto

A tabela abaixo apresenta um quadro resumo das leituras realizadas a cada trinta minutos durante seis horas em amostras de concreto submetidas ao ensaio de penetração de íons cloreto nas camadas de 0 a 5 cm (Camada 1), de 2,5 a 7,5 cm (Camada 2) e de 5 a 10 cm de profundidade (Camada 3), que fornece dados para cálculo da carga passante em Coulombs (C) nos traços analisados nas distintas profundidades desde a superfície ao interior.

Tabela 4: Permeabilidade a cloretos

Penetração de íons cloreto (Coulombs)			
Traço	Camada: 1	Camada: 2	Camada: 3
R 45	2268,63	2501,82	2768,22
R 80	4391,46	4659,48	5035,14
CV 40	569,61	582,03	554,85
CV 75	1108,08	926,64	843,39
CV 40 c	1328,31	1097,37	924,75
CV 75 c	1766,25	1458,45	1332,27

### 5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A adição da cal hidratada no concreto elimina os efeitos colaterais advindos das reações pozolânicas, atribuindo de vantagens significativas frente aos parâmetros de durabilidade investigados, acréscimos de resistência à compressão aos 91 dias, quando comparados aos concretos com mesma relação água /aglomerante sem o emprego da cal, como pode ser evidenciado na Tabela 3.

Conforme os valores apresentados para a carga passante na Tabela 4, podemos concluir que para concreto de traço **R 45** a permeabilidade a cloretos é considerada moderada, para concreto de traço **R 80** a permeabilidade a cloretos é alta, para concreto de traço **CV 40** a permeabilidade a cloretos é muito baixa, para concreto de traço **CV 75** a permeabilidade a cloretos é baixa para a camada de 0 a 5 cm de profundidade e muito baixa para as demais camadas, para concreto de traço **CV 40 c** a permeabilidade a cloretos é baixa e para concreto de traço **CV 75 c** a permeabilidade a cloretos é baixa também.

Assim podemos verificar que a utilização de adições minerais reduz a permeabilidade a cloretos quando comparamos com traços de cimento portland (R 45 e R 80) sem adições.

Ainda podemos verificar que para os traços dos concretos de referência a permeabilidade a cloretos aumenta do exterior para o interior da peça enquanto os traços com cinza volante com ou sem adição de cal têm no interior da peça menor permeabilidade a cloretos que na camada exterior. Porém, mesmo maior, a carga passante na camada mais exterior da peça de concreto com cinza volante é considera de baixa (1000 C a 2000 C) a muito baixa (100 C a

1000C), enquanto que nos traços de referência a carga passante é de moderada (2000 C a 4000 C) a alta (maior que 4000 C).

## 6. CONCLUSÕES

A adição de cal ao concreto propicia um material com maior resistência à compressão.

A substituição de parte do cimento por cinza volante nos traços de concreto demonstra que a permeabilidade a cloretos é menor no interior da peça do que na superfície, mas, assim mesmo, é mais resistente a penetração de íons cloretos, com pode ser verificado na Tabela 4.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo o concreto de cimento portland o repositório que possui maior potencialidade de incorporar adição mineral, com a correspondente diminuição de consumo de clínquer, quanto maior é o teor de adições no concreto, maiores serão os benefícios sociais obtidos. A viabilidade do emprego de altas quantidades de pozolanas em concreto estrutural permitirá, no futuro, aumentar o emprego em estruturas de concreto da cinza volante, subproduto da geração de energia em usinas termoelétricas, resíduo poluidor do ambiente, com grande ocorrência no Rio Grande do Sul.

Acredita-se, que os resultados desta pesquisa possam contribuir para a conscientização dos formadores de opinião que fazem parte de comissões de estudos de normas ou recomendações nacionais e/ou internacionais, sobre os limites máximos que podem ser adotados para a substituição de cimento por adições minerais, de modo a tornar estes documentos menos prescritivos e mais orientados para o desempenho do concreto.

## 8. GLOSSÁRIO

**CP** – corpo de prova moldado em fôrma metálica cilíndrica padronizada.

**Testemunho** – corpo de prova extraído de blocos com broca vazada.

## 9. REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete** - ASTM C1152-90.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **Standard test method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement** - ASTM C114-99.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **Standard test method for electrical indication of concret's ability to resist chloride ion penetration-** ASTM C1202-97.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos** – NBR 5739-94.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto** – NBR 7680-83.
6. CERVO, T. C. **Influência da finura do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação. Universidade federal de Santa Maria, 2001.



7. **ISAIA, G. C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese. Universidade de São Paulo, 1995.
8. **ISAIA, G. C. Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões.** Workshop sobre durabilidade das construções, 2º, São José dos Campos, SP, 2001. **Anais.** São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2001, p.
9. **HOPPE, J. F. Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e a absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais.** Dissertação. Universidade federal de Santa Maria, 2002.
10. **WINCK, M. L. Efeitos físico e pozolânico de adições minerais sobre a penetração de cloretos no concreto.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, 2002.