

Chloride accelerated test: influence of silica fume, water/binder ratio and concrete cover thickness

Ensaio acelerado por cloretos: efeito da sílica ativa, relação água/aglomerante e espessura de cobrimento do concreto

E. PEREIRA ^a
eduardopereira@uepg.br

A. RESENDE ^b
andrearesende.s@gmail.com

M. H. F. DE MEDEIROS ^c
medeiros.ufpr@gmail.com

L. C. MENEGHETTI ^b
lmeneghetti@gmail.com

Abstract

In developed countries like the UK, France, Italy and Germany, it is estimated that spending on maintenance and repair is practically the same as investment in new constructions. Therefore, this paper aims to study different ways of interfering in the corrosion kinetic using an accelerated corrosion test – CAIM, that simulates the chloride attack. The three variables are: concrete cover thickness, use of silica fume and the water/binder ratio. It was found, by analysis of variance of the weight loss of the steel bars and chloride content in the concrete cover thickness, there is significant influence of the three variables. Also, the results indicate that the addition of silica fume is the path to improve the corrosion protection of low water/binder ratio concretes (like 0.4) and elevation of the concrete cover thickness is the most effective solution to increase protection of high water/binder ratio concrete (above 0.5).

Keywords: corrosion; CAIM; silica fume, water/binder ratio; concrete cover thickness.

Resumo

Em países desenvolvidos como os do Reino Unido além da França, Itália e Alemanha, estima-se que o gasto com manutenção e reparo é praticamente igual ao investimento em obras novas. Por este motivo, este trabalho visa estudar o efeito de formas de interferir na cinética da corrosão a partir da aplicação de um ensaio acelerado de corrosão – CAIM, que simula o ataque por cloretos. As três variáveis estudadas são: espessura de cobrimento, uso de sílica ativa e relação água/aglomerante. Foi constatado, pela análise de variância da perda de massa das barras e do teor de cloretos na espessura de cobrimento, que existe influência significativa das três variáveis do estudo. Além disso, os resultados indicam que a adição de sílica ativa é o caminho para melhorar a proteção de concretos de relação água/aglomerante baixa ($a/agl = 0,40$) e a elevação do cobrimento é o caminho mais eficiente para aumentar a proteção das armaduras em concretos de relação água/aglomerante elevada ($a/agl = 0,50$ e $0,60$).

Palavras-chave: corrosão; CAIM; sílica ativa, relação água/aglomerante; espessura de cobrimento.

^a Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil 84030-900

^b Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil 85819-110

^c Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil 80060-000

1. Introdução

A corrosão de armadura é um grande problema mundial, resultando em altos custos de recuperação e reparo destas estruturas [1, 2]. Os gastos na prevenção e manutenção de produtos perdidos como resultado da corrosão atingem valores na ordem de 3,5 a 4% [3, 4]. Os custos indiretos são mais complexos, às vezes impossíveis de serem contabilizados [5]. Os problemas com a corrosão do aço trazem ao Brasil um prejuízo anual de 3,5% do produto nacional bruto (PNB) [6]. Para um PNB de 1,91 trilhões de dólares, tem-se um gasto de 66,86 bilhões de dólares por ano. Andrade e Fortes [7] creditam 18% destes gastos à construção civil, totalizando 15 bilhões de dólares do PNB.

A corrosão da armadura é influenciada por diversos fatores, tais como propriedades do concreto, tempo de exposição, condições da superfície da barra de aço, características do ambiente onde a estrutura está inserida e uso de materiais cimentícios suplementares. A taxa de corrosão da armadura é influenciada pela resistência à compressão do concreto. Ismail e Ohtsu [8] verificaram uma maior taxa de corrosão para concretos de resistência normal em comparação com concretos de alta resistência, atribuindo isto a baixa relação água/cimento e a presença de sílica ativa nas misturas. Resultados de ensaios de corrosão acelerada em concretos com diferentes resistências realizados por Abosrra et al. [9] confirmam as conclusões dos primeiros autores, acrescentando a conclusão de que a taxa de corrosão aumenta quando o tempo de exposição aumenta.

Segundo Xu et al. [10], a substituição parcial do cimento por cinza volante e sílica ativa contribui para aumentar o tempo de iniciação da corrosão. Além disso, mesmo sabendo que a reação pozolânica causada pelas adições reduzem o hidróxido de cálcio presente na solução dos poros do concreto, a quantidade limite de cloretos não diminui.

Yalciner et al. [11] avaliaram a influência da espessura de cobertura na resistência de aderência em concretos que sofreram um processo de corrosão acelerada. A degradação foi maior nos concretos de alta resistência do que em concretos de resistência normal. Nos corpos de prova com relação a/c alta, os produtos da corrosão fluíram para a superfície do concreto. Por outro lado, a baixa permeabilidade dos concretos de relação a/c igual a 0,40 manteve os produtos expansivos no entorno da barra, resultando no aparecimento de fissuras prematuras no concreto devido a ex-

pansão volumétrica. Esse fenômeno contribuiu para a redução da resistência de aderência nos concretos de alta resistência.

Durante muito tempo pesquisadores de todo o mundo vem desenvolvendo métodos para avaliação do processo corrosivo. No entanto, não existe ainda um consenso sobre quais são os melhores e mais confiáveis métodos de estudo da corrosão no concreto armado [12]. Para avaliação do processo existem técnicas como leitura de potencial de corrosão [13], resistência de polarização, migração e teor de cloreto [14, 15, 16], porém estas técnicas indicam somente o avanço do processo, não permitindo ainda em fase de concepção mitigar o ataque.

Para ensaios acelerados tem-se os ensaios de corrosão induzida por cloretos, como a Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM), que consistem em submeter prismas de concreto ao ingresso acelerado de cloretos. Este tipo de ensaio tem sido amplamente empregado por pesquisadores, obtendo-se resultados satisfatórios [17, 18, 19].

Neste contexto, este artigo busca estudar a influência da espessura de cobertura como barreira natural à entrada de íons cloretos no concreto, através do ensaio CAIM, bem como a influência da relação água/aglomerante e da sílica ativa na corrosão de armaduras. As conclusões obtidas com este trabalho podem ser usadas a fim de prevenir, ainda em fase de elaboração de projeto, possíveis problemas ocasionados por corrosão.

2. Materiais e métodos

O programa experimental consistiu em submeter prismas de concreto com uma barra de aço inserida em seu interior à um processo de corrosão acelerado, com o objetivo de verificar sua eficiência como barreira a entrada de íons cloretos.

2.1 Variáveis analisadas

As variáveis de análise desta pesquisa são a relação água/aglomerante (0,4; 0,5 e 0,6), a espessura de cobertura (4,0; 5,0 e 6,0 cm) e a presença ou não de sílica ativa. Sistematizando, o estudo compreende 18 variações: 3 níveis de relação água/aglomerante x 3 níveis de cobertura x 2 níveis relativos a presença ou não de sílica ativa. Para o ensaio de corrosão acelerada foram moldados 3 corpos de prova prismáticos para cada variável de análise,

Tabela 1 – Caracterização química e física do cimento CPV-ARI utilizado

Ensaio químico												
Ignition loss	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO livre	Equiv. alcal	Resíduo insolúvel			
3,6%	3,1%	17,8%	2,42%	60,5%	4,61%	3,38%	1,7%	0,70%	2,2%			
Ensaio físico												
Massa especif.	Exp. quente	Início de pega	Fim de pega	Cons. normal	Blaine	# 200	# 325	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
2,83 g/cm ³	0,47 mm	191 h:min	259 h:min	29,4 %	484 cm ² /g	0,2 %	2,0 %	23,0 MPa	32,9 MPa	37,8 MPa	46,3 MPa	

Tabela 2 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo

Agregado	Pulverulento %	Ø máximo mm	Módulo de finura	Inchamento %	Massa específica aparente		Massa unitária	
					Seca g/cm ³	Saturada g/cm ³	Solta kg/dm ³	Compactada kg/dm ³
Miúdo	1,1	2,40	1,74	1,37	2,65	2,68	1,58	1,78
Graúdo	0,49	19,5	7,0	-	3,01	3,02	1,66	2,24

resultando em um total de 54 prismas de concreto. Além destes, também foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de Ø 10 x 20 cm para a determinação da resistência à compressão dos concretos estudados, para ensaio aos 7 e 28 dias, totalizando 36 corpos de prova.

2.2 Materiais empregados

Os materiais utilizados foram escolhidos conforme a disponibilidade na região oeste do Paraná. O agregado miúdo é uma areia natural proveniente do rio Paraná e o agregado graúdo uma brita de origem basáltica. Quanto ao cimento, optou-se por um CPV - ARI - RS por ser, dentre os disponíveis no mercado, o que apresenta menor quantidade de adições em sua composição. A água utilizada é proveniente da rede pública de abastecimento. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam um resumo das principais características dos materiais utilizados.

A sílica ativa possui massa específica de 2,19 g/cm³. A caracteri-

zação química da sílica ativa encontra-se na Tabela 4. Utilizou-se um aditivo superplastificante de pega normal Muraplast FK 22 - MC Bauchemie. Conforme especificação do fabricante, a quantidade a ser utilizada é de 0,2 % a 3,0 % da massa de cimento. O aço usado nos ensaios de corrosão acelerada foi o CA-50A nervurado fornecido pela Arcelor Mittal, com diâmetro de 12,5 mm e comprimento de 14,5 cm.

Para a definição do proporcionamento das misturas a serem usadas na pesquisa foi utilizado o método de dosagem do IPT/EPUSP, conhecido como método dos quatro quadrantes, que se baseia no ajuste de curvas de resistência e trabalhabilidade em função dos requisitos estruturais. Os traços utilizados e os abatimentos obtidos estão na Tabela 5.

Para estudar a influência da sílica ativa, cada traço recebeu a substituição de 8% da massa do cimento por sílica ativa, sendo mantida constante a relação água/aglomerante e o $m(a + p)$ quando relacionado ao teor total de aglomerante. O traço de relação a/agl igual a 0,40 com sílica ativa recebeu a adição de 0,2% de adi-

Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado graúdo e miúdo

Agregado graúdo				Agregado miúdo			
Peneiras (mm)	Massa retida(g)	Porcentagens (%)		Peneiras (mm)	Massa retida(g)	Porcentagens (%)	
		Retida	Acumulada			Retida	Acumulada
37,5	-	0	0	6,3	0,8	0,13	0
31,5	-	0	0	4,75	0,6	0,1	0
25	-	0	0	2,36	3,8	0,63	1
19,5	57	5,7	6	1,2	33	5,41	6
12,5	604,2	60,5	66	0,6	39,3	6,44	13
9,5	283,5	28,4	95	0,3	225,1	36,87	50
4,75	47,3	4,7	99	0,15	270,8	44,36	94
Fundo	6,8	0,7	100	Fundo	37	6,06	100
Soma	998,8	100	-	Soma	610,4	100	-

Tabela 4 – Caracterização química da sílica ativa utilizada

Composição química (%)													
SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	MgO	Cl	ZnO	MnO	Na ₂ O	BaO
96,4	0,94	0,06	0,3	0,02	0,11	0,007	-	0,73	-	-	0,029	0,17	-

Tabela 5 – Consumo de materiais por m³ de concreto e abatimento

Concreto	Cimento (kg/m ³)	Silica ativa (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Abatimento (mm)
1	510,46	-	689,12	1107,70	204,18	90
2	384,32	-	518,83	833,97	192,16	110
3	303,69	-	409,98	659,01	182,21	110
4	469,62	40,84	633,99	1019,08	187,85	90
5	353,57	30,75	477,33	767,26	176,79	100
6	279,39	24,30	377,18	606,29	167,64	110

tivo superplastificante No restante dos traços não foi necessário o uso de aditivos pois todos atingiram o abatimento especificado.

2.3 Corpos de prova empregados

Os corpos de prova utilizados no ensaio são prismáticos, de dimensões iguais a 10 cm x 10 cm x 20 cm e possuem uma barra de aço de 14,5 cm de comprimento inserida em seu interior na espessura do cobrimento definido entre as variáveis de estudo (Figura 1a). Para garantir que as medidas do cobrimento estipulado fossem respeitadas, o conjunto barra/espaçador/fio de cobre foi posicionado nas fôrmas de madeira utilizando-se espaçadores (Figura 1b).

De acordo com o ensaio acelerado proposto, os cloretos presentes em uma solução na qual o concreto fica imerso durante o ensaio, são induzidos a migrarem em direção as barras de aço. Para que isto ocorra, fios de cobre são posicionados acima das barras da armadura, antes da moldagem dos corpos de prova (Figura 1b). Os fios utilizados possuem 4 mm de diâmetro. Foi escolhido este diâmetro para evitar a possível degradação decorrente do contato do fio com as substâncias corrosivas, conforme verificou-se em uma etapa preliminar de testes.

Após a desforma, que ocorreu 24 horas depois da concretagem, os corpos de prova foram curados sob condição saturada durante

28 dias, e então submetidos ao ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM).

2.4 Corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM

Para a avaliação do grau de corrosão das armaduras para as seis composições de concreto foi utilizado o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM). O CAIM é um ensaio acelerado de corrosão que se enquadra entre os ensaios eletroquímicos. Sua metodologia foi desenvolvida e adaptada por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O ensaio teve seu primeiro uso por Lima [17], a partir de uma concepção original empregada por Varela, Espinosa [20] e desde então tem sido empregada com sucesso por vários pesquisadores, cada qual com pequenas modificações nos procedimentos [18, 19]. Dada suas características, pode ser usada de forma eficiente para se obter dados comparativos de proteção quanto a corrosão [18]. Neste ensaio, a aceleração da corrosão é conseguida pela indução eletroquímica, que combina a exposição de corpos de prova a soluções agressivas, com a aplicação de corrente elétrica para estimular que cloretos migrem na direção da barra. No ensaio emerge-se os corpos de prova até a altura da barra, em uma solução de

Figura 1 – (a) Croqui das medidas dos corpos de prova e recipiente de suporte para o ensaio, medidas em cm; (b) Detalhe do conjunto armadura/espaçador/fio preparado para a moldagem

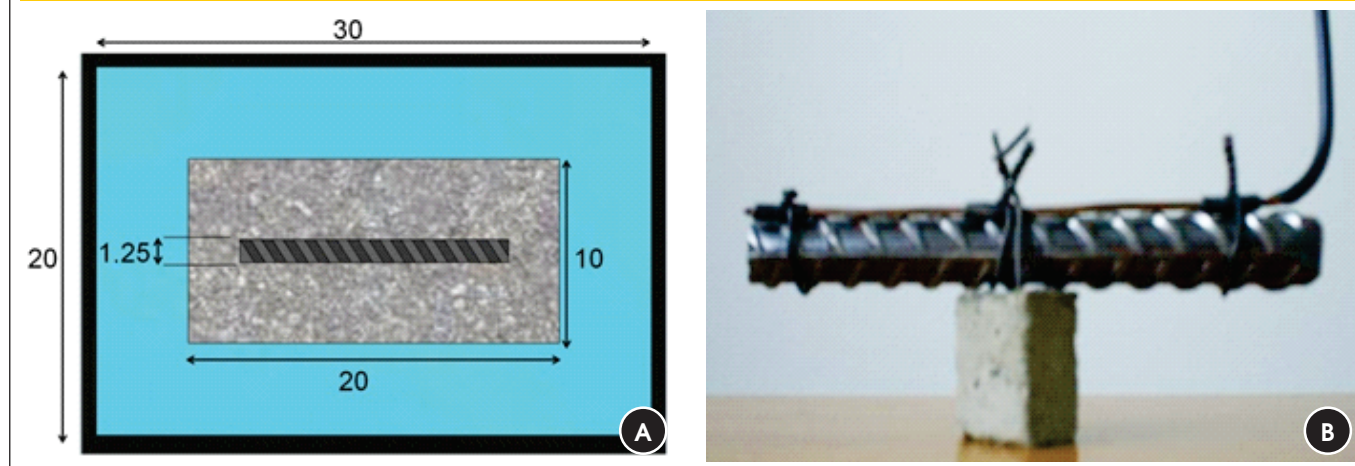
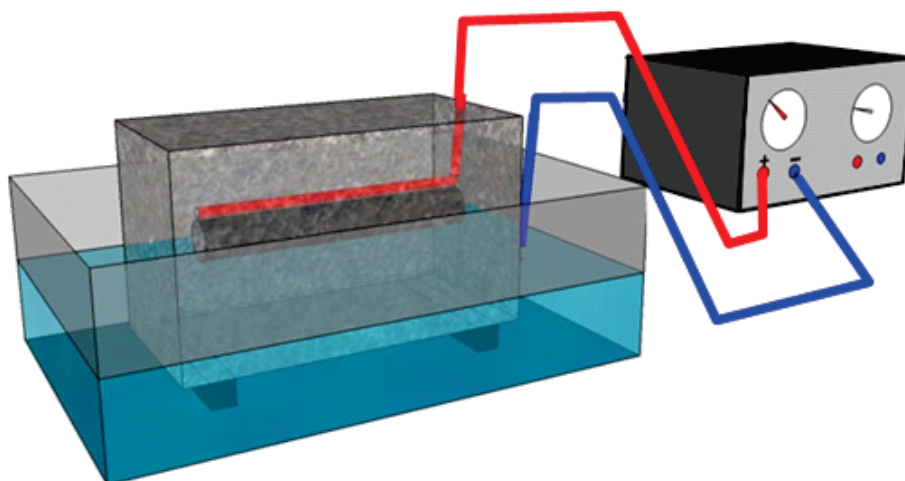


Figura 2 – Esquema de realização do ensaio CAIM



35g/l de NaCl, concentração similar à da água do oceano atlântico [19]. Desta forma, facilita-se o acesso ao concreto tanto do oxigênio quanto do cloreto, essenciais para que o processo de corrosão ocorra. Para aplicação da corrente elétrica, os corpos de prova são ligados a fontes de alimentação como mostrado na Figura 2.

O ensaio simula as condições essenciais para se estabelecer o processo de corrosão no concreto, porém com uma velocidade acelerada. Quando se submetem corpos de prova ao ensaio CAIM, obtêm-se como resposta o desenvolvimento e aceleração do processo de corrosão do aço e como consequência ocorre a formação de óxidos e hidróxidos de ferro na superfície da barra, que é expansivo e provoca a abertura de fissuras longitudinais a armadura. Os resultados obtidos com o ensaio permitem inferir comparativamente sobre a qualidade do concreto utilizado [19].

Antes de iniciar a execução do ensaio foi necessário construir uma câmara de corrosão acelerada. A câmara foi projetada de forma a favorecer a criação de uma atmosfera salina no seu interior sem que houvesse a liberação do vapor de cloretos para o ambiente externo, sendo confeccionada em madeira compensada naval, com tampa superior de vidro, a qual possui dimensões (90 cm x 200 cm x 40 cm) que possibilitam o ensaio de vários corpos de prova simultaneamente.

Durante o ensaio, as amostras ficaram parcialmente imersas. A altura da água foi definida conforme a espessura do revestimento.

Os corpos de prova foram imersos em recipientes plásticos individuais, sem renovação da solução durante o ensaio. No início do ensaio, o fio que foi concretado junto a barra foi conectado ao pólo positivo da fonte – atuando como ânodo no processo eletroquímico. Outro fio de cobre foi colocado na solução e conectado ao pólo negativo da fonte de alimentação – servindo de cátodo no processo eletroquímico. A densidade de corrente adotada foi de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, o que corresponde a aproximadamente 24,8 mA.

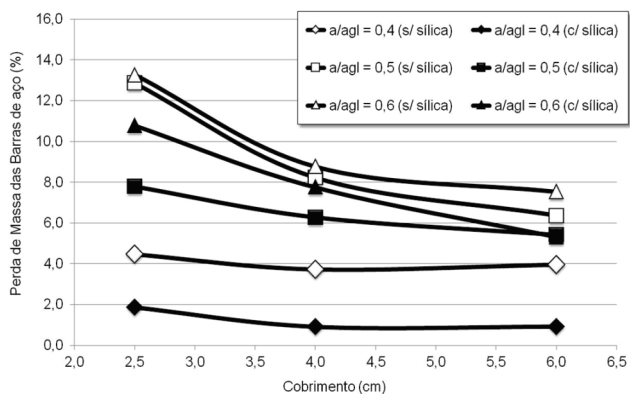
Os equipamentos empregados para aplicação da corrente foram fontes de alimentação modelo Dower PS – 3003 D de corrente contínua. Foi utilizado também um Nobreak para garantir que, caso houvesse falta de energia, o ensaio permanecesse em andamento. O laboratório onde os ensaios foram executados apresentavam controle de temperatura (23°C) e umidade (60%), porém dentro do aparato de ensaios não foi feito nenhum controle de temperatura e umidade.

Devido à necessidade de se ensaiar vários corpos de prova ao mesmo tempo e pelo limitado número de fontes, houve a necessidade de ligar alguns corpos em série formando um circuito. Esta opção é válida uma vez que pelos conceitos de eletricidade, quando se ligam resistores formando um circuito em série, a corrente será a mesma para todos os elementos da ligação. A quantidade de corpos de prova que puderam ser ligados continuamente (máximo 3) foi determinada pela máxima diferença de potencial

Tabela 6 – Dados de resistência à compressão dos concretos (MPa)

		Relação água/aglomerante					
		Sem sílica ativa			Com sílica ativa		
		0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
Dias	7	38,9	28,0	24,5	39,4	32,8	23,8
	28	47,2	38,2	31,2	49,6	36,9	31,7

Figura 3 – Perda de massa das barras x espessura de cobrimento para as diferentes relações água/aglomerante



suportada pelas fontes, mantendo-se a corrente elétrica definida para este trabalho.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio CAIM durante 20 dias. Posteriormente, os prismas de concreto foram mantidos durante 7 dias a temperatura ambiente para secagem. Na sequência procedeu-se a análise visual do estado de degradação dos corpos de prova e a extração das amostras de pó para contagem do teor de cloretos. A extração foi feita utilizando-se uma furadeira com uma escala acoplada para garantia da espessura de cobrimento.

As amostras do pó do concreto foram acondicionadas em sacos plásticos, lacradas e levadas até o Laboratório de Concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu para proceder aos ensaios do teor de cloretos. Terminada a etapa de extração do pó do concreto, os corpos de prova foram rompidos na prensa hidráulica para retirada das barras de aço.

Após serem retiradas do concreto, as barras passaram por um processo de limpeza conforme procedimento descrito pela norma americana ASTM A380 [21]. Após limpeza completa, procedeu-se a pesagem das barras.

3. Resultados e discussões

As principais variáveis de resposta analisadas neste trabalho foram a perda de massa das barras de aço e o teor de cloretos contidos nas camadas de cobrimento após a submissão dos corpos de prova ao ensaio de corrosão acelerada. Moldaram-se também corpos de prova para controle das resistências do concreto. Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 6 e foram utilizados como parâmetro de caracterização dos concretos do estudo.

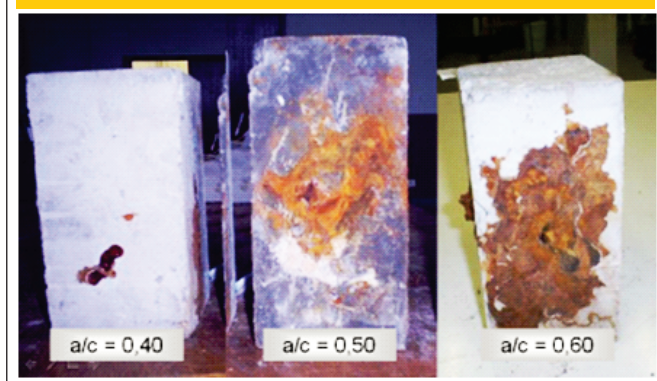
3.1 Grau de corrosão medido através de perda de massa das barras de aço

Os dados obtidos com o programa experimental foram primeiramente tratados estatisticamente com o intuito de identificar e eliminar valores atípicos. Os dados foram considerados espúrios quando o valor absoluto da variável de resposta subtraído da média

Tabela 7 – Análise de variância para análise da influência da relação água/aglomerante, espessura de cobrimento, presença de sílica ativa nos concretos (significância de 95%)

Relação água/aglomerante		SQ	gl	MQ	F	F crítico	Efeito
Concreto sem sílica ativa	Cobrimento = 2,5	155,9438	2	77,97192	69,19545	5,143253	Signif.
	Cobrimento = 4,0	60,1316	2	30,0658	20,56927	5,143253	Signif.
	Cobrimento = 6,0	22,9483	2	11,47417	72,30734	5,143253	Signif.
Concretos com sílica ativa	Cobrimento = 2,5	169,8875	2	84,94375	30,85882	5,143253	Signif.
	Cobrimento = 4,0	77,15959	2	38,5798	6,873874	5,143253	Signif.
	Cobrimento = 6,0	42,5409	2	21,27047	45,53911	5,143253	Signif.
Espessura de cobrimento		SQ	gl	MQ	F	F crítico	Efeito
Concretos sem sílica ativa	a/agl = 0,4	2,273218	2	1,136609	0,653028	5,143253	Não signif.
	a/agl = 0,5	67,08003	2	33,54001	180,9271	5,143253	Signif.
	a/agl = 0,6	45,02897	2	22,51449	27,413	5,143253	Signif.
Presença de sílica ativa		SQ	gl	MQ	F	F crítico	Efeito
Variando o cobrimento	a/agl = 0,4	21,61406	1	21,61406	24,13078	4,49400	Signif.
	a/agl = 0,5	25,48186	1	25,48186	4,63315	4,49400	Signif.
	a/agl = 0,6	3,24498	1	3,24498	0,31205	4,49400	Não signif.

Figura 4 – Corpos de prova com sílica ativa, após ensaio CAIM



de suas repetições era maior que o desvio padrão. Esses valores foram descartados e a média foi recalculada sem a utilização dos valores descartados. A Figura 3 apresenta valores médios de perda de massa (grau de corrosão), para as três variáveis de estudo. O gráfico permite uma melhor visualização do comportamento das variáveis de estudo.

Analisando a Figura 3 pode-se verificar a influência da relação água/aglomerante, da adição de sílica ativa e da espessura de cobertura na perda de massa das barras de aço submetidas ao processo corrosivo. O resultado evidencia que estes parâmetros exercem forte influência na capacidade de proteção do aço dentro do concreto, podendo ser usados como ferramenta de adequação da estrutura ao nível de durabilidade objetivado nos projetos.

Após a eliminação dos valores espúrios, a verificação da influência das variáveis no processo de corrosão foi feita por meio de uma análise de variância (ANOVA) nos dados de perda de massa das barras inseridas nos corpos de prova de concreto, com nível de significância da análise de 95%. Um resumo dos resultados encontra-se descrito na Tabela 7 e a interpretação é feita de forma que o fator em análise é considerado de influência com 95% de significância sempre que F for maior do que o $F_{\text{crítico}}$.

3.1.1 Influência da relação água/aglomerante

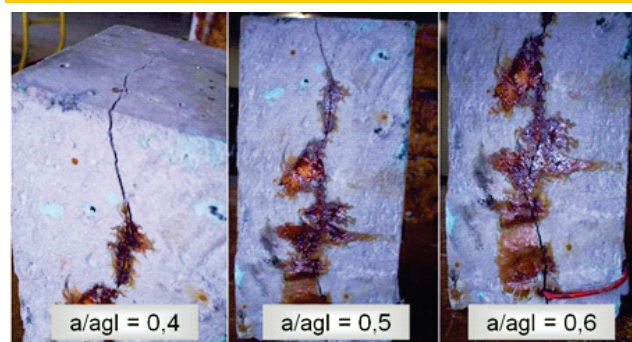
Os resultados de perda de massa em função da relação água/aglomerante confirmam o que já era esperado, ou seja, que a relação água/aglomerante exerce influência significativa na corrosão do aço. A Figura 3 mostra o incremento na perda de massa das barras de aço com o aumento da relação água/aglomerante para as séries sem sílica ativa, indicando que mudanças nesta variável implicam em alterações significativas na perda de massa das barras de aço carbono embutido nos corpos de prova submetidos ao ensaio CAIM. Este comportamento se deve ao fato de que quanto menor for a quantidade de água na mistura, maior será a proteção oferecida ao concreto quando exposto as intempéries, devido à redução no tamanho dos poros e consequente dificuldade de penetração de fluidos e de agentes agressivos. Esta relação é bem conhecida no meio técnico e científico e tem sido comprovada a partir de estudos como segue: Lafhaj et al. [22] mostram que quanto maior a relação a/c , maior a porosidade total do material

cimentício. O estudo de Hedenblad [23] indica que quanto maior a porosidade total do material cimentício, maior a sua permeabilidade. O grau de hidratação do cimento e sua porosidade aumentam com a elevação da relação água/cimento. Isso foi verificado no estudo de Chen, Wu [24] em argamassas de traço 1:2 em massa e ficou demonstrado que para a relação água/cimento 0,4 o grau de hidratação foi de 68% e para a relação água/cimento de 0,6 o grau de hidratação foi de 81%, ambos aos 180 dias de cura. Porém, o estudo também indicou que a argamassa com relação a/c elevada apresenta uma faixa de poros maiores, não presente na argamassa com baixa relação a/c . Esta informação coincide com os resultados clássicos apresentados nos estudos de Powers [25]. Nota-se que as perdas de massa das barras de aço são mais pronunciadas quando da passagem da relação água/aglomerante 0,4 para 0,5, do que 0,5 para 0,6. Isto demonstra uma tendência de que para produzir concretos mais duráveis sejam utilizadas relações a/agl abaixo de 0,5. A NBR 6118 [26] permite que seja utilizada uma relação a/agl igual a 0,5 para a classe de agressividade III (atmosfera industrial ou marinha), recomendação esta que poderia ser considerada pouco rigorosa, caso estes resultados tivessem sido obtidos em campo e não em ensaios acelerados. Desse modo, este resultado serve de alerta, mas é necessário realizar experimentos não acelerados para fundamentar melhor estas constatações preliminares. Este ponto de vista se baseia no fato de que a aceleração da degradação adotada não reproduz totalmente as condições reais de exposição de uma estrutura em ambiente próximo ao mar.

A análise visual dos corpos de prova após o ensaio CAIM permite verificar os efeitos estéticos que o processo de corrosão provoca sobre o concreto. A Figura 4 apresenta o estado de degradação observado nos corpos de prova com as três relações água/aglomerante estudadas para uma espessura de cobertura de 4,0 cm com a presença de sílica ativa.

O processo de corrosão instalado gera a formação de produtos de corrosão, que devido a umidade abundante durante o ensaio gera manchas na superfície dos corpos de prova. Pode-se associar a intensidade de ocorrência destas manchas na superfície com a qualidade do concreto utilizado. Verifica-se através da Figura 4 que quanto menor a relação água/aglomerante menor os efeitos aparentes da corrosão sobre a superfície do concreto, confirmando-se assim as conclusões obtidas anteriormente.

Figura 5 – Fissuração em corpos de prova (cobrimento=6,0 cm) sem sílica ativa devido ao cobrimento excessivo



3.1.2 Influência da espessura de cobrimento

O cobrimento da armadura no concreto é um fator muito importante de controle da movimentação dos íons cloreto e da penetração de substâncias nocivas ao concreto. Ele desempenha o papel de proteção física, pois dificulta a entrada de agentes agressivos, oxigênio e umidade, além de garantir o meio alcalino para que a armadura tenha a proteção química. A Figura 3 mostra a influência das diferentes espessuras de cobrimentos como barreira protetora ao aço para concretos sem sílica ativa.

Pela teoria, para concretos com qualidade similares, quanto maior a espessura de cobrimento, maior tende a ser o intervalo de tempo até que a concentração de cloretos junto ao aço atinja o valor limite, uma vez que este cobrimento tende a funcionar com uma barreira a penetração dos íons. Como os corpos de prova foram submetidos à exposição durante o mesmo período de tempo, a afirmação pode ser confirmada quando se analisa a Figura 3, na qual se constata que conforme o cobrimento do concreto diminui tem-se um acréscimo na perda de massa das barras de aço nos concretos de relação água/aglomerante 0,5 e 0,6. Nas misturas de relação água/aglomerante 0,40, parece não haver alterações na perda de massa das armaduras para diferentes espessuras de cobrimento ou pelo menos este efeito é bem menor. Supõe-se que para esta relação água/aglomerante, a microestrutura do concreto encontra-se tão densa que predomina sobre a velocidade de penetração dos íons, como indicam os estudos de Medeiros, Helene [27] e Chen, Wu [24].

A NBR 6118 [26] recomenda como valores limites para a classe de agressividade IV espessura de cobrimento de 5,0 cm e relação água/aglomerante de 0,45. Conforme os resultados obtidos nesta pesquisa, não há necessidade de se usar cobrimentos maiores do que 4,0 cm, para concretos expostos a condição imposta no ensaio usado neste trabalho, quando a relação água/aglomerante for de 0,40. Esta afirmação foi confirmada pela análise de variância com 95% de significância, conforme Tabela 7, indicando que a variação na espessura cobrimento (entre 2,5 e 6 cm) não é significativa no caso de relação água/aglomerante de 0,4 e é significativa nos casos das relações água/aglomerante de 0,5 e 0,6.

É importante salientar que esta interpretação é baseada estritamente nos materiais utilizados e nas condições de exposição impostas neste ensaio. A exposição real de uma estrutura de concreto armado tem inúmeros fatores de influência não simulados no ensaio empregado e, por isso, a NBR 6118 deve continuar sendo seguida.

Por meio da análise visual, um efeito verificado em todos os corpos de prova com espessura de cobrimento igual a 6,0 cm é o aparecimento de fissuras devido ao caráter expansivo dos produtos originados pela corrosão (Figura 5). Atribui-se este fenômeno ao excessivo cobrimento utilizado, uma vez que as amostras de cobrimento inferior não apresentaram tal ocorrência.

Pode-se concluir, com base nas informações e análises anteriores que, quanto maior o cobrimento menor será a perda de massa das armaduras, porém quando se reduz a relação a/agl a valores próximos de 0,40, os poros do concreto tendem a encontrar-se tão densos que por si só já apresentam proteção frente ao processo corrosivo não necessitando assim de cobrimentos excessivos, sendo neste caso até mesmo nocivo a sua utilização. Um estudo aprofundado sobre a porosidade dos concretos poderá fundamentar melhor esta análise.

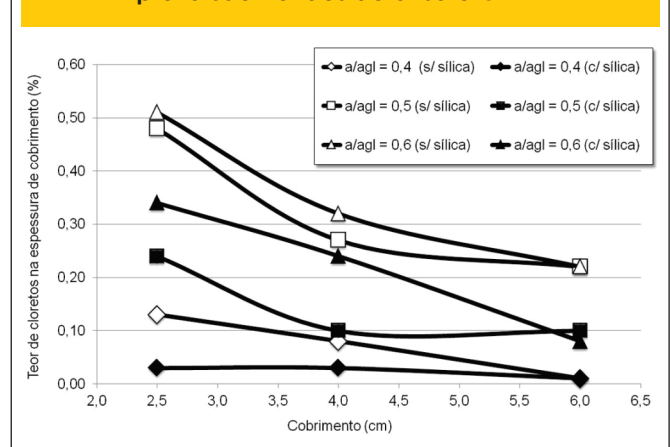
3.1.3 Influência da presença de sílica ativa

O emprego de sílica ativa no concreto provocou um decréscimo na perda de massa das barras inseridas no interior do concreto. Atribui-se este decréscimo a possibilidade desta pozolana preencher os vazios presentes do interior do material (pelo efeito filler associado às reações pozolânicas), tornando o material mais resistente ao ingresso de Cl^- . Apesar disso, observa-se que quanto maior a relação água/aglomerante menos significativo fica este efeito, até o ponto onde a presença desta adição passa a não influenciar a perda de massa das barras inseridas no concreto (relação a/agl = 0,6). A interpretação dos dados faz crer que o uso de sílica ativa na dosagem do concreto é mais vantajoso quando se trabalha com concretos de baixa relação água/aglomerante.

O concreto com sílica ativa teve uma resistência à compressão muito semelhante ao concreto sem sílica ativa, porém, no caso de baixa relação a/agl (neste caso a/agl=0,4) verifica-se uma capacidade de proteger a armadura da corrosão por cloretos muito superior do que a série de corpos de prova sem esta adição, conforme observado na Figura 3.

Este é um indicativo que para baixas relações água/aglomerante, a sílica ativa muda a microestrutura do concreto de forma a dificultar a penetração de cloretos. Isto deixa evidente que utilizar a resistência à compressão como único fator determinante de durabilidade do concreto armado pode induzir a conclusões errôneas, sendo então necessários outros parâmetros de análise para uma conclusão mais completa. O estudo de Ramezani-pour e Malhotra [28] também apresenta resultados que corroboram esta questão, pois eles compararam concretos de referência, confeccionados com a mesma relação água/aglomerante e com um cimento equivalente no Brasil ao CP I – 32, com um concreto com 10 % de sílica ativa em substituição ao cimento. O resultado encontrado indica uma manutenção da resistência à compressão, porém, houve uma clara redução da porosidade e um refinamento dos poros provocado pelo uso da sílica ativa. Além disso, este percentual de substituição resultou em uma elevação considerável da resistência à penetração de íons cloretos, embasado pela redução da porosidade. Este fato foi atribuído pelos autores ao

Figura 6 – Teor de cloretos até a altura do cobrimento, extraídos dos corpos de prova submetidos ao ensaio CAIM



efeito das reações pozolânicas provocadas pela sílica ativa. Vale salientar que Atis et al. [29] mostram em seu experimento que o concreto com sílica ativa apresenta maior tendência a sua resistência ser afetada pela cura seca, ou ausência de cura, que ocorre em muitas obras. Melolepszy e Deja [30] também evidenciaram resultados semelhantes estudando percentuais de substituição de 5% e 10% de sílica ativa, com redução de até 40% nos resultados de resistência à compressão. Desse modo, deve-se ter um alerta para esta questão: aparentemente a sílica ativa produz um concreto que bloqueia melhor os agentes agressivos, porém, a cura úmida passa a ter um papel mais importante do que no caso do concreto convencional.

3.1.4 Concentração de cloretos na espessura de cobrimento

O ensaio acelerado distorce condições ambientais não podendo servir como um parâmetro fixo para comparação com os dados obtidos em ensaios realizados naturalmente, porém, servem de base para o entendimento das variáveis que influenciam no processo e assim é possível tomar medidas de mitigação das manifestações patológicas provenientes da corrosão de armaduras. Existe, no entanto, um grande movimento por parte dos pesquisadores em tentar relacionar os dados obtidos com ensaios acelerados e a degradação observada em estruturas expostas ao ambiente.

No ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM), a corrente elétrica aplicada sobre os corpos de prova induz a migração dos cloretos presentes na solução em direção à barra de aço presente no interior do corpo de prova. Como consequência disto, os cloretos se alojam nos poros do concreto. Neste trabalho, avaliou-se o teor de cloretos presente na espessura de cobrimento dos concretos submetidos ao ensaio CAIM. A contagem de cloretos foi realizada no pó extraído do concreto de cobrimento dos corpos de prova utilizando o método de Volhard conforme descrito por Andrade [31]. A ASTM C1152-04 [16] referencia a titulometria com nitrato de prata para a determinação de íons cloretos total em amostras de cimento e concreto utilizando-se procedimentos similares ao adotado por Andrade [31]. Foi aplicado sobre os dados do teor de cloretos o mesmo tratamento preliminar utilizado para refinar os dados da perda de massa por corrosão. Os dados obtidos após o tratamento preliminar estão expostos na Figura 6.

A Figura 6 mostra o comportamento do teor de cloretos para as variáveis de estudo deste trabalho. Observa-se que todas as curvas mostram a mesma tendência observada para a perda de massa das barras de aço, o que ratifica as conclusões a respeito da influência das variáveis frente à deposição de cloretos no concreto. Nota-se que praticamente todos os corpos de prova estão com seus teores de cloretos acima daquele proposto por Helene [12] de 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto e que segundo o autor é a faixa de valores médios mais aceitos entre pesquisadores como um limite crítico de corrosão. O Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB, 1992) recomenda que o teor de cloretos em concreto armado não deva ultrapassar 0,05% em relação à massa de concreto.

Analisando a Figura 6 pode-se confirmar a hipótese de que a perda de massa das barras deterioradas através do processo de corrosão por cloretos é diretamente relacionada com o teor de cloretos no cobrimento do concreto. Os resultados demonstram um potencial para estudo no que se refere a interpretação dos dados obtidos com o ensaio CAIM sob a ótica do teor de cloretos, uma vez

que o comportamento das curvas é similar. Por esta abordagem, podem-se associar mais facilmente os resultados obtidos em laboratório com ensaios realizados no ambiente, uma vez que para obtenção dos dados de análise de cloretos é necessária somente a leitura do teor de íons no momento da medição, sem necessidade de dados históricos, diferente do ensaio por perda de massa, no qual as massas iniciais das barras deverão ter sido registradas. Além disso, o uso do teor de cloretos como variável de resposta do ensaio permite que cada corpo de prova seja monitorado ao longo do ensaio, uma vez que é possível executar a extração em uma parte do corpo de prova, preencher os furos de coleta de amostra pontualmente com epóxi e prosseguir com a exposição. No caso da perda de massa, só é possível uma leitura, pois a barra precisa ser extraída dos corpos de prova para o resultado final.

Todo ensaio acelerado distorce as condições de agressividade, o que torna difícil correlacionar as condições de ensaio com as condições naturais, e praticamente impossibilita a estimativa de vida útil a partir de análise de tempos de ensaios. Apesar disto, ensaios como o CAIM podem ser úteis para análises comparativas, que buscam identificar como variações nos materiais afetam o processo corrosivo e como evoluem os efeitos da degradação.

As informações expostas neste artigo deixam claro que as normas atuais (nacionais e internacionais) ainda usam os métodos baseados em experiências anteriores com a prescrição de cobrimentos, consumo de cimento e resistência mecânica mínimos para cada tipo de condição de exposição. Introduzir os métodos deterministas nas normas constitui-se um grande desafio para a engenharia civil tornando a análise de vida útil mais precisa, versátil e confiável. Este é um desafio pela maior dificuldade de controle e especificação, mas isso tornaria a tecnologia de estruturas de concreto armado mais coerente, uma vez que abriria a possibilidade de se utilizar, por exemplo, um concreto de 50 MPa e adotar um cobrimento menor do que se a mesma estrutura fosse executada com um concreto de 25 MPa.

Atualmente, as normas fixam um mínimo de resistência e de cobrimento ignorando que a qualidade do cobrimento de um concreto pode ser muito diferente do outro. Para chegar ao ponto de aplicar o raciocínio embutido nos métodos deterministas, trabalhos na linha de quantificar a influência de parâmetros como espessura e qualidade do cobrimento, uso de adições, compacidade e outros fatores de influência na proteção do aço são necessários.

4. Conclusões

O programa experimental deste trabalho permitiu obter as seguintes conclusões:

- A metodologia CAIM mostrou-se satisfatória e apresenta-se como uma técnica com grande potencial de uso para dados comparativos de durabilidade de materiais, pois é um meio rápido de produzir comparações e balizar tomadas de decisões de obras importantes;
- As três variáveis estudadas (espessura de cobrimento, uso de sílica ativa e relação água/aglomerante) apresentaram influência no processo de corrosão. Isto foi constatado pela perda de massa das barras após o CAIM e pelo teor de cloretos na espessura de cobrimento;
- A relação água/aglomerante mostrou-se como o fator mais importante no controle de movimentação de íons cloretos. Atribui-se

este efeito a porosidade do concreto, pois quanto menor a relação água/aglomerante menor a perda de massa das barras e menor o teor de cloretos no interior do concreto.

- Quanto maior a espessura de revestimento menor a perda de massa das armaduras. No entanto, os dados mostram que este incremento é pequeno para a relação água/aglomerante de 0,4 e muito significativo para os valores de relação água/aglomerante de 0,5 e 0,6. De um modo geral, a utilização de baixos valores de espessura de revestimento (2,5 cm) mostrou-se ineficiente, se considerarmos o alto grau de perda de massa das armaduras atingido, confirmando assim as recomendações das diversas normas;
- A adição de sílica ativa no concreto proporcionou um decréscimo na perda de massa das barras, sendo o nível de perda proporcional à relação água/aglomerante. O uso da sílica tende a ser mais vantajoso para concretos de relações água/aglomerante baixas e pouco efetivo para valores elevados de relação água/aglomerante;
- Existe uma correlação entre o teor de cloretos e a perda de massa nas barras de aço, demonstrando-se assim que a concentração de íons cloreto é um fator determinante para o processo. Estudos devem ser elaborados, principalmente na tentativa de relacionar ensaios acelerados com os ensaios de campo em trabalhos de inspeção em estruturas reais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE e Universidade Federal do Paraná – UFPR pela parceria neste trabalho. Agradecimentos ainda ao apoio do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens do Parque Tecnológico Itaipu (CEASB/PTI) através de bolsa de iniciação científica e ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da Usina Hidrelétrica Itaipu por meio da realização de alguns ensaios.

6. Referências bibliográficas

- [01] Z, LOUNIS. Reliability-based life prediction of aging concrete bridge decks. National Research Council Canada. NRCC 44246. Proceedings of the International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, Cannes, France, 2000.
- [02] O. T, RINCÓN; Duracon Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. Building and environment. Volume 41. pp. 952–962. 2006.
- [03] R, BABOIAN. Corrosion – a problem of international importance. In: ASTM STP 1000. Corrosion testing and evaluation: Silver anniversary volume. Philadelphia. 1990. P, 7-13.
- [04] W, D. CALLISTER. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [05] E. C. B, MONTEIRO. Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- [06] J. M. R, DOTTO. Corrosão do aço induzida por íons cloretos – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com e sem pozolana. 2006. Tese (Doutorado em engenharia civil) – Programa de pós graduação em engenharia civil: PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2006.
- [07] J. C, ANDRADE; R. L, FORTES. Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação. Engenharia, Fortaleza, v. 13, p. 85-96, 1995.
- [08] M. ISMAIL; M. OHTSU. Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. Construction and Building Materials. V. 20. pp. 458–469. 2006.
- [09] L. ABOSRRA; A. F. ASHOUR; M. YOUSEFFI. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. Construction and Building Materials. v. 25. pp. 3915–3925. 2011.
- [10] J. XU; L. JIANG; W. WANG; Y. XU; Y. JIANG. Chloride threshold value for reinforcement corrosion in concrete with additions of silica fume or fly ash. Magazine of Concrete Research. v. 63, pp. 905–913. 2011
- [11] H. YALCINER, O. EREN, S. SENSOY. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level. Cement and Concrete Research. v. 42. pp. 643–655. 2012.
- [12] P. R. L, HELENE. Vida útil de estruturas de concreto armado sob o ponto de vista da corrosão da armadura. In: Seminário de dosagem e controle dos concretos estruturais. Anais ENCOL/SENAI. Brasília, 1993.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C 876. In: Annual book of ASTM Standards. Philadelphia, 1999.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. ASTM C 1556. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2004.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C 1202. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2005.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for acid-soluble chloride in mortar and concrete. ASTM C1152. Philadelphia, 2003.
- [17] R. C. A, LIMA. Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- [18] A, GRAEFF, A. Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2007.

- [19] A. S. TORRES. Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerado por imersão modificada – frente ao processo de corrosão. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: PPGE/UFGRS, Porto Alegre, 2006.
- [20] VARELA, H; ESPINOZA, L. V. Penetrabilidad de iones cloruors em morteros com y sin revestimento. VII Jornadas Chilenas Del Hormigón e I Jornada Latinoamericana Del cemento y Hormigón. Santiago de Chile. 1988.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of ASTM Standards. Standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment and systems. (Revision). ASTM A380. Philadelphia, 1996.
- [22] Z. LAFHAJ; M. GOUEYGOU; A. DJERBI; M. KACZMAREK. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/ cement ratio and water content. Cement and Concrete Research. v. 36. pp. 625-633. 2006.
- [23] G. HEDENBLAD. The use of mercury intrusion porosimetry or helium porosity to predict the moisture transport properties of hardened cement paste. Advances in Cement Based Materials. v. 6. pp. 123-129. 1997.
- [24] X. CHEN; S. WU. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. Construction and Building Materials. v. 38. pp. 804-812. 2013.
- [25] T. C. POWERS. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. Journal of American Ceramic Society. v. 41. n. 1 pp. 1–6. 1958.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2007.
- [27] M. H. F. MEDEIROS; P. HELENE. Migração de Íons Cloretos no Concreto - Influência da Consistência, Relação Água Cimento e Consumo de Cimento. Revista do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo - Brasil, v. Fev/Ma, p. 53-66, 2003.
- [28] A. A. RAMEZANIANPOUR; V. M. MALHOTRA. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. Cement and concrete composites. v. 17. pp. 125 – 133. 1995.
- [29] C. D. ATIS; F. OZCAN; A. KILIC; O. KARAHAN; C. BILIN; M. H. SEVERCAN. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. Building and environment. v. 40. pp. 1678 – 1683. 2005.
- [30] D. J. MELOLEEPSZYJ. The effect of variable curing conditions on the properties of mortars with silica fume. ACI SP-132. v. 2. pp. 1075–87. 1992.
- [31] M. C. ANDRADE. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de amaduras. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: PINI, 1992, p. 104.