

Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture

Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino



P. HELENE^a
paulo.helene@concretophd.com.br

G. GUIGNONE^b
gagarquiteto@gmail.com

G. VIEIRA^b
geilma.vieira@gmail.com

L. RONCETTI^c
leonardo@techcon.eng.br

F. MORONI^c
nanda.moroni.fm@gmail.com

Abstract

The main cause of concrete structures deterioration is related to the resistance against the penetration of aggressive agents. Aiming at increase the impermeability and reduce the diffusivity of concrete elements, making it less susceptible to the ingress of chloride ions, the use of crystalline catalyst emerges as a good alternative. Its mechanism of autogenous healing enhances the natural pore-filling process of concrete. The aim of this study is to investigate the influence of the use of crystalline catalyst on the chloride ions penetration and service life prediction of concrete. For the concrete mixtures production, it was used blast-furnace slag blended cement, three different water/cement (w/c) ratios (0.45; 0.55; 0.65), with and without crystalline catalyst, totaling six different mixtures. The concrete specimens were cured in a moist chamber and tested at 28 and 91 days. It was performed tests of compressive strength, rapid chloride permeability (ASTM C1202:12), and silver nitrate colorimetric indicator. The results show that, compared to the reference mixture, the use of crystalline catalyst conserved the compressive strength and reduced the chloride ions penetration up to 30%, increasing service life up to 34%.

Keywords: durability, reinforced concrete, chloride ions, crystalline admixture.

Resumo

A razão predominante da deterioração das estruturas de concreto armado está relacionada com a capacidade de resistência contra a penetração de agentes agressivos. A fim de favorecer a elevação da estanqueidade de elementos de concreto e a redução da difusividade dos concretos, tornando-os menos suscetíveis ao ingresso de íons cloreto, a utilização de aditivo cristalino desponta como opção muito interessante. Seu mecanismo de autocicatrização autóloga potencializa o processo de colmatação natural do concreto. Este trabalho objetivou investigar a influência da utilização desses aditivos autocicatrizantes cristalinos no que tange ao avanço de íons cloreto e à estimativa de vida útil em concretos. Para a produção dos concretos foi utilizado cimento Portland com escória de alto forno, considerando três relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65), sem e com o aditivo cristalino, totalizando seis proporções de materiais. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida e ensaiados nas idades de 28 e 91 dias. Foram realizados ensaios de compressão axial, penetração acelerada de íons cloreto, ASTM C1202:12, e ensaios de indicadores colorimétricos com aspersão de nitrato de prata. Após análise efetuada, os resultados demonstraram que, comparativamente ao concreto de referência, o uso do aditivo cristalino resultou na conservação da resistência à compressão em concretos, na redução da penetração de cloretos em até 30%, e, na elevação da vida útil de projeto, VUP, em até 34%.


Palavras-chave: durabilidade, concreto armado, íons cloreto, aditivo cristalino.

^a PhD Engenharia, São Paulo, SP, Brazil;

^b Civil Engineering Department, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brazil;

^c Instituto de Educação Tecnológica De Luca Daher, Curitiba, PR, Brazil.

Received: 19 Jun 2016 • Accepted: 15 Jan 2018 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

Dentre os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto os íons cloreto respondem por uma parcela significativa dos problemas encontrados. Isso se deve, em parte, à possibilidade de transporte desses íons para o interior da estrutura, atingindo a armadura e causando corrosão [1-3]. Na tentativa de minimizar a entrada desses agentes agressivos no concreto, uma medida preventiva que pode ser aplicada é a utilização de aditivos cristalinos, que têm o papel de induzir a colmatação de fissuras e de diminuir a quantidade de poros no concreto minimizando a entrada dos íons cloreto.

Conhece-se que, em condições iguais de consumo e propriedades dos agregados, quanto maior a porosidade do concreto e interconexão entre poros, maior a intensidade de penetração de agentes agressivos [4]. Somado a isso, conforme Sousa [5], quanto maior a relação água/cimento maior a porosidade do concreto. De acordo com Neville [6], o que determina a penetração e deslocamento dos agentes agressivos no concreto é a estrutura da sua pasta de cimento hidratada, as suas características químicas e físicas, a concentração superficial das substâncias agressivas e as condições ambientais.

Em face da procura em executar concretos mais resistentes à penetração de agentes agressivos, em especial os íons cloreto, é importante ressaltar a presença dos aditivos cristalinos. Seu estudo em elementos que constituem as estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos pode assumir relevante papel na prevenção do surgimento de manifestações patológicas. Nesse sentido, torna-se necessário estudar o comportamento desses aditivos cristalinos em concretos expostos à contaminação por íons cloreto.

Define-se a cicatrização autógena como uma capacidade auto-curativa, onde sua cicatrização é proporcionada pelos componentes hidratados do concreto, que podem ou não serem ativados. Do ponto de vista da microestrutura, a cicatrização autônoma é caracterizada pela utilização de microcápsulas preenchidas com agentes cicatrizantes ou na vascularização de tubos ociosos que bombeiam os agentes cicatrizantes [7].

É relevante destacar que o mecanismo de autocicatrização autógena tende a ocorrer por colmatação natural do concreto em decorrência de reações químicas (hidratação contínua, formação de CaCO_3) e ações mecânicas (partículas soltas nas fissuras ou suspensas na água) ou ainda em virtude de fenômeno de autocicatrização induzida por catalisadores ativos. A formulação de concretos autocicatrizantes pela abordagem autógena é favorecida pela utilização de componentes especiais como o aditivo cristalino [8]. Neste contexto, define-se o aditivo cristalino, com agente cristali-

zante, objeto de análise nesta pesquisa, como um material cimentício sintético classificado como um impermeabilizante hidrófilo ou também como um aditivo redutor da permeabilidade hidrostática. Seus componentes reativos combinam com o Ca(OH)_2 do concreto formando produtos cristalinos que desconectam poros além de preencher fissuras. Torna-se relevante destacar que os produtos cristalinos só podem atuar positivamente quando estiver presente umidade suficiente, pois a disponibilidade de água é necessária para ocorrer as reações de colmatação autógena [9].

As substâncias químicas ativas do aditivo cristalino utilizam da água, por meio do processo de difusão, para migrarem e ingressarem nos capilares e fissuras do concreto. O processo baseia-se na precipitação de uma reação química, promovida pelo aditivo, entre a umidade e os subprodutos de hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais não solúveis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), carbonato de cálcio (CaCO_3), cristais de apatita (CaF_2) e cristais de enstatita (MgSiO_3). Esta estrutura cristalina preenche os poros tornando o concreto menos permeável ou tornando a estrutura estanque devido à colmatação da fissura [10]. Pesquisas têm avaliado o efeito do aditivo cristalino em concretos [11-18], entretanto torna-se relevante conhecer a sua potencialidade frente à mitigação do avanço de cloretos e com relação à elevação de vida útil de projeto de estruturas de concreto, representada conforme Helene [1], pelo período de iniciação da corrosão ou ainda período em que o avanço de cloretos atinge a armadura em concentrações capazes de desfazer o filme passivador. Neste trabalho será verificada a influência da utilização de aditivo autocicatrizante cristalino em concretos frente ao avanço de íons cloreto e sua interferência na vida útil de projeto.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

O cimento utilizado na confecção dos corpos de prova foi o Cimento Portland com Escória Granulada de Alto Forno, resistente a sulfatos – CP III 40 RS. Em função de suas características, o cimento Portland com escórias (CP III) tem sido o cimento com maior utilização no estado do Espírito Santo - localidade onde foi realizada a pesquisa. A principal característica que norteia sua escolha é a maior resistência a ataques químicos, pois há no Estado um número grande de obras em proximidade com o mar, fato que favorece a exposição com a névoa salina, grande responsável pelo ingresso de íons cloreto em estruturas de concreto. Torna-se relevante mencionar também o mecanismo de autocicatrização autógena favorecido pela adoção de escórias de alto forno, sendo que, neste contexto, pretende-se também avaliar a eficiência do aditivo em concretos com altos teores destes materiais cimentícios suplementares.

Tabela 1

Composição química típica dos componentes em porcentagens

Componentes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	MgO	SO_3	PF
Aditivo cristalino	20,3	1,7	4,3	30,9	0,15	5	19,4	1	-
CP III 40RS	28,22	8,36	1,78	50,01	0,40	0,26	6,05	1,77	2,45

Tabela 2

Consumo de materiais por metro cúbico de concreto

Mistura	Fator água/cimento	Materiais (kg/m ³ de concreto)						
		Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Água	Aditivo plastific.	Aditivo cristalino
CPIII-40 RS	0,45	398	748	390	728	179	1,19	7,96
	0,55	325	813	390	728	179	0,98	6,5
	0,65	275	857	390	728	179	0,83	5,5

Tabela 3

Abatimento e resistência à compressão axial dos corpos de prova

Misturas	Resistência aos 28 dias (MPa)	Abatimento(mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)
CPIII-0,45 sem aditivo cristalino	45,2	240	398
CPIII-0,45 com aditivo cristalino	45,8	200	398
CPIII-0,55 sem aditivo cristalino	42,7	220	325
CPIII-0,55 com aditivo cristalino	37,6	200	325
CPIII-0,65 sem aditivo cristalino	29,9	60	275
CPIII-0,65 com aditivo cristalino	29,9	50	275

O agregado miúdo utilizado foi a areia quartzosa, previamente lavada e seca em estufa entre 105°C e 110°C, e como agregado graúdo utilizou-se pedra britada originária de rocha diabásica do município de Serra-ES. Com o objetivo de favorecer a adequada trabalhabilidade entre as diversas misturas investigadas, adotou-se aditivo químico plastificante de pega normal, cuja dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,2% a 2% sobre o peso do cimento.

A Tabela 1 apresenta as características químicas do aditivo cristalino e do cimento adotados.

2.2 Moldagem dos corpos de prova

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo vertical e

confeccionados contemplando três relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65), sem e com aditivo cristalino. As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, o consumo de materiais e os resultados dos ensaios para caracterização e controle das amostras de concreto. A Tabela 3 apresenta os resultados de consistência do concreto fresco com manutenção da água/m³ constante, e pode-se verificar que para cada par, sem e com aditivo cristalino, as consistências foram equivalentes.

2.3 Ensaios experimentais

Executou-se o método de penetração acelerada de cloretos utilizado por Whiting [19] e recomendado pela norma ASTM C1202/12, que consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico, de 9,5cm

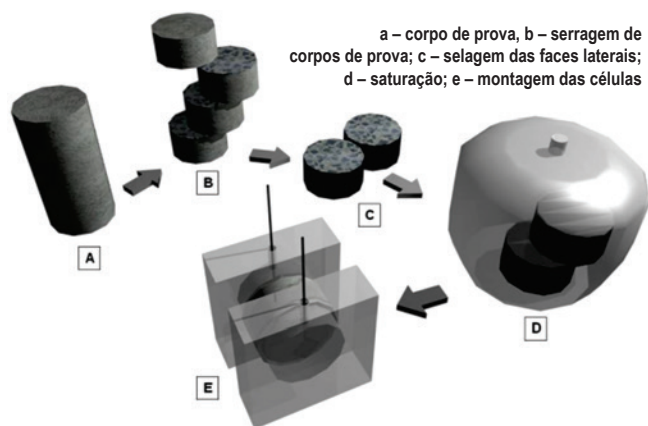


Figura 1
Procedimento adotado no ensaio

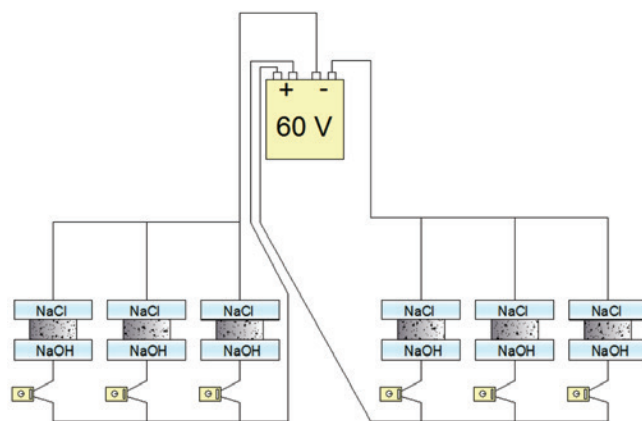


Figura 2
TRepresentação gráfica do ensaio



Figura 3
Amostras rompidas

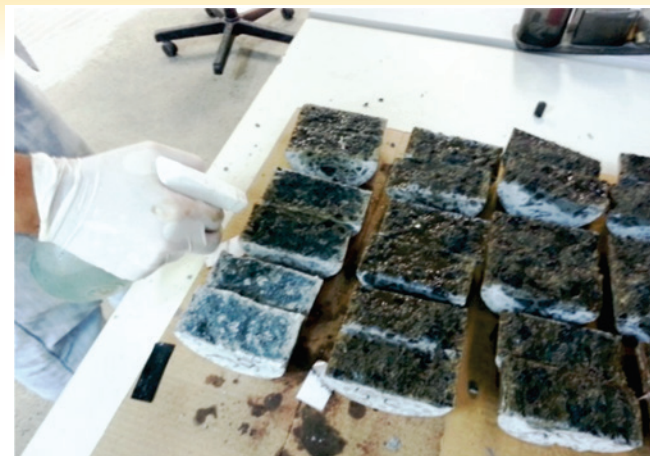


Figura 4
Aspersão de nitrato de prata

de diâmetro e 5,1cm de espessura entre meia células de acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N, e a outra em uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração. Entre as meia células é gerada uma diferença de potencial com valor de $(60 \pm 0,1)$ V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. O ensaio tem duração de seis horas e a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos por meio de amperímetros. O produto da corrente pelo tempo, expresso em Coulomb, indica a carga total que atravessa o corpo de prova e revela a maior ou a menor resistência do concreto à penetração de íons cloreto. Os procedimentos de ensaio foram os seguintes: inicialmente os corpos de prova foram retirados do ambiente de cura no qual de encontravam e serrados em quatro partes ortogonais ao eixo longitudinal, sendo descartadas as extremidades e utilizadas as faces centrais, procedimento utilizado e validado por Helene e Medeiros [20]; no dia posterior as amostras tiveram suas superfícies laterais impermeabilizadas com resina epóxi; um dia antes do ensaio as amostras foram submetidas ao vácuo por quatro horas,

sendo que depois de decorridas três horas de vácuo, as mesmas foram submersas em água deionizada e deaerada permanecendo nesta condição por 18h e no dia do ensaio as amostras foram retiradas do dessecador e acopladas às meia células. O esquema do ensaio e sua execução estão apresentados nas Figuras 1 e 2. Cumpridos os ensaios de penetração acelerada de íons cloreto (ASTM C1202) foi efetuada aspersão de nitrato de prata a fim de verificar a espessura da camada contaminada por cloretos nas amostras. Este procedimento foi proposto por Nilsson e Luping [21]. Para efeito, tornou-se necessário o rompimento central das amostras, utilizando o aparato para o ensaio de resistência à compressão, Figura 3, e posteriormente aspersão de nitrato de prata, Figura 4.

3. Resultados e discussões

Após a realização dos ensaios pertinentes às amostras em período de cura de 28 e 91 dias, puderam ser identificados os resultados a fim de cumprir o recomendado pela ASTM C1202, relacionando os valores encontrados à fórmula proposta pela norma e

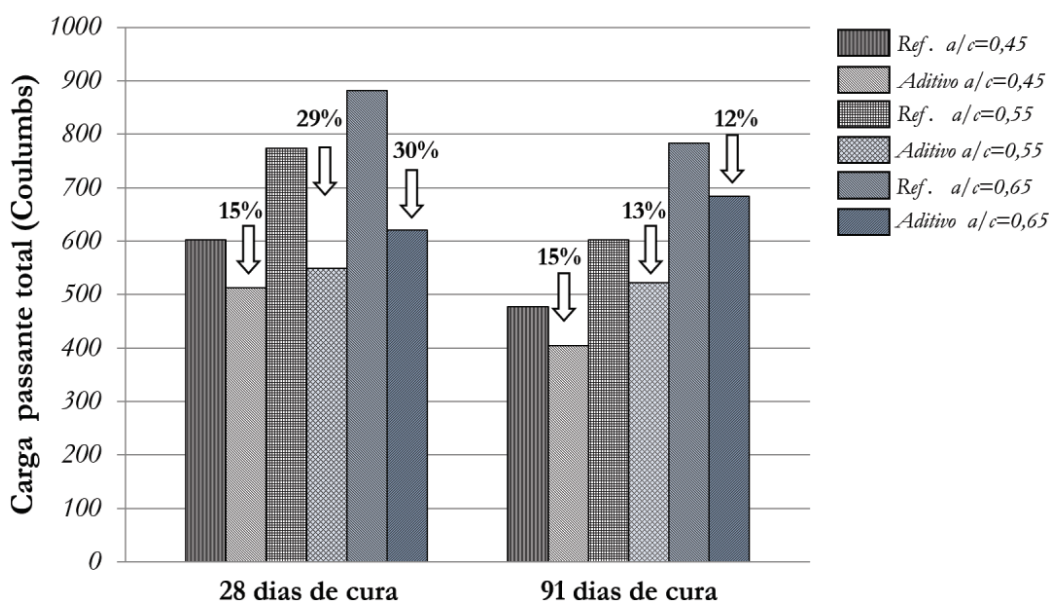


Figura 5
Carga passante total nas amostras de concreto

Tabela 4
Classificação ASTM C 1202

Carga passante (Coulombs)	Penetração dos íons cloreto
> 4000	Elevada
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

identificando os valores de cargas passantes totais em Coulomb, conforme Figura 5.

Identificam-se assim maiores cargas totais em maiores relações água/cimento e redução de cargas passantes totais com a utilização de aditivo cristalino. Nota-se que em maiores relações água/cimento e com a utilização do aditivo pouco se alteraram os resultados de 28 dias para 91 dias. Verifica-se a maior incidência de penetração de corrente passante total nas amostras com maiores relações a/c e observa-se ainda que estes valores se encontram em patamares de penetração muito baixos, conforme quadro de classificação de penetração de corrente passante total, apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 5
Classificação dos concretos

Relação água/cimento	Aditivo	Idade (dias)	Carga passante Q (Coulombs)	Resistência (MPa)
0,45	C/Aditivo	28	513	45,8
	S/Aditivo	28	603	45,2
0,45	C/Aditivo	91	405	54,7
	S/Aditivo	91	477	54,1
0,55	C/Aditivo	28	549	37,6
	S/Aditivo	28	774	42,7
0,55	C/Aditivo	91	522	52,2
	S/Aditivo	91	603	50,9
0,65	C/Aditivo	28	621	29,9
	S/Aditivo	28	882	29,9
0,65	C/Aditivo	91	684	39,5
	S/Aditivo	91	783	40,7

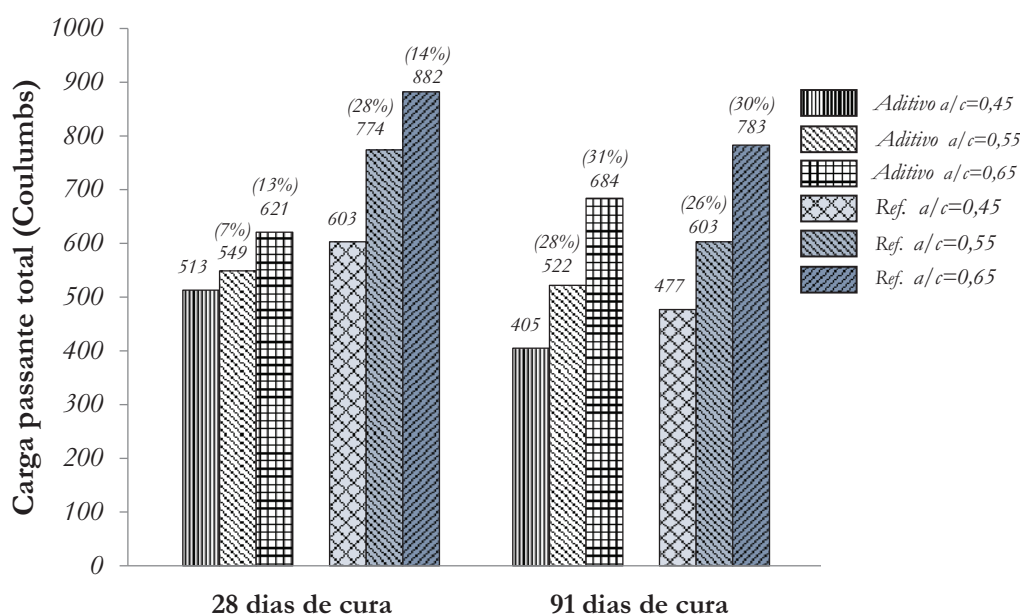


Figura 6
Influência da utilização do aditivo na carga passante total

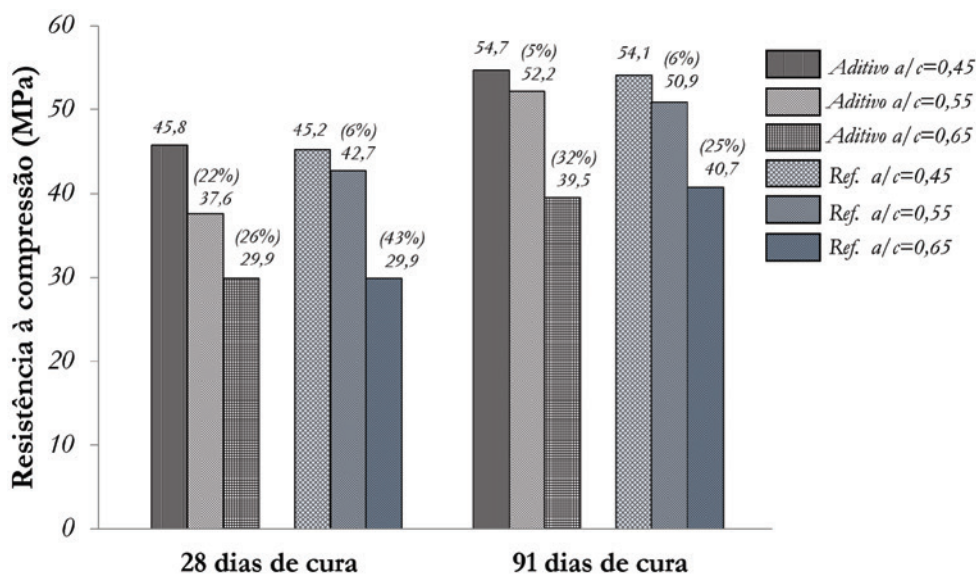


Figura 7
Influência do uso do aditivo na resistência à compressão

Justificam-se as cargas totais em patamares muito baixos, principalmente, pela escolha do cimento e pela opção de cura em câmara úmida nos períodos de 28 e 91 dias. O tipo de cimento adotado, cimento Portland com escórias granuladas de alto forno, resistente a sulfatos (CPIII-RS), proporciona concretos mais compactos (densos) e duráveis. A opção pela cura em câmara úmida corresponde a um processo que agrega maiores resistências e durabilidade comparativamente à cura ao ar [22]. Observa-se, por meio da Figura 6, a influência da relação água/cimento com e sem uso do aditivo cristalino. Nota-se para 28 e 91 dias aumento de cargas passantes com a

elevação da relação a/c em concretos sem e com aditivo. Em 91 dias, com a variação da relação água/cimento, nota-se um aumento constante em torno de 30%. Vale mencionar que, apesar de ter ocorrido de maneira semelhante aumento de carga passando com a elevação das relações a/c, tanto em 28 dias quanto em 91 dias, observaram-se variações menores em 28 dias com a utilização do aditivo, considerando o comparativo entre as distintas relações água/cimento. O mencionado fato pode ter ocorrido, provavelmente, em função dos produtos do mecanismo de cristalização dos poros do concreto, que reagem com a microestrutura do concreto em suas primeiras idades.

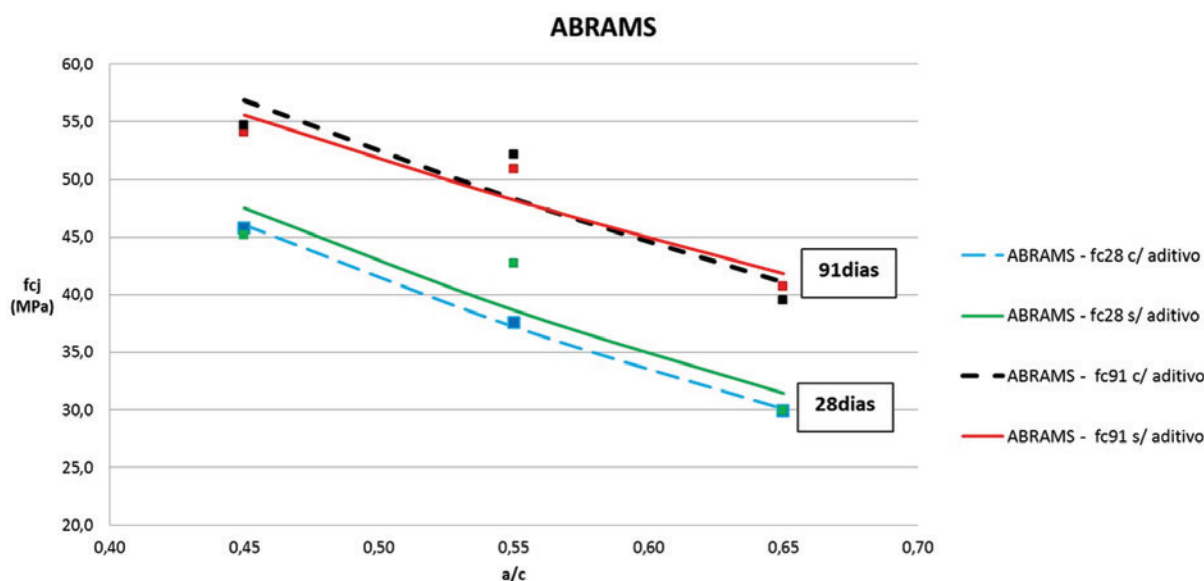


Figura 8
Curvas típicas da Lei de Abrams

3.1 Resistência à compressão

Identificam-se também os resultados de resistência à compressão obtidos a partir das variações de idades, das relações água/cimento e do uso de aditivo cristalino. Neste contexto, pode ser observada a Figura 7.

Processando os resultados através do método dos mínimos quadrados obtêm-se as curvas típicas da Lei de Abrams [23] apresentadas na Figura 8. A partir da observação dessa figura, pode-se notar que o uso dos aditivos cristalinos não prejudica a resistência à compressão dos concretos.

3.2 Penetração de cloretos - ensaio colorimétrico

Após a realização do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C1202) nas amostras de 28 e 91 dias, foi realizada aspersão de $AgNO_3$ e os resultados foram obtidos, conforme Figura 9. Mediante os resultados expostos pôde ser identificado aumento da profundidade da camada contaminada por cloretos com a elevação da relação água/cimento de 0,45 para 0,65. Identificou-se também a redução da profundidade de penetração com a utilização do aditivo cristalino, com valores médios, em geral, da ordem de 20% a menos.

3.3 Coeficiente de difusão de cloretos

A fim de efetuar análise dos resultados no tocante à obtenção do coeficiente de difusão aparente de cloretos, pode ser adotada recomendação de Berke e Hicks [24] onde a relação entre os dados de carga passante e coeficiente de difusão de cloretos é considerada. O modelo proposto por Berke e Hicks [24], pode ser adotado para estimar a vida útil de projeto de estruturas de concreto armado (tempo até o início da despassivação das armaduras por cloretos) e, ainda, o surgimento de fissuras em concretos submetidos a ambientes de névoa salina.

Em face ao exposto, foi proposto a Equação 1 para obtenção de forma empírica de estimativa do coeficiente de difusão de cloretos utilizando os resultados de carga passante relativos ao ensaio rápido de penetração de cloretos ASTM C 1202. Essa equação foi adotada por Helene e Medeiros [25] e Andrade e Whiting [26].

$$C_{da} = 0,0103 \times 10^{-8} Q^{0,84} \tag{1}$$

Onde: C_{da} = Coeficiente de difusão aparente de cloretos (cm^2/s) e Q = carga passante total (Coulomb).

Por intermédio da obtenção dos coeficientes de difusão de íons cloreto, determinado pelo método proposto por Berke e Hicks [24] e adotando a segunda Lei da Difusão de Fick da difusão no estado não estacionário, torna-se possível a construção de gráficos que relacionam a profundidade de penetração de cloretos com a vida útil da estrutura.

Para estimativa da vida útil de projeto (VUP), foram utilizadas as Equações 2 e 3 desenvolvidas a partir da Segunda Lei de Fick [27-29].

$$P_{Cl} = 2(z)\sqrt{Dt} \tag{2}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} \tag{3}$$

Onde: D é o coeficiente de difusão de cloretos (cm^2/ano), t é a vida útil de serviço (anos), $\text{erf}(z)$ é a função erro de Gauss, P_{Cl} (penetração de cloretos) é a profundidade onde a concentração de cloretos alcançou o limite crítico para que ocorra a despassivação da armadura (cm), C_0 é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto (adotado 0%), C_s é a concentração na superfície do concreto (%), C_{Cl} é o limite crítico para despassivação das armaduras por corrosão por ataque de cloretos ao longo da profundidade (P_{Cl}) e do tempo (t) (%).

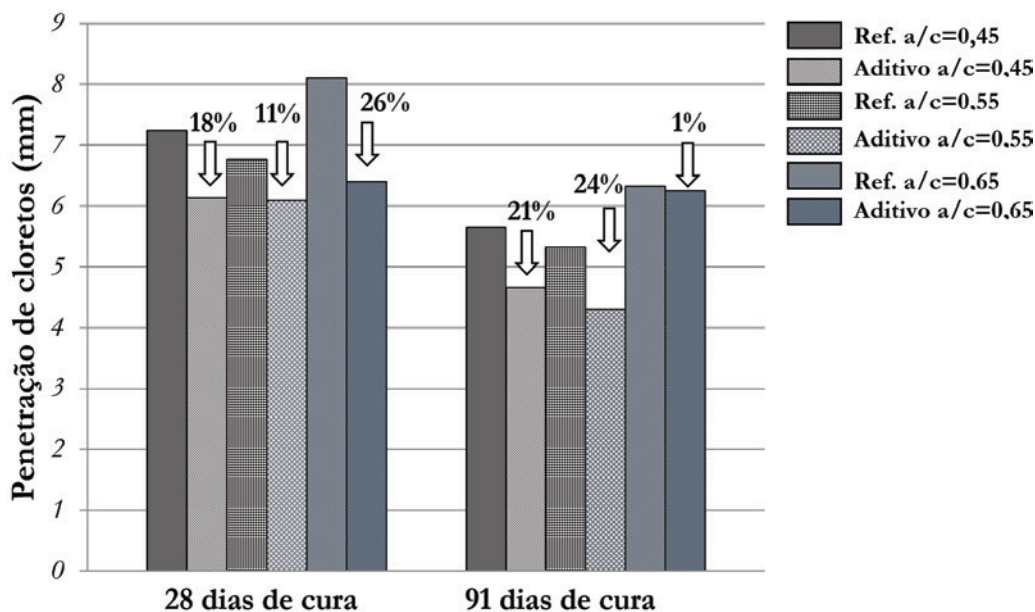
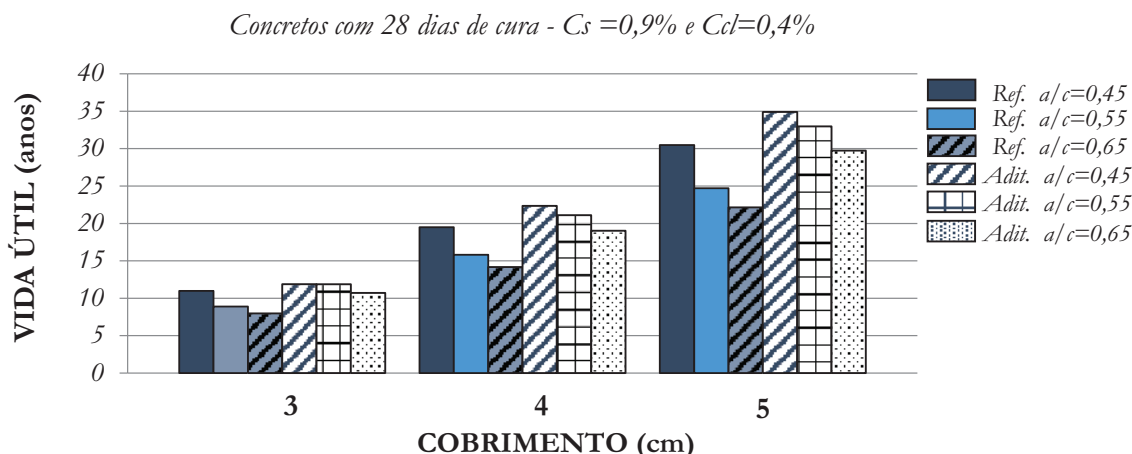


Figura 9 Penetração de cloretos nas amostras de concreto

**Figura 10**

Estimativa de vida útil – baseada nos concretos com período de cura de 28 dias

Para elaboração do gráfico, foram necessárias as definições de alguns parâmetros tal como a fixação de valor de 0,4% em relação à massa de cimento como valor limite para despassivação das armaduras. Este valor foi adotado em função do contemplado como limite máximo de cloretos em concreto armado orientado em fib (CEB-FIP) (The International Federation for Structural Concrete) e valor médio entre as normas ABNT NBR 6118:2014, 0,50%, e americana ACI-318, 0,30%.

Como valor de cloretos na superfície do concreto adotou-se 0,9%,

percentual recomendado por Helene [1] como referencial ou orientativo para concretos com relação água/cimento de 0,48 a 0,68, consumo de cimento de 280 a 400kg/m³ e submetidos à névoa salina.

O valor da concentração de cloretos na superfície do concreto a ser adotado, considerando ambientes submetidos à névoa salina, é objeto de discussões. Medeiros [28] aponta como um valor que possa ser adotado como percentual de cloretos na superfície do concreto de 1,8%. Segundo o autor, este valor situa-se na média de outros percentuais recomendados por Helene (1993), cujo

Tabela 6

Elevação de vida útil em função da utilização do aditivo

Cobrimento (cm)	Tipo	Vida útil (anos)	Elevação de vida útil (%)
3	Ref. 0,45	11,0	15%
	Aditivo 0,45	12,5	
	Ref. 0,55	8,9	33%
	Aditivo 0,55	11,9	
	Ref. 0,65	8,0	34%
	Aditivo 0,65	10,7	
4	Ref. 0,45	19,5	15%
	Aditivo 0,45	22,3	
	Ref. 0,55	15,8	33%
	Aditivo 0,55	21,1	
	Ref. 0,65	14,2	34%
	Aditivo 0,65	19,0	
5	Ref. 0,45	30,5	15%
	Aditivo 0,45	34,9	
	Ref. 0,55	24,7	33%
	Aditivo 0,55	33,0	
	Ref. 0,65	22,1	34%
	Aditivo 0,65	29,7	

valor é de 0,9%, e de Guimarães [30] no qual o valor adotado é de 3,0% de cloretos na superfície de uma estrutura real com 22 anos de idade e submetida a um ambiente contendo névoa salina. Nunes et al. [31] avaliaram estruturas de concreto em uso, com idades superiores a 15 anos e diferentes distâncias em relação à água do mar e obtiveram os seguintes valores: Cs= 3,1%, para distância de zero metros; Cs= 1,1%, para distância de 160 metros e Cs= 0,6%, para distância de 630 metros. Guimarães et al. [32] sugerem os seguintes valores de Cs para estimativa de vida útil de projeto: 3,2%, para zero metros; 1,1%, para 160 metros e 0,6% para distância entre 680 e 5.000 metros. Logo, o valor de cloretos na superfície do concreto adotado nesta pesquisa de 0,9%, considerando ambiente submetido à névoa salina, encontra-se condizente com as pesquisas apresentadas.

É importante ressaltar que, conforme Andrade [33] a vida útil apresentada neste trabalho somente é válida nas seguintes condições: o concreto armado está no começo de sua vida útil de serviço (período de iniciação); o mais rápido agente degradador é o ataque por cloretos, desprezando-se outros; concreto sujeito à névoa salina ou imersão em água contaminada com íons cloreto e nenhum outro fator acidental externo afetaria as propriedades do cobrimento de concreto.

A partir da equação, o gráfico da Fig. 10 relaciona o cobrimento adotado com a estimativa da vida útil de projeto (período de iniciação da corrosão por cloretos) para os concretos analisados. Os cobrimentos de 3, 4 e 5 cm foram selecionados por configurarem, conforme ABNT NBR 6118:2014, aqueles recomendados para classe de agressividade, respectivamente, ambientes urbanos e agressividade moderada, ambiente marinho e agressividade forte e respingos de maré e agressividade muito forte. Foram considerados para a análise os concretos com idade de cura de 28 dias por configurarem a idade de referência de concretos contemplando reações de hidratação em fase madura e por apresentarem resultados mais significativos da ação do aditivo cristalino do que em 91 dias.

Baseado no gráfico da Fig. 10 e na Tabela 6, nota-se que ao se adotar um cobrimento de 4cm conforme previsto em ABNT NBR 6118 (2014) para estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos e relação água/cimento de 0,65 obtém-se vida útil de aproximadamente 14 anos para o concreto de referência e 19 anos para o concreto com aditivo, representando elevação em torno de 34%. Concretos de relação água/cimento de 0,65 e cobrimento de 5cm tem-se 22 anos para o concreto de referência e quase 30 anos para o concreto com aditivo, representando elevação da vida útil de 34% nestes concretos. Ao se adotar um cobrimento de 5cm, maior cobrimento indicado pela norma para estrutura de concreto armado, na relação água/cimento de 0,45 tem-se cerca de 30 anos para o concreto de referência e próximo de 35 anos para o concreto com aditivo cristalino.

4. Conclusões

Após a realização dos ensaios foi possível concluir neste estudo, que:

- O aditivo cristalino estudado não alterou as propriedades dos concretos frescos e melhorou as propriedades dos concretos endurecidos, proporcionando a redução da penetração de clo-

retos sem comprometer a resistência à compressão;

- As melhorias obtidas ocorreram de modo mais significativo aos 28 dias, porém se prolongaram aos 91 dias de idade;
- A redução média de corrente passante, em Coulombs, no ensaio da ASTM C1202 foi de 15%;
- Com relação ao ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata, houve redução da camada contaminada por cloretos aos 91 dias, configurando maior resistência à penetração de íons cloreto nas amostras desta idade. Foi observado também que, assim como os resultados obtidos pelo método ASTM C1202, houve aumento da resistência à penetração de cloretos com a diminuição da relação a/c e com a utilização de aditivo cristalino;
- Com relação à estimativa de vida útil de projeto, a utilização do aditivo cristalino favoreceu elevação de até 34% nos concretos avaliados.

5. Referências bibliográficas

- [1] HELENE, Paulo. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 248p. (Habilitation thesis) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] TANG, L. Chloride Transport in Concrete – Measurement and prediction, Doctoral thesis, Dept. of Building Materials, Chalmers Universities of Technology, Publication P-96:6, Gothenburg, Sweden, 1996.
- [3] ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras, Ed. Pini, São Paulo, 1986.
- [4] Basher, L.; Kroop, J. Cleland, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review, Construction and Building Material. 15 (2001) 93–103.
- [5] SOUSA, V. C. M. - Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. São Paulo: PINI, 1998, 255 p.
- [6] NEVILLE, A. M., Tecnologia do concreto, 2ª ed., Pini, São Paulo, 2010.
- [7] Tittleboom, K. V.; Snoeck, D.; Wang, J.; De Belie, N. Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials. In: 4th International Conference on Self-Healing Materials. Ghent, Belgium: Proceedings... p. 406-413, 2013.
- [8] RILEM. Self-healing phenomena in cement-based materials. Heidelberg: Springer Netherlands, v. 11. 2013.
- [9] Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. Cement Concrete Composite, 2012;34:566–74.
- [10] Kuramoto, Y.; Matsuda, Y.; Nakamura, Y.; Irie, M. Verification of suppression of AAR by a metal carrying complex compound. In: Proceedings of 11th international conference of alkali-aggregate reaction in concrete. Quebec, Canada; 2000:1-9[in CD]
- [11] Xiao, X.; Zhang, Q.S.; Liang X.Y.; Zhang, X.N. Research on Chloride Ion Diffusion of Concrete Water-Based Capillary Crystalline Waterproofing and its Penetration Depth by Using Electron Microscope Advanced, Materials Research, 857 (2013) 27–34
- [12] Ourives, C. N.; Bilesky, P. C. Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do

- Concreto. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, Salvador, Brasil, 2008.
- [13] Helene, Paulo; M. Lima; Maryangela. G.; Takagi, E.. M. Self-healing of self-compacting concretes made with brazilian blast furnace slag cements activated by crystalline catalyst. XII DBMC 02-05 de Setembro 2014 São Paulo- Brazil
- [14] Helene, Paulo; Takagi, E. M.; Lima, M.G. Contribution to study of the self-healing effect activated by crystalline catalysts in concrete structures when subjected to continuous exposure to water. In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, 2012, Cape Town. Proceeding of 3rd International Conference of Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. Cape Town: CRC Press, 2012. V. III. P. 1415-1419.
- [15] Almeida, I. R. A onda de concreto que flutua no M.A.R. Revista Concreto & Construções, IBRACON, V. 72, P. 100-110, Out-Dez. 2013
- [16] Helene, Paulo; Britez, C.; Bueno, S.; Pacheco, J. "Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ" In: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado-RS.
- [17] Teng L.; Huang, R.; Chen, J.; Cheng, A; Hsu, H. A study of crystalline mechanism of penetration sealer materials. Materials (2014), 399–412.
- [18] Yodmatai, D. et al. Eater sorptivity, water permeability, autogenous shrinkage and compressive strength of concrete with crystalline materials. In: 15th national convention on civil engineering. 2010. Ubonrachatani: Proceedings
- [19] Whiting, D. Rapid determination of the chloride permeability of concrete. Final Report No. FHWA/RD-81/119, Federal Highway Administration, August 1981, NTIS No. 82140724.
- [20] Medeiros, M. H. F.; Borba, A. Y.; Filho, J. H.; Paulo Helene. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas", Revista Escola de Minas, Ouro Preto-MG (2012) 475-481.
- [21] Luping, T. Nilsson, L. "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field." ACI Materials Journal, v. 89, n.1, (1992) 49-53.
- [22] MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, 2ª Ed., IBRACON, São Paulo, 2014.
- [23] Monteiro, Paulo; Helene, Paulo & KANG, S. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. Materials & Structures, v.26, p.443 – 452, 1993
- [24] Berke, N.S., Hicks, M.C. Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data. Corrosion forms and control of infrastructure, ASTM STP 1137, V. Chacker ad. ASTM. Philadelphia, 1992. p. 207-231.
- [25] Medeiros, M. H. F.; Gobbi, A.; Groenwold, J. A.; Paulo Helene. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos, Revista Escola de Minas, Ouro Preto-MG (2013) 59-65.
- [26] Andrade, C.; Whiting, D. A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration. Materials and Structures, v. 29, p. 476-484, 1996.
- [27] Helene, Paulo (2000), "Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. Manual de Diagnósis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado" (Barcelona, Espanha: Collegi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona), 1th edn., p. 87-102.
- [28] Medeiros, M. H. F. (2008), "Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íon cloretos." Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [29] Ribeiro, D. V. (2014), Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. São Paulo: Elsevier.
- [30] GUIMARÃES, A. T. da C. Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos. 2000. 241 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.
- [31] NUNES, J. L. O.; Guimarães, A. T. C.; Silveira, B. P.; Guimarães, D. L. C.; Oliveira, M. T.; Rodrigues, N. D. Intensidade de ataque de cloretos: considerações sobre a distância do concreto em relação à água do mar. In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica - SEMENGO. Rio Grande, FURG, 2004.
- [32] GUIMARÃES, A.T.C., CASTRO, P., NUNES, J.L.O., "Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos", In: Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, 2007.
- [33] ANDRADE, J. J. (2005), "Vida útil das estruturas de concreto." In: Concreto: Ensino. Pesquisas e Realizações. Geraldo Isaia (Ed.). Ibracon, São Paulo, p.923-951.