Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO DA TAXA DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS PRODUZIDOS A PARTIR DE CIMENTO CP-IV E CP-V COM E SEM SÍLICA ATIVA

B. H. CARDOSO
Eng Civil, Mestrando
PPGEC - UNISINOS
Rio Grande do Sul
brunohcardoso91@gmail.com

M. MANCIO
Prof. Dr.
PPGEC - UNISINOS
Rio Grande do Sul
mancio@unisinos.br

RESUMO

A corrosão de armaduras é o principal mecanismo de deterioração nas estruturas de concreto armado e um dos principais tipos de patologia no ramo da construção civil. Visando evitar problemas de deterioração prematura e aumentar a vida útil de novas estruturas de concreto armado, desde 2003 a norma NBR 6118 estabelece requisitos de qualidade que incluem, além da capacidade resistente e desempenho em serviço, a durabilidade da estrutura. Para isto, a norma estabelece valores mínimos de resistência à compressão e valores máximos de relação água/cimento (a/c) para o concreto a ser utilizado, em função da classe de agressividade do meio onde a estrutura será construída. Entretanto, estas exigências de norma não levam em consideração o tipo de cimento Portland utilizado e nem a utilização ou não de adições minerais, como sílica ativa ou metacaulim. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar quantitativamente a taxa de penetração de íons cloreto em diferentes concretos, com três relações água/cimento (0,35; 0,50 e 0,65), executados com dois tipos de cimento (CPV ou CP IV) e com a incorporação ou não de 10% de sílica ativa nos traços com cimento ARI. A penetração de cloretos foi avaliada através do método nórdico NT BUILD 492 – um procedimento menos agressivo e mais realista do que o procedimento da ASTM C 1202 – e a absorção de água por capilaridade dos concretos foi medida pelo método RILEM TC 116 adaptado. Os resultados dos ensaios de durabilidade ilustram a importância de se considerar os tipos de aglomerantes utilizados, juntamente com os valores de relação a/c do concreto.

Palavras-chave: Corrosão; Concreto armado; Adições Minerais; Cimento Portland

ABSTRACT

Corrosion of reinforcement is the main deterioration mechanism in reinforced concrete structures and one of the main types of pathology in the construction industry. In order to avoid problems of premature degradation and extend the service life of new reinforced concrete structures, since 2003 the NBR 6118 standard establishes quality requirements that include, in addition to bearing capacity and performance in service, the durability of the structure. For this, the standard sets minimum values of compressive strength and maximum water/cement ratio (w/c) for the concrete to be used, depending on the aggressiveness of the medium class in which the structure will be built. However, these standard requirements do not take into consideration the type of Portland cement used and not the use or not of mineral admixtures such as silica fume or metakaolin. In this context, this study aims to quantitatively study the penetration of chloride ions in different concrete, with three water/cement ratios (0.35, 0.50 and 0.65), performed with two types of cement (CPV or CP IV) and the incorporation or not 10% of silica fume in the traces with ARI cement. The chloride penetration was evaluated by the Nordic method NT Build 492 - a less aggressive procedure that is also more realistic than the ASTM C 1202 standard - and the water absorption by capillary action of the concrete was measured by TC 116 adapted method. The results illustrate the importance of taking into consideration the types of binders used, along with specification of the water/cement ratio of the mixture.

Keywords: Corrosion ; reinforced concrete ; Mineral additions ; Portland cement

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cimento é o principal elemento presente no concreto, tem em suas substâncias características a presença de silicatos de cálcio, com sua origem principalmente no calcário (75% a 80%) e na argila (20% a 25%). Estes dois elementos formam o clínquer, mais tarde é adicionado o sulfato de cálcio ou gesso ($CaSO_4$) e as adições minerais, como fíler, escória ou pozolanas entre outras adições [1]. Para Battagin A. e Battagin I. [2] essas substâncias que são adicionados podem variar para diferentes tipos de cimentos, que são:

a) Cimento Portland Comum (CP I);
b) Cimento Portland comum com adição (CP I-S);
c) Cimento Portland composto com escória (CP II-E);
d) Cimento Portland composto com fíler (CP II-F);
e) Cimento Portland composto com pozolanas (CP II-Z);
f) Cimento Portland de alto-forno (CP III);
g) Cimento Portland Pozolânico (CP IV);
h) Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

Há ainda outros cimentos para outras aplicações mais específicas, como por exemplo o CP – RS que é resistente aos sulfatos; o CP – BC que possui baixo calor de hidratação e também o CPB que é um cimento sem a adição de ferro o que torna ele branco [2-6]. Conforme Battagin e Battagin [2] as cinzas volantes (pozolanas) e escórias de alto forno vêm com o intuito de reduzir o elevado consumo de clínquer devido ao elevado impacto ambiental que é gerado pela sua fabricação, além de contribuírem com o aumento da durabilidade das estruturas de concreto. Já Cascudo [7] ressalta que as adições, como os produtos gerados da hidratação do cimento são responsáveis pelas várias características do concreto, como o pH e a porosidade. Desta forma ambos mantêm uma relação direta com a permeabilidade e a corrosão em elementos de concreto armado. Cimentos com adições minerais possuem a tendência de gerarem pastas muito compactas e assim resultando em uma menor permeabilidade comparado a estas mesmas pastas sem as adições. Também é constado uma durabilidade superior nestes novos elementos. [8] [9]. Desta mesma forma, Preece et al. [10], demonstra que as adições tendem a aumentar a resistência à compressão do concreto e assim obter melhores resultados a partir destas amostras.
As reações de hidratação dos silicatos do cimento são apresentadas nas equações 1 (Hidratação do silicato tricálcico) e 2 (Hidratação do silicato dicálcico), conforme Mehta e Monteiro [1]:

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad (1)$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad (2)$$

A reação pozolânica, que envolve a reação da sílica (S) proveniente das adições minerais com o hidróxido de cálcio (CH) vindo da hidratação do cimento pode ser vista de modo simplificado na Equação 3. (Reação pozolânica).

$$S + CH + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H \quad (3)$$

A redução da porosidade capilar do concreto auxilia para o aumento da durabilidade de uma estrutura [11]. Para a hidratação do cimento a água tem papel fundamental neste processo, todavia uma relação água/cimento elevada fará com que o concreto tenha uma porosidade elevada com prejuízos às suas principais características.
Estes poros diminuem a resistência à compressão e facilitam a penetração de agentes agressivos, sendo que em geral a principal preocupação é a corrosão do aço presente no interior do concreto. Conforme Mehta e Monteiro [1] Souza e Ripper [12] a relação a/c (água/cimento) está diretamente relacionada com a porosidade e a resistência da pasta do cimento, além de afetar diretamente também a sua permeabilidade.
A permeabilidade do concreto facilita a penetração de agentes agressivos e de água, levando à corrosão eletroquímica do aço. Os íons penetram no concreto até atravessar o filme de passivação que se forma entre o concreto e o aço, onde ocorre a proteção da armadura. [13]. Ao encontrar o aço estes íons reagem formando assim o dióxido de ferro, as moléculas formadas são maiores que anteriormente presente da barra de aço, assim, a barra se expande criando uma força de tração no concreto, já que este elemento que envolve o aço tem baixa resistência de tração, comparado a de compressão o concreto acaba rompendo, desprotegendo ainda mais o aço e facilitando uma corrosão cada vez mais grave. [14]

O emprego de adições minerais é amplamente inserido na construção civil. Dal Molin [15] explica que as adições têm diversas utilidades, como por exemplo: melhorar o desempenho, reduzir o impacto ambiental, reduzir o consumo de matéria-prima, entre outras formas de aplicação. Adições são amplamente utilizadas na indústria cimentícia, tanto para amenizar impactos ambientais como financeiros, conforme Battagin e Battagin [2] explicam:

> "As adições são matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis do mercado. Resumem-se a: gipsita, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos. As adições melhoram certas características do concreto preparado com o cimento que as contém e preservam o ambiente ao aproveitar resíduos e diminuir a extração de matéria-prima e as emissões de gases de efeito estufa."

Dal Molin [15] classifica em três grupos as adições minerais, de acordo com suas ações físico-químicas: material pozolânico, material cimentante e fíler.
Os materiais pozolânicos são os mais empregados na construção civil, inclusive os cimentos do tipo CP-IV, já em sua fabricação é adicionado cinza volante para substituir uma fração do cimento, desta forma além de reduzir o impacto ambiental, eleva as propriedades do concreto, como a diminuição dos poros e, consequentemente, a resistência a penetração de íons cloreto.
Para amenizar o alto consumo de cimento foi verificado que alguns materiais têm mais condições de reagirem com cimento que outros, como é o caso dos materiais pozolânicos Veiga et al. [16] e Crauss [17] nos demonstram que a adição pozolânica no concreto auxilia para a diminuição dos poros, resultando assim em uma menor permeabilidade do concreto. Na Figura 1 é possível verificar que a adição de cinza de casca de arroz pode diminuir a penetração dos íons cloreto.

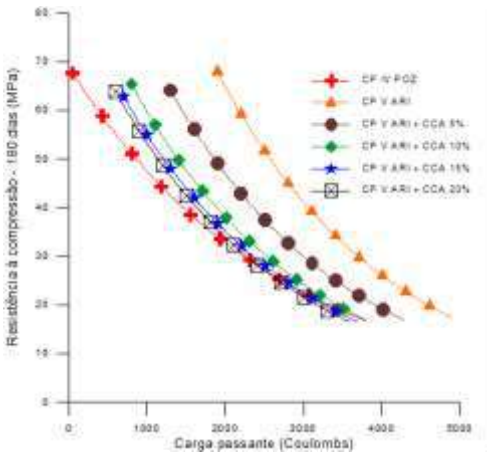

Figura 1 - Resistência a Compressão x Penetração de íons cloreto [18]

Conforme Battagin e Battagin [2] demostram, os materiais pozolânicos são silicosos ou silico-aluminosos. As pozolanas não reagem apenas com a presença de água, estes dois elementos precisam de um produto gerado na hidratação do cimento, o hidróxido de cálcio, para assim tornarem-se aglomerantes. A construção civil utiliza muitos recursos naturais e produz também grandes volumes de materiais que são difíceis de descartar. Nos tempos atuais são amplamente consideradas questões de ecologia, sendo assim, a indústria da construção civil tem um grande poder de absorver materiais oriundos de outros tipos de indústrias, que por sua vez tem dificuldades em descarte, como é o caso da sílica ativa [19].
A sílica ativa tem sua origem nos fornos de produção de ferro silício e silício-metálico, com a redução de quartzo de alta pureza por carvão mineral. Este material tem uma dimensão muito fina, em torno de 100 vezes menor o tamanho das partículas de cimento em seu estado amorfo. [2] [20]. Andrade et al. [21] demonstram que o Brasil está entre os maiores produtores de ferro silício, desta forma há uma grande produção deste material que é disperso no ar.
Este material, assim como outros pozolânicos, quando é adicionado a pasta de cimento torna esta pasta muito mais compacta, refinando a estrutura de poros tornando este material mais compacto. Esta compactação aumenta a resistência a penetração de líquidos, gases e também de íons. [7].

A aplicação da sílica ativa auxilia também no ganho de resistência à compressão, conforme demonstrado por Silva [11]. A sílica ativa, assim como outras pozolanas, tem efeitos significantes nas propriedades químicas do concreto e na condutividade elétrica de seus poros [22]. Conforme estudos relatados por Medeiros et al. [23], adicionando a sílica ativa no concreto, além dos benefícios já relatados pode reduzir de 80% a 88% a migração dos íons cloreto, aumentando de maneira satisfatória a vida útil de projeto de uma edificação. Na Figura 4 é possível notar que a adição de sílica ativa no concreto, além de amenizar o consumo de cimento, aumenta significativamente a resistência a penetração de íons cloreto onde pode chegar a 88%.

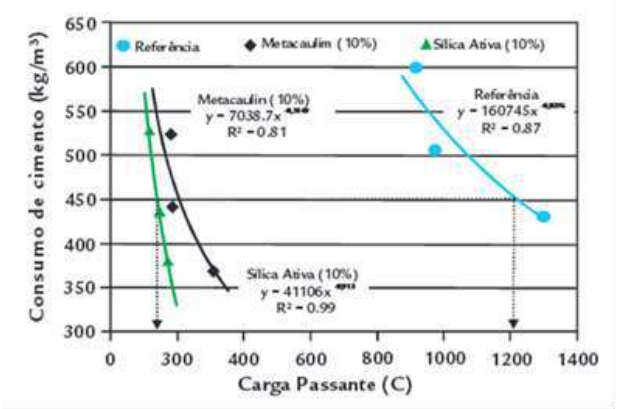

Figura 4 - Carga passante (Coulumbs) x Consumo de cimento (Cura 28 dias) [23]

2 METODOLOGIA

Para este trabalho foram utilizados três fatores água/cimento, 0,35, 0,50 e 0,65. Foram também utilizados dois tipos de cimento, o CP-V-ARI-RS e CP-IV (POZ), sendo que no cimento do tipo CP-V-ARI-RS em um dos traços, foi substituído 10% de sílica ativa, fornecida pela empresa Tecnosil. Após produzidos os corpos de prova de tamanho 100x200 mm foram colocados em uma sala de cura submersos em água saturada em cal. O traço foi definido utilizando o método de Helene e Terzian [24] com um fator de umidade igual a 8,5% definido a partir de traços pilotos produzidos em laboratório, desta mesa forma o teor de argamassa ficou estabelecido em 55%. Os traços utilizados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 Traço definido

a/c	m	c	a	p
0,35	3,12	1	1,26	1,85
0,50	4,88	1	2,24	2,65
0,65	6,65	1	3,21	3,44

Nas datas estabelecidas foram retirados os corpos de prova da sala de cura do concreto e, logo em seguida, foram levados para serra, onde foram cortadas duas fatias centrais para elaboração do ensaio de absorção de água e de penetração dos íons cloreto. Estas fatias mediam 50 mm ± 2 mm conforme respectivas normas. Pela Figura é possível ver como foram cortados os corpos de prova utilizados nos ensaios de durabilidade.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

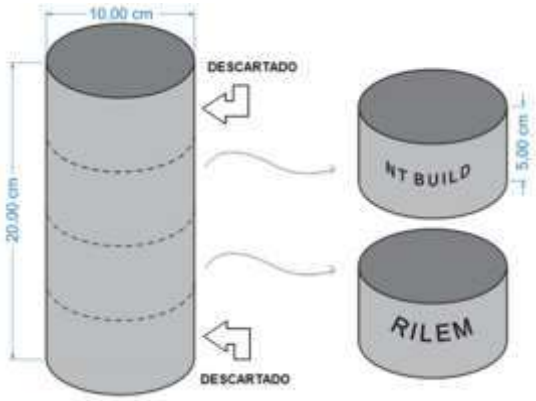

Figura 5 – Esquema de corte dos corpos de prova para ensaio de durabilidade

Para a execução do método NT BUILD 492 [25] os corpos de prova possuíam dimensões de 100 mm de diâmetro e 50 ± 2 mm de altura, foi medido estas dimensões com auxílio de um paquímetro. Estes CP's devem ser inseridos em um tubo de borracha até que toda superfície lateral seja completamente coberta por este tubo. Eles foram fixados com duas abraçadeiras nas duas extremidades do espécime para aumentar a pressão e não ocorressem vazamentos. Neste caso também utilizou-se silicones de vedação para proteger ainda mais os corpos de prova para que não haja infiltração pelas laterais dos corpos de prova.
Logo após foram fixados neste conjunto duas placas de aço inox para que fossem aplicadas a tensão nas faces do corpo de prova, assim que a estrutura estivesse completamente montada. Após a fixação das placas, posicionou este conjunto numa plataforma com um ângulo de 32º inserindo também em uma caixa plástica com dimensões de 37x27x28 cm, suficiente para abrigar todo o conjunto do experimento. Em seguida foram adicionadas as soluções. Ao todo, em cada ensaio eram preparados 12 litros de solução de NaCl, para preenchimento da caixa plástica, e 300 ml de NaOH para dentro da luva de borracha.
Para esquema elétrico foi plugado com a placa catódica na entrada negativa e a anódica na entrada positiva da fonte. O multímetro pode ser ligado antes ou depois do corpo de prova, sendo necessário estar posicionado na função de amperímetro de corrente continua e com o cabo entrando no plug "A" do aparelho e a saída "COM" ligado no corpo de prova. Podem ainda ser realizados medições de tensão com auxílio de outro multímetro para confirmação do valor.

Após todo experimento montado, mediu-se a temperatura da solução anódica, ligou-se a fonte de energia com uma tensão de 30 V e verificou-se a corrente que estava sendo marcada no amperímetro. A partir da corrente elétrica que estava passando no concreto realizou-se um ajuste na tensão conforme tabela da norma, logo após mediu-se a nova corrente novamente. A duração do ensaio também é em função desta primeira medição da corrente e é definida conforme mesma tabela. Após passado este tempo foi medido a temperatura da solução e a corrente do espécime, também foi anotado o tempo de duração do ensaio, e a tensão absoluta que foi aplicada.

Após passado o tempo do experimento, foi desmontado a estrutura, extraído apenas o corpo de prova e rompido axialmente o espécime, em seguida aspergido nitrato de prata ($AgNO_3$). Nos locais onde ocorreu a penetração dos íons cloreto no concreto, ficou esbranquiçado, isso se dá pela precipitação de um outro elemento que é formado, o AgCl (Cloreto de Prata) e desta forma foi possível medir a profundida da penetração destes íons. Em seguida foi medido a profundidade a partir do meio do corpo de prova, com um espaçamento de 10 mm intercalando estas medições conforme demonstrado na norma NT BUILD 492 e calculou-se a média destes valores.

Para o teste de absorção de água foi utilizada a especificação de RILEM TC 116 PCD [26], as amostras possuíam as mesmas dimensões do ensaio anterior, estes espécimes foram colocados em estufa até massa constante e antes de iniciar o ensaio, foram colocados no dessecador, ligado o vácuo e deixado esfriar a temperatura ambiente. Após os CP's atingirem a temperatura ambiente, são medidos e as faces laterais e a superior foram seladas, evitando assim que houvesse interferência com a umidade do ambiente externo. Para efetuar estas vedações foi utilizado balão de látex na parte superior, já nas laterais foi utilizado fita do tipo tape, deixando assim, apenas a superfície inferior livre para que fosse realizado o ensaio.
Este ensaio constitui em expor a face não vedada da amostra em um recipiente com uma altura de aproximadamente 3 mm de água corrente, também neste recipiente deve conter um canal extravasor de água, o corpo de prova que se mediu a taxa de absorção de água ficou suspenso em um suporte vazado expondo assim uma maior superfície em contato com a água. Conforme Troian [27], neste ensaio é medida a taxa de absorção de água nas idades de 7, 28 e 63 dias,

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

juntamente com o ensaio de compressão e penetração dos íons cloreto. Neste teste foi medido a taxa de absorção nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60 minutos, e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96 horas. Após o tempo previsto da amostra foi retirado o excesso com auxílio de um pano úmido para que se eliminasse parte da água que havia sido absorvida pelo corpo de prova, logo após, foram pesadas as amostras para saber quanto de água cada CP's absorveu em um determinado tempo.

3 RESULTADOS

Na Tabela é possível verificar a evolução da resistência nos concretos em relação as idades em que foram medidas. O CP-V com relação água/cimento mais baixa, obteve uma resistência superior a todos os outros em sua primeira idade, o que já era esperado, pois como foi visto na bibliografia este cimento é muito fino comparado ao CP-IV, também analisado, isso fez com que a água reagisse mais rapidamente com o cimento, pois a superfície de contato é maior. Ainda neste ponto é possível verificar que este traço é mais rico em consumo de cimento, em relação aos outros do tipo CP-V, sem adição de sílica ativa, o valor obtido neste é superior ao encontrado no traço rico com 10% de S.A. Este resultado demonstra que a sílica ativa começou a agir de forma menos significante no concreto. O traço onde houve a substituição, adicionando o material pozolânico possui uma quantidade inferior de cimento, desta forma na primeira idade em que foi medido, pode-se constatar a falta que esta quantia faz nos primeiros dias após o endurecimento do concreto

Também na Tabela 1 é possível verificar que o concreto produzido com CP-V e uma relação de a/c igual a 0,65, teve uma resistência superior ao concreto produzido com cimento do tipo CP-IV e um a/c de 0,50. Comparando com os concretos CP-V com 10% de SA e relação água/cimento referente à 0,50 obtiveram o mesmo valor médio de resistência de 7 dias, mas nos de 28 dias o concreto que tinha sílica ativa em sua composição teve um acréscimo de resistência em torno de 60,7% comparado com os 20,4% dos corpos sem este, o que demonstra a eficácia do material pozolânico

Na idade de 28 dias houve um aumento da resistência, no ensaio à compressão, muito significativo dos corpos de prova com sílica ativa comparado com os produzidos a partir de cimento CP-IV. Estes CP's aumentaram 40,9% em relação aos corpos com a adição da sílica, como já era esperado, a sílica começou a reagir com o hidróxido de cálcio que se formou no concreto. Bem como é possível analisar que o concreto produzido com CP-IV ainda teve valores inferiores comparados aos dos concretos com cimento do tipo CP-V.

Após os 63 dias a resistência continuou aumentando, para os corpos de prova produzidos com 10% de sílica ativa, esses obtiveram um acréscimo de 96,0%em relação aos 7 dias para traço de 0,35. Para o traço de 0,50 houve uma evolução igual a 113,6%. Estes concretos obtiveram valores de resistência muito satisfatórios, já que o aumento da resistência à compressão ultrapassou os valores dos traços produzidos com apenas cimento tipo CP-V e CP-IV. Conforme visto no item 2.1.7 a sílica ativa auxilia para o aumento da resistência do concreto em idades avançadas.

Na Figura 16 é possível verificar o decréscimo de resistência em relação ao aumento da relação água/cimento. Para se obter uma melhor curva foi necessário calcular o valor à resistência do concreto com relação a/c 0.65 e sílica ativa utilizando a Lei de Abrams. Os valores de A e B obtidos foi respectivamente igual a 59,88 e 5,18, com estes valores foi possível calcular quanto seria o valor para o traço com relação água/cimento igual a 0,65 e o valor resultante foi de 20,5 MPa.

Devido a um problema com a prensa hidráulica, os corpos de prova foram secos em estufa para parar a hidratação e encaminhados a outro laboratório para teste. Os resultados obtidos (com média de 35,1 MPa), entretanto, não são consistentes com os demais resultados e não foram incluídos na análise comparativa dos dados.

Tabela 1 - Resistência à compressão em função do tempo (MPa)

Tipo de cimento	Adição SA (%)	a/c	7 DIAS			28 DIAS			63 DIAS		
			Fc	Média	Desvio Padrão	Fc	Média	Desvio Padrão	Fc	Média	Desvio Padrão
CP-V	0	0,35	38,4	38,2	1,01	50,7	46,4	4,60	64,7	60,7	4,96
			37,1			47,1			62,3		
			39,1			41,5			55,2		
		0,50	26,6	26,5	0,07	33,3	32,0	2,96	47,6	46,7	5,82
			26,5			34,0			51,9		
			26,5			28,6			40,4		
		0,65	23,1	23,8	1,20	29,1	27,8	1,75	39,5	37,6	1,66
			25,2			25,8			36,4		
			23,1			28,6			37,0		
CP-V	10	0,35	34,5	33,8	1,33	43,3	44,9	1,92	64,4	66,2	1,62
			34,6			44,4			66,7		
			32,3			47,1			67,6		
		0,50	28,2	26,3	2,38	42,7	42,2	0,71	54,3	56,1	4,60
			23,6			42,5			52,6		
			27,0			41,4			61,3		
		0,65	38,0	---	-	33,5	34,8	1,16	47,8	48,1	0,42
			34,3			35,7			48,4		
			34,1			35,2			0,0		
CP-IV	0	0,35	32,2	33,7	3,26	37,5	41,5	3,48	55,0	55,4	0,58
			31,5			44,1			55,1		
			37,5			42,9			56,1		
		0,50	17,9	21,3	3,02	27,1	30,0	2,50	37,7	39,1	2,38
			23,5			31,2			41,8		
			22,5			31,7			37,7		
		0,65	13,9	12,9	1,18	19,9	18,9	1,88	26,2	27,1	0,90
			11,6			16,7			27,1		
			13,2			20,1			28,0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os resultados de absorção de água os valores obtidos neste teste também podem ser avaliados com um grau de certeza muito elevado, como demonstrado, os desvios padrões foram muito baixos.

Na idade de 28 dias houve uma diminuição de todos os valores. Os corpos de prova que possuíam sílica obtiverem as menores proporções de absorção. Houve uma redução de 25% para o traço rico com sílica ativa.
O traço rico produzido apenas com cimento do tipo CP-V obteve uma redução igual a 2,2%, esta diminuição é a mesma que foi obtida pelo traço pobre com sílica ativa. Já o traço rico produzido a partir do cimento CP-IV obteve uma redução de apenas 0,5%. É possível verificar a porosidade capilar pela Tabela 2 e Tabela 3 onde, esse valor é justificado pelas a reações ocorridas com hidróxido de cálcio, conforme visto na revisão. As pozolanas auxiliaram para a diminuição dos poros como Veiga et al [20] e Crauss [21] relatam em suas pesquisas.

Tabela 2 - Resultados de absorção de água por capilaridade aos 7 dias

Cimento	Sílica Ativa (%)	a/c	Absorção (g/cm²)	Absorção Total (%)	S Taxa de Abs. Capilar (mm/h$^{1/2}$)	Porosidade Capilar	Porosidade Total
CP-V	0	0,35	0,62	5,50	0,85	8,12	12,16
	0	0,50	0,72	6,30	1,27	13,39	14,38
	0	0,65	0,76	6,75	1,44	15,20	15,17
CP-V	10	0,35	0,43	3,80	0,52	4,51	7,55
	10	0,50	0,69	6,15	1,02	11,70	14,04
	10	0,65	0,68	6,09	1,07	13,18	13,92
CP-IV	0	0,35	0,65	5,87	0,70	3,36	11,93
	0	0,50	0,73	6,75	1,21	13,74	14,46
	0	0,65	0,78	7,29	1,19	14,96	14,98

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 - Resultados de absorção de água por capilaridade aos 28 dias

Cimento	Sílica Ativa (%)	a/c	Absorção (g/cm²)	Absorção Total (%)	S Taxa de Abs. Capilar (mm/h$^{1/2}$)	Porosidade Capilar	Porosidade Total
CP-V	0	0,35	0,63	5,53	0,78	5,62	12,06
	0	0,50	0,74	6,59	1,40	11,70	14,46
	0	0,65	0,76	6,77	1,59	14,91	15,15
CP-V	10	0,35	0,58	5,27	0,69	3,79	10,66
	10	0,50	0,72	6,39	1,12	12,51	14,32
	10	0,65	0,70	6,59	1,19	12,03	13,82
CP-IV	0	0,35	0,65	5,74	0,76	3,48	12,20
	0	0,50	0,75	6,67	0,97	10,88	14,15
	0	0,65	0,75	6,80	0,98	11,32	14,70

Fonte: Elaborado pelo autor

Devido à elevada variabilidade do ensaio e, em alguns casos, erro experimental devido à infiltração de solução de NaCl pela lateral do corpo de prova, foi necessário descartar alguns valores espúrios que não faziam sentido fisicamente. O critério adotado foi a exclusão de valores individuais distantes mais de um desvio padrão da média calculada.

Conforme a Tabela 4 é possível verificar que todos os traços obtiveram valores altos de penetração nas primeiras idades, o que indica que os poros, aos 7 dias, não estavam completamente fechados pois havia reações no concreto que deveriam ocorrer. Na data seguinte em que foi medido os concretos diminuíram em 67,2% aos 28 dias, para o traço com relação água/cimento 0,35. Isso demonstra que o concreto produzido a partir do cimento CP-V obteve importantes ganhos na resistência à penetração dos íons cloreto.

É possível verificar, nesta tabela, que nas primeiras idades os concretos com sílica ativa já obtiveram quedas significativas na penetração de íons cloreto, comparados com os corpos de prova produzidos sem sílica ativa.

Analisando os concretos aos 28 dias, é possível observar que os CP's que possuíam sílica ativa e os que foram produzidos a partir do cimento do tipo CP-IV, obtiveram valores com os resultados superiores aos do CP-V. De acordo com a Tabela 9 os traços 0,35 tanto do CP-V com sílica quanto o sem, são considerados como um grau baixo de migração. Já na mesma relação água/cimento com cimento CP-IV possui uma classificação moderada, o fator 0,50 também está nesta mesma classificação, os demais traços são classificados como alta, pois possuem um valor maior que 15 x 10^{-12} m²/s.

Para as medidas na idade de 63 dias, houve uma diferença bem significante, contradizendo aos vistos da literatura, e com valores contrários ao que seria esperado com base nos resultados obtidos aos 7 e 28 dias. Apesar de todos corpos de prova serem do mesmo lote, e os ensaios terem sido realizados da mesma forma, foi visto que para a idade de 63 dias equivocadamente foi trocada a estufa usada para preparação das amostras, por falta de disponibilidade de espaço na estufa que vinha sendo utilizada. Anteriormente a estufa onde eram armazenados os corpos de prova possuía uma temperatura de 65°C, enquanto a nova estufa onde foram depositados estes CP's estava com uma temperatura de 115°C.

Importante enfatizar que conforme demonstra a norma NT BUILD 492, os valores demonstrados de concretos com e sem sílica ativa possui uma reprodutibilidade de 13%.

Tabela 4 – Resultado penetração dos íons cloretos em $x10^{-12}$ m²/s

Tipo de cimento	Adição (%)	a/c	7 DIAS		28 DIAS		63 DIAS	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CP-V	0	0,35	20,7	-	7,7	1,74	29,2	2,99
		0,50	29,4	-	15,1	3,38	25,7	4,32
		0,65	43,5	12,65	23,7	3,34	31,4	10,87
CP-V	10	0,35	17,5	0,47	6,6	1,16	13,4	4,80
		0,50	20,8	1,46	13,1	0,24	24,5	6,83
		0,65	22,7	2,35	18,3	2,58	17,0	4,61
CP-IV	0	0,35	17,6	2,59	10,9	1,07	17,8	4,06
		0,50	27,2	0,34	13,9	3,74	20,6	2,28
		0,65	25,8	3,01	19,2	1,24	23,6	9,94

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 6 pode-se verificar o gráfico de coeficiente de migração e absorção de água aos 7 dias. Como demonstrado anteriormente o concreto com sílica ativa possui uma menor penetração de cloreto e uma menor absorção de água, o que demonstra que já aos 7 dias estes CP's já haviam uma menor porosidade. Para os corpos de prova produzidos com este material, mas com relação água/cimento de 0,50 e 0,65, a Figura demonstra que ambos possuíam valores próximos em relação a porosidade, também vale ressaltar ainda que os CP's produzidos com cimento do tipo CP-IV que apesar de possuírem uma permeabilidade maior comparado ao CP-V, estes corpos de prova demonstram um menor valor em relação a penetração de íons cloreto.

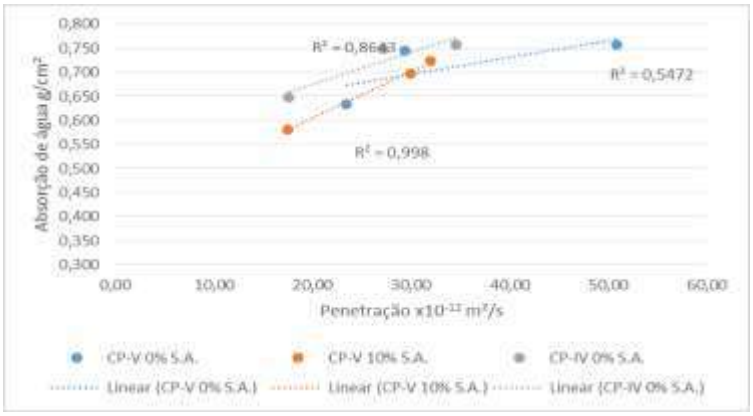

Figura 6 – Resultado de ensaio de penetração e absorção de água aos 7 dias

Aos 28 dias é possível verificar o comportamento dos corpos de prova conforme Figura 7, o corpo de prova produzido com cimento CP-V e uma relação água/cimento de 0,35 obteve resultado superior no quesito penetração dos íons cloreto, mas comparando a absorção de água teve uma diferença aproximada de 3,5% em relação ao cimento CP-IV. O cimento com sílica ativa observa-se que possui a menor permeabilidade em relação aos demais traços, este valor chegou a ser 32% inferior ao CP-IV. Para este mesmo tipo de cimento só obteve valores maior em penetração de íons cloreto

para a relação a/c, que foi de 6,8%. Nesta idade, conforme a tabela 9 (item 3.6), a penetração de cloretos variou de baixa (de 5 a 10 x10^{-12} m^2/s) a alta (>15 x10^{-12} m^2/s).

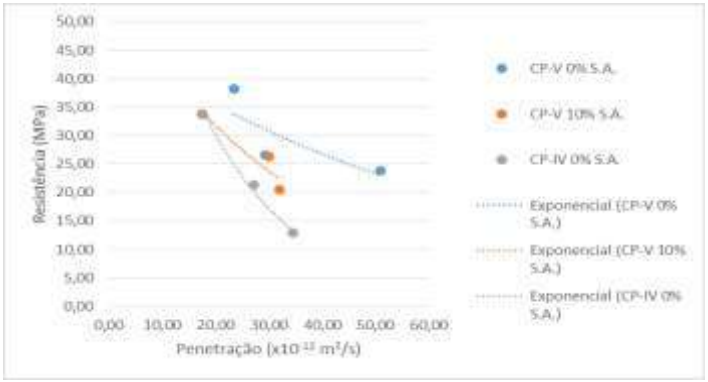

Figura 7 - Resultado de ensaio de penetração e absorção de água aos 28 dias

É possível analisar pela Figura 8 que as menores taxas de penetração de íons cloreto também foram as que obtiveram as menores resistências a compressão. Para o traço rico com sílica, obteve valores próximos ao traço com cimento do tipo CP-IV, tanto em resistência a penetração quanto a compressão. Já o traço intermediário obteve uma resistência superior a este tipo de cimento, ficando próximo ao traço com apenas cimento do tipo CP-V.

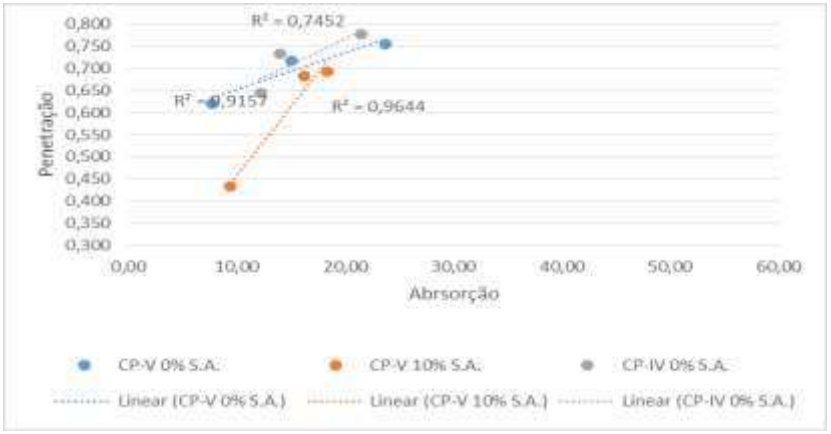

Figura 8 - Resistência a compressão x coeficiente de migração 7 dias

Aos 28 dias o traço com sílica ativa melhorou ainda mais os resultados, conforme Figura 9, além de melhorar a resistência mecânica do concreto, auxiliou também na diminuição dos poros. O cimento CP-IV obteve resultados inferiores comparados aos demais traços. Mas conforme visto na NBR 6118 na tabela 7.1 todos os traços 0,35 e 0,50 poderiam ser utilizados em zonas marítimas. Conforme resultados apresentados o traço com sílica apresenta valores maiores tanto a diminuição da penetração dos íons cloreto, quanto a resistência a compressão. Ou seja, com uma relação maior de água/cimento e a adição de sílica ativa no concreto obteve resultados melhores aos demais concretos sem a presença deste material

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

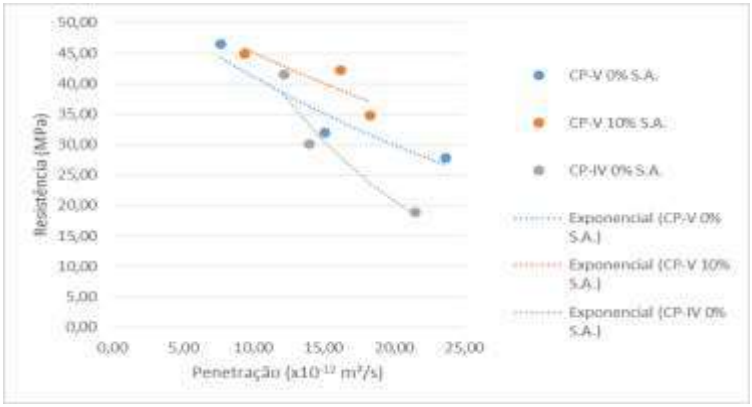

Figura 9 - Resistência a compressão x coeficiente de migração 28 dias

4 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou fazer uma avaliação da taxa de penetração de íons cloreto em concretos produzidos a partir de cimento CP-IV e CP-V com e sem sílica ativa.

O NT BUILD 492 se mostrou um método eficaz para a obtenção de resultados de ensaio acelerado, já que nos concretos não foram registrados uma elevada temperatura.

O concreto produzido a partir de cimento do tipo CP-IV teve os piores resultados registrados em ensaios de resistência à compressão. Como o esperado o traço rico obteve valores superiores em todos os ensaios, e nos testes de durabilidade também foi possível verificar a diferença deste traço em relação as outras relações água/cimento. O cimento CP-IV não teve tantos ganhos em resistência à compressão, comparado aos demais tipos de cimento, mas apresentou resultados satisfatórios em ensaios de porosidade e de penetração de íons cloreto.

Os corpos de prova produzidos com cimento CP-V tiverem bons resultados nos ensaios de resistência à compressão, como esperado. Para a absorção de água nas primeiras idades, o concreto produzido a partir deste cimento também teve bons resultados referente a porosidade. Mas em relação ao ensaio de resistência à penetração de íons cloreto, estes CP's não tiveram uma resposta tão eficiente. Desde as primeiras idades no ensaio de NT BUILD este concreto obteve valores menores comparado aos concretos com outros aglomerantes.

O concreto com sílica ativa obteve importantes ganhos para os ensaios tanto de durabilidade quanto de resistência à compressão. Estas resistências aparecem de forma singela nas primeiras idades, mas em idades avançadas elas são elevadas. Com isso é possível concluir neste trabalho que a adição de sílica ativa no concreto com CP-V - ARI auxilia de maneira considerável no concreto, tanto para o ganho de resistência quanto para aumentar a resistência à penetração de íons cloreto, podendo assim aumentar a durabilidade das estruturas próximas a ambientes marinhos.

5 BIBLIOGRAFIA

[1] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais***.** São Paulo: IBRACON, 2008. 573p.

[2] BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O Cimento Portland no Brasil. In: Isaia, G. C. (ed.). *Materiais de Construção e Princípios e Ciência e Engenharia dos Materiais*: São Paulo: IBRACON, 2010, v.1 p. 761-790.

[3] TESSARI, R. *Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto.* Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2001

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTALND. Cimento Portland CP(RS) - Resistente a sulfatos - NBR 5737). São Paulo, [2015a?]. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=23> cesso em: 15 out. 2015.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTALND. O que é CP de Baixo Calor e Hidratação? São Paulo, [2015b?]. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=38> Acesso em: 15 out. 2015.

[6] SILVA FILHO, L. C. P.et al *USO DO CONCRETO BRANCO ESTRUTURAL: MUSEU IBERÊ CAMARGO* In: Seminário de Patologia das Edificações - Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, 2., 2004 - UFRGS - Porto Alegre Disponível em: <http://www.copex.com.br/site/arquivo/leme_30anos_luizcarlos.pdf> Acesso em: 15 out. 2015.

[7] CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto*: inspeção técnicas eletroquímicas. São Paulo, Goiânia GO: Pini, 1997.

[8] KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Isaia, G.C. (1ª ed.). **Concreto**: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1 p.295-322

[9] BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1. p.185-232.

[10] FIGUEIREDO, E.P. **Ação dos Cloretos no Concreto**. In: Isaia, G.C.(Org.) 1. ed. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1, p.887-902.

[11] SILVA, M.G. Cimentos Portland com adições minerais. In: Isaia, G. C. (ed.). **Materiais de Construção e Princípios e Ciência e Engenharia dos Materiais**: São Paulo: IBRACON, 2010, v.1 p. 791-823.

[12] SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

[13] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Protection of metals in concrete against corrosion**: ACI 222R-01. Michigan, 2001. Documento em PDF.

[14] PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Types and causes of concrete deterioration**. Ilinois, 2002. (R&D Serial, n. 2617). Documento em PDF.

[15] Dal Molin, D. C. C. Adições Minerais. In: Isaia, G. C. (ed). **Concreto:** Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1, p. 261-309.

[16] VEIGA, K. K. ZANELLA, A. K. MORO, A.S. SEVERO, D. D. BOLSON, F. ENGEL, M. K. GASTALDINI, A. L. G. **Absorção Capilar de Concretos com Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno** IX Salão de iniciação científica PUCRS – Porto Alegre 2008

[17] CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial.** Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, UFSM, Santa Maria, 2010

[18] FERREIRA, Â. de A.. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Cinza de Casca de Arroz: Avaliação de Propriedades Relacionadas com a Durabilidade.** 1999 Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre,

[19] KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2002

[20] POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Egenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

[21] ANDRADE, M. L. A. CUNHA, L. M. S. GANDRA, G. T. Panorama da indústria mundial de ferroligas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 10, p. 57-113, set. 1999.

[22] SHI, C. **Another Look at the Rapid Chloride Permeability Test** (ASTM C1202 or ASSHTO T277) CJS Technology Inc, FHWA Resource Center, Burlington, Ontario, Canada 2003

[23] MEDEIROS, M.H.F. GOBBI, A. GROENWOLD, J. A. HELENE, P. **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 66(1), 59-65, jan. mar. 2013

[24] HELENE, P. TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** Brasília: PINI, 1993. 349 p

[25] NORDTEST METHOD. *NT BUILD 492*: Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. Nordtest, Espoo, Finland, 1999

[26] RÉUNION INTERNATIONALE DESLABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES (RILEM) *TC 116 PCD*. Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing. Materials and Structures**,** v. 32, p. 163 – 173, 1999

[27] TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.