

# **AVALIAÇÃO DA CORROSÃO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO A TÉCNICA DE POTENCIAL DE CORROSÃO**

Victor Correia de Oliveira Pereira (1), Kalline Almeida (2), Eliana Cristina Barreto Monteiro (3)

(1) Mestre em Engenharia Civil – Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Brasil – e-mail: victor.napster@gmail.com

(2) Mestre em Engenharia Civil – Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Brasil – e-mail: kallinealmeida@yahoo.com.br

(3) Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Pernambuco/Universidade Católica de Pernambuco, Brasil – e-mail: eliana@poli.br

## **RESUMO**

O concreto armado é o material mais comumente utilizado na construção de estruturas; não obstante, essas estruturas podem ser atacadas por diversos agentes agressivos (gás carbônico, íons cloretos, sulfatos), que invariavelmente afetam seu desempenho durante a sua vida útil. A corrosão ocasionada pela ação de íons cloretos é apontada como sendo a maior ameaça à durabilidade e à vida útil das estruturas de concreto armado. Sabe-se que, dentre outros fatores, o tipo de cimento é um dos que mais influenciam a corrosão de armaduras iniciada por íons cloretos. Dessa forma, este trabalho visa estudar a capacidade de proteção de alguns tipos de cimento fabricados e vastamente utilizados na região Nordeste (CPII-Z-32, CPIII-40 e CPIV-32), no que diz respeito à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloretos. Para isso, foram realizados os ensaios de potencial de corrosão e de absorção capilar para avaliar o desempenho dos

showed high resistance to corrosion initiated by chloride ions and less capillary absorption. Keywords: Corrosion. Chloride ions. Durability. Cement.

## **INTRODUÇÃO**

O concreto representa o material de construção mais adequado para as estruturas, superando alternativas, também viáveis, como o aço e a madeira (HELENE, 2007). Por um longo período, acreditou-se que a durabilidade deste material era ilimitada, no entanto durante as décadas de 1980 e 1990, a percepção inicial sobre durabilidade foi alterada com o surgimento de manifestações patológicas que ocasionaram danos significativos e frequentes nas estruturas (PEREIRA et al., 2010).

A corrosão de armaduras, uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado, pode ser definida como um processo eletroquímico que provoca a degradação (oxidação) do aço do concreto (HUSNI et al., 2007). Em estágios avançados, pode comprometer a segurança estrutural, podendo implicar no colapso das estruturas de concreto afetadas (CASCUDO, 2005). A literatura sobre durabilidade das estruturas de concreto armado considera a corrosão iniciada por íons cloretos o ataque mais severo e a principal causa de corrosão prematura em estruturas de concreto armado (AYRA; BUENFELD; NEWMAN, 1990; DELLINGHAUSEN et al., 2009; HELENE, 1993; MEDEIROS; HELENE, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NGUYEN; LORENTE; CARCASSES, 2009; RASHEEDUZZAFAR et al., 1990).

Vários aspectos tecnológicos (relação água/cimento, distribuição granulométrica, composição química) do concreto contribuem para a redução do índice de vazios e para o aumento da compacidade do concreto, diminuindo, desta forma, o transporte de agentes agressivos para o interior da estrutura. É amplamente reconhecido que a corrosão do aço presente no concreto induzida por íons cloretos pode conduzir a uma rápida deterioração das

estruturas de concreto armado. Este tipo de corrosão é influenciado por diversos fatores, tais como: o pH, a concentração de aluminato tricálcico (C3A) no cimento, ou seja, pela sua composição química, além dos fatores tecnológicos citados anteriormente. A presença de uma concentração crítica de íons de cloro em contato com a armadura irá provocar a despassivação, abrindo caminho ao processo de corrosão, que após se propagar, contribuirá para a perda de desempenho mecânico da estrutura.

A atual norma brasileira ABNT NBR 6118:2007 (Projeto de estruturas de concreto) segue a tendência internacional, uma vez que especifica classes de agressividade ou de exposição; tal detalhamento visa, entretanto, garantir a durabilidade somente por meio da definição da relação água/cimento (*a/c*) máxima, do cobrimento mínimo e da resistência à compressão mínima, não levando em consideração o tipo de cimento utilizado e a vida útil mínima que a estrutura deverá atingir (SILVA, M.; SILVA, V.; TANESI, 2010).

Tendo em vista as exposições anteriormente aludidas, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo de estudar a capacidade de proteção de alguns tipos de cimento da região Nordeste, CII-Z-32 (cimento Portland composto com pozolana), CIII-40 (cimento Portland de alto-forno), e CIV-32 (cimento Portland pozolânico), quanto à corrosão das armaduras sob a ação de íons cloretos, que depende, fundamentalmente, da composição química deste material. Os resultados apresentados são parte da dissertação de mestrado de Pereira (2011) e serão úteis para que os tecnólogos de concreto especifiquem corretamente o tipo de cimento a ser utilizado em estruturas inseridas em ambientes potencialmente agressivos devido à presença de íons cloretos.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos propostos, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade e

cimentos utilizados. Com base na variação do tipo de cimento, da relação água/cimento (0,4 e 0,7) e do período de cura (7 e 28 dias) foram definidas séries para realização dos ensaios. Verificou-se que a adoção de uma baixa relação água/cimento e a ampliação do período de cura conduzem a uma diminuição da porosidade e um aumento na resistência à corrosão. Constatou-se também que as séries confeccionadas com cimento CIII-40 apresentaram maior resistência à corrosão iniciada por íons cloretos e menor absorção capilar.

**Palavras-chave:** Corrosão. Íons cloretos. Durabilidade. Cimento.

## ABSTRACT

Reinforced concrete is the material most commonly used in building structures, however these structures can be attacked by various aggressive agents (carbon dioxide, chloride ions, sulfates), which invariably affect their performance during their lifetime. Corrosion caused by the action of chloride ions is pointed out as the greatest threat to durability and service life of reinforced concrete structures. It is known that, among other factors, the type of cement is one of the factors that most influence the reinforcement corrosion initiated by chloride ions. Thus, this work aims to study the protective capacity of some types of cement manufactured and used widely in the Northeast (CII-Z-32 and CIII-40 CIV-32), with respect to reinforcement corrosion under the action of chloride ions. For this, tests were carried out in corrosion potential and capillary absorption to evaluate the performance of the cements used. Based on the variation of the type of cement, water/cement ratio (0.4 and 0.7) and the curing period (7 and 28 days) were defined series for conducting the tests. It was observed that the adoption of a low water/cement ratio and increase of the curing period leading to a decrease of porosity and increased corrosion resistance. It was also found that the series of cement made with CIII-40

potencial de corrosão, que são tratados como variáveis dependentes. O ensaio de absorção de água foi realizado, uma vez que a penetração de água influencia diretamente na durabilidade da estrutura de concreto armado exposta a ambientes contaminados com cloretos. Para avaliação do processo corrosivo foi conduzido um ensaio de corrosão acelerada e utilizada a técnica de potencial eletroquímico de corrosão.

Os corpos-de-prova foram moldados utilizando-se os três tipos de cimento que se desejava analisar (CPII-Z-32, CPIII-40 e CPIV-32), duas relações água/cimento com significativa variação (0,4 e 0,7), para avaliar o desempenho dos cimentos em condições microestruturais distintas; e dois períodos de cura usualmente empregados (7 e 28 dias); esses parâmetros representam as variáveis independentes da pesquisa. Os traços foram definidos através do ensaio de determinação do índice de consistência normal de argamassa de acordo com os procedimentos apresentados pela norma brasileira ABNT NBR 7215:1997. A Tabela 1 apresenta a definição das séries utilizadas na pesquisa.

## MATERIAIS

Séries	Tipo do Cimento	Relação a/c	Período de Cura	Traço	Consumo de Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )
A1	CPII-Z-32	0,7	7	1:3,0	463
A2	CPII-Z-32	0,7	28	1:3,0	463
B1	CPII-Z-32	0,4	7	1:1,3	821
B2	CPII-Z-32	0,4	28	1:1,3	821
C1	CPIII-40	0,7	7	1:3,0	463
C2	CPIII-40	0,7	28	1:3,0	463
D1	CPIII-40	0,4	7	1:1,1	875
D2	CPIII-40	0,4	28	1:1,1	875
E1	CPIV-32	0,7	7	1:3,0	463
E2	CPIV-32	0,7	28	1:3,0	463
F1	CPIV-32	0,4	7	1:1,0	905
F2	CPIV-32	0,4	28	1:1,0	905

Tabela 1 – Determinação das séries.

As propriedades físicas e químicas dos três cimentos utilizados são mostradas na Tabela 3. Na Tabela 2 também constam os limites especificados pelas respectivas normas dos cimentos utilizados. Os cimentos CII-Z-32 e CIIV-32 incorporavam em sua composição material pozzolânico, designado de pozzolana natural proveniente de rocha vulcânica, nos teores de 12% e 43%, respectivamente. Na composição do cimento CIII-40 existia um percentual de 67% de escória de alto-forno.

As armaduras empregadas nos corpos-de-prova prismáticos destinados às medidas eletroquímicas de potencial de corrosão foram da classe CA – 60 com 5 mm de diâmetro.

Determinações químicas (%)	CII-Z-32	Limites ABNT NBR 11578:1991	CIII-40	Limites ABNT NBR 5735:1991	CIIV-32	Limites ABNT NBR 5736:1991
<b>Perda ao fogo</b>	5,44	≤ 6,5	3,83	≤ 4,5	4,48	≤ 4,5
<b>Óxido de silício (SiO<sub>2</sub>)</b>	23,99	S.E.	20,98	S.E.	32,37	S.E.
<b>Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	4,70	S.E.	4,91	S.E.	5,09	S.E.
<b>Óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	2,46	S.E.	3,75	S.E.	2,29	S.E.
<b>Óxido de cálcio (CaO)</b>	53,41	S.E.	59,37	S.E.	46,55	S.E.
<b>Óxido de cálcio livre (CaO)</b>	0,80	S.E.	0,61	S.E.	0,78	S.E.
<b>Óxido de magnésio (MgO)</b>	3,98	≤ 6,5	3,78	S.E.	3,54	≤ 6,5
<b>Trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>)</b>	3,26	≤ 4,0	2,29	≤ 4,0	3,17	≤ 4,0
<b>Óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O)</b>	0,14	S.E.	0,03	S.E.	0,15	S.E.
<b>Óxido de potássio (K<sub>2</sub>O)</b>	1,65	S.E.	0,42	S.E.	1,46	S.E.
<b>Resíduo insolúvel</b>	14,34	≤ 16,0	0,88	≤ 1,5	25,77	S.E.
<b>Anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>)</b>	4,02	≤ 5,0	2,88	≤ 3,0	2,79	≤ 3,0
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,84	S.E.	2,90	S.E.	2,82	S.E.
<b>Área específica (m<sup>2</sup>/Kg)</b>	470	≥ 260	606	S.E.	560	S.E.

Tabela 2 – Propriedades dos cimentos Portlands utilizados.

## ENSAIOS

O ensaio complementar de absorção de água foi realizado com o objetivo de auxiliar a compreensão e interpretação do ensaio de potencial de corrosão. A moldagem dos corpos-de-prova destinados aos ensaios foi realizada de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7215:1997.

### ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAILARIDADE

Para o ensaio de absorção de água foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após a moldagem todos os corpos-de-prova tiveram a face superior protegida com uma placa de vidro e permaneceram em câmara úmida (umidade relativa  $\geq 95\%$  e temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ ) por um período de 24h, quando então foram desmoldados. Em seguida as amostras permaneceram na câmara úmida até a idade desejada (7 ou 28 dias).

A metodologia adotada no programa experimental baseou-se na norma brasileira ABNT NBR 9779:1995; para tanto foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos de argamassa.

A absorção foi monitorada durante 72 horas, conforme procedimento descrito na ABNT NBR 9779:1995, a partir da pesagem dos corpos-de-prova. Vale ressaltar que, além das medições as 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72h previstas pela norma, a evolução de peso também foi monitorada nas idades de 30 min, 1 h, 2 h, 4 h e 5 h, pois nas primeiras horas é período em que ocorre a maior velocidade de absorção capilar.

### POTENCIAL DE CORROSÃO

Para o ensaio de corrosão acelerada, foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de argamassa de acordo com a metodologia proposta

por Monteiro (1996), nas dimensões de 60 x 80 x 25 mm, com duas barras de 5 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento e com cobrimento de 10 mm conforme mostrado na Figura 1. Antes da moldagem dos corpos-de-prova as barras foram submetidas ao procedimento de limpeza descrito na norma ASTM C 1152 (2004). A fôrma utilizada foi fabricada com material plástico, o que facilita a desmoldagem dos corpos-de-prova e evita a utilização de produtos desmoldantes, possível fator interveniente nos resultados.

Ainda antes da moldagem, a área das barras exposta ao ataque foi limitada através da colocação de fita isolante nas suas extremidades (Figura 1), estabelecendo-se uma área bem definida exposta à corrosão representando a região anódica da barra.

Para cada combinação foram feitos quatro corpos-de-prova, os quais foram curados em câmara úmida (umidade relativa  $\geq 95\%$  e temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ ); após esse período permaneceram em ambiente de laboratório até terem apresentado constância de massa. Em seguida, foram submetidos ao ensaio acelerado de corrosão.

O motivo da utilização de argamassa e não de concreto, entre outras razões, foi a dimensão dos corpos-de-prova que inviabilizam a utilização de agregado graúdo, o que geraria dificuldades durante a moldagem. Estudos realizados por Winslow e Liu (1990) evidenciam que a pasta na argamassa possui estrutura de poros semelhante à estrutura de poros da pasta no concreto. Portanto, pode-se supor que a estrutura porosa da pasta na argamassa pode ser um modelo adequado ao estudo da porosidade da pasta no concreto, embora possa haver alguma influência na zona de transição.

Foram conectados fios flexíveis à extremidade livre das armaduras, cujo objetivo era propiciar a conexão elétrica durante o ensaio de potencial de corrosão. Esta conexão foi protegida com fita isolante e sobre a fita foi aplicada resina epóxi (Figura 1). A resina epóxi tem como objetivo dificultar a penetração de agentes agressivos pela parte superior dos corpos-de-prova e

proteger a parte superior da armadura.

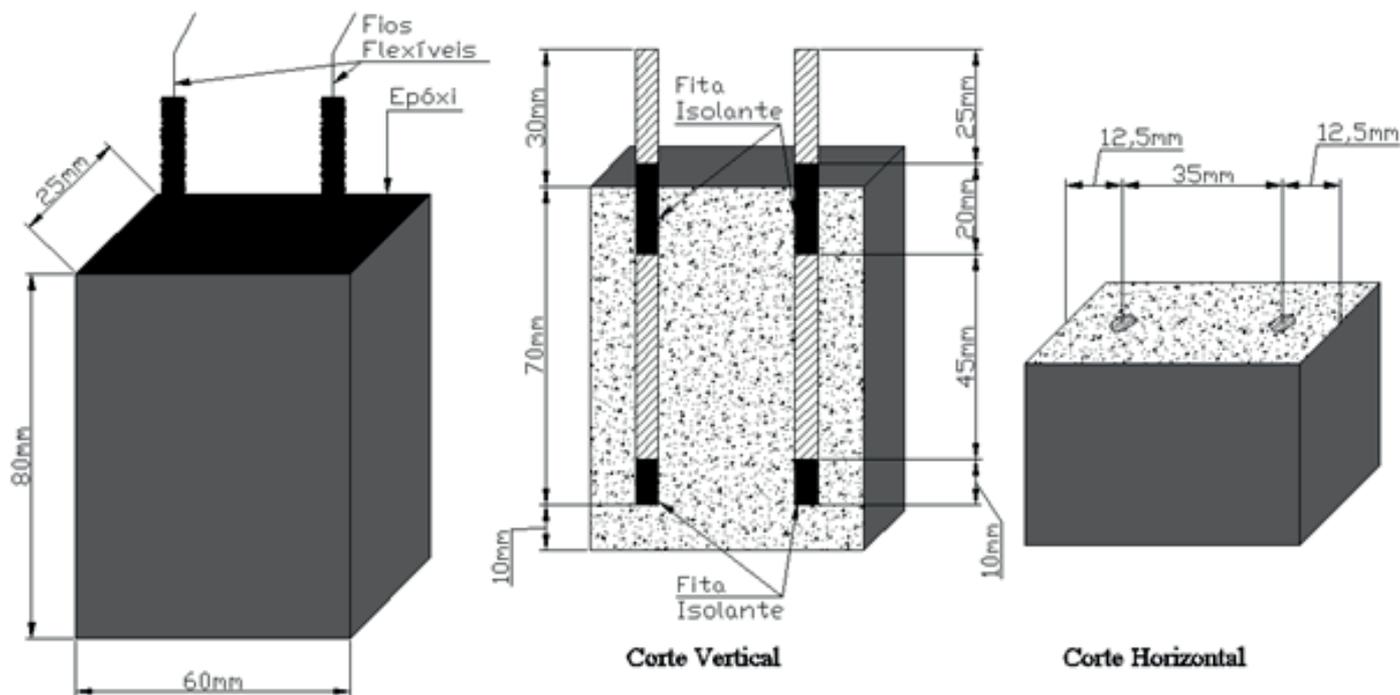


Figura 1 - Corte vertical e horizontal dos corpos-de-prova.

Para acelerar o processo corrosivo foi adotada o procedimento proposto por Monteiro (1996), que consiste em semiciclos de secagem (5 dias) e imersão parcial em solução aquosa com 5% de NaCl (2 dias), pois este permite o transporte dos agentes agressivos tanto por absorção capilar, como também o ingresso de cloretos por difusão. Essa metodologia foi escolhida pela razão de proporcionar a atuação dos principais mecanismos de transporte de cloretos (absorção por capilaridade e difusão iônica) no concreto (MEDEIROS; HELENE, 2009; JUCÁ, 2002) e pelo fato desses dois mecanismos governarem os efeitos nos ensaios cíclicos de secagem e umectação (HONG; HOOTON, 1999). Além disso, o cloreto de sódio é o mais importante sal de cloro, pois está presente nas principais situações de agressividade provenientes de contaminação externa, tal como em ambientes marinhos (AYRA; BUENFELD; NEWMAN, 1990).

Após devidamente curados e secados os corpos-de-prova foram submetidos aos semiciclos de secagem

e umectação. Na condição de secagem os corpos-de-prova são dispostos em estufa ventilada, mantendo-se a temperatura em 50° C. A condição de parcialmente submerso consiste em manter o nível da solução do recipiente em uma posição que corresponde à metade da altura da área de exposição da barra. Antes do início da ciclagem foi realizada a primeira medição do potencial de corrosão, em seguida foram realizadas medições após cada semiciclo.

Após cada semiciclo foi realizado o cálculo da média dos valores das medidas de potencial obtidas em cada uma das 8 barras embutidas nos 4 corpos-de-prova de cada série, a fim de possibilitar a análise dos dados. De posse dos resultados das médias, procedeu-se a avaliação do potencial de corrosão nos corpos-de-prova, utilizando os parâmetros estabelecidos na ASTM C 876 (2009) para o eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (ESC) apresentados na Tabela 3, os quais indicam a probabilidade de corrosão nas estruturas de concreto armado.

Potencial de corrosão referente ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre (mV)	Probabilidade de Corrosão (%)
$E_{corr} < - 350$	> 90
$E_{corr} > - 200$	< 10
$- 350 < E_{corr} < - 200$	Incerta

Tabela 3 - Parâmetros para avaliação dos valores de potencial de corrosão conforme a ASTM C 876 (2009).

## RESULTADOS

### Absorção por capilaridade

A Figura 2 apresenta os resultados para todas as séries com relação a/c igual a 0,7. O gráfico indica que os corpos-de-prova curados até os 28 dias de idade absorveram menor quantidade de água por unidade de área, quando comparados com aqueles curados até os 7 dias de idade e moldados com o mesmo tipo de cimento. Os resultados indicam uma diminuição na absorção de água de até 13,9% nas séries que prolongaram o

período de cura. Esse resultado deve-se a melhoria da microestrutura dos corpos-de-prova proporcionada pelo prolongamento do período de cura.

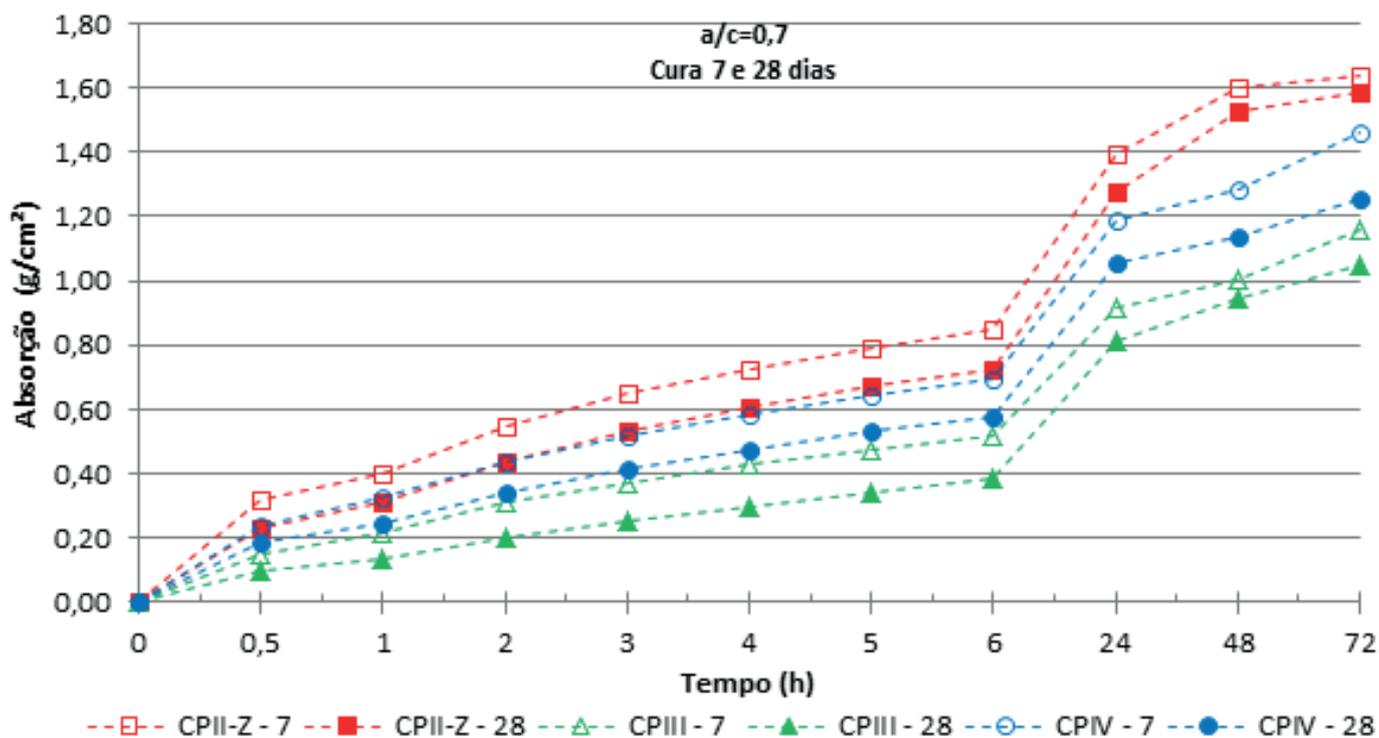


Figura 2 – Absorção capilar em função do tempo para os corpos-de-prova com relação a/c= 0,7.

Os resultados confirmam o efeito benéfico das adições em reduzir a porosidade da argamassa para as duas idades de cura estudadas, tendo em vista que a utilização de cimentos compostos com maiores quantidades de adições minerais (CIII-40 e CIV-32) reduziu entre 11% e 34% a absorção de água por capilaridade em relação ao CII-Z-32. Além disso, pode-se destacar o cimento CIII-40 como o mais eficiente em impedir a penetração de água por capilaridade na argamassa.

A Figura 3 apresenta os resultados para todas as séries que utilizaram relação a/c igual a 0,4. Para as séries com relação a/c 0,4, também se observa que o prolongamento da cura resulta em uma menor absorção de água nos corpos-de-prova, o que evidencia o efeito benéfico proporcionado pela cura à argamassa. Verificou-se uma diminuição de até 22,5% na absorção quando o período de cura é majorado de 7 para 28

dias. Os dados também indicam o efeito benéfico proporcionado pela utilização do cimento CPIII-40 na argamassa, apresentando diminuição de até 30% na absorção de água.

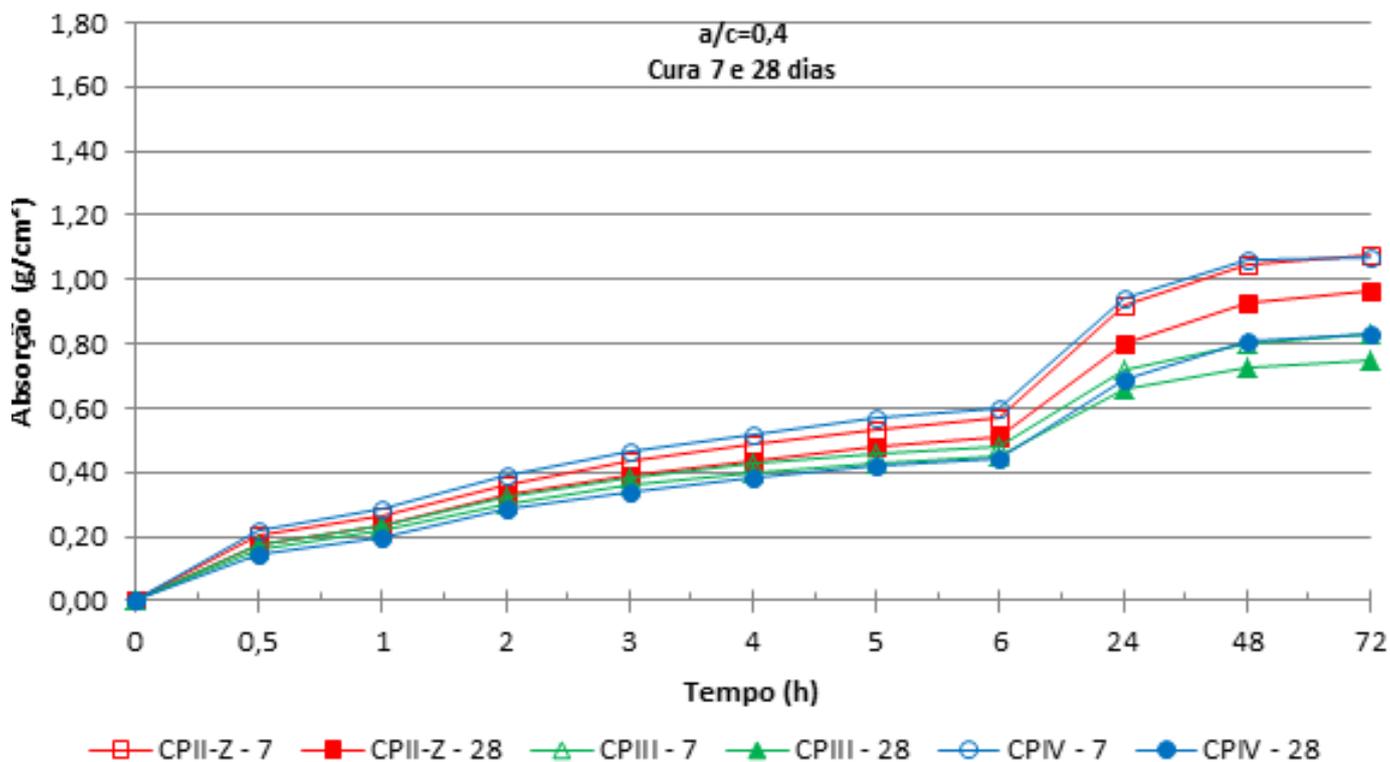


Figura 3 – Absorção capilar em função do tempo para os corpos-de-prova com relação  $a/c=0,4$ .

Vale salientar que a maior parte dos corpos-de-prova com relação  $a/c$  0,4 absorveu menos quantidade de água, quando comparada aos corpos-de-prova com relação  $a/c$  0,7.

Destaca-se ainda a capacidade do cimento CPIII em aumentar a resistência à penetração de água na argamassa. Fato devido ao benefício trazido pela incorporação de escória de alto-forno na composição do cimento e pela maior finura apresentada pelo CPIII-40 (Tabela 2), reduzindo assim a porosidade e intercomunicabilidade dos poros no interior da argamassa.

Verifica-se a tendência de aumento da absorção por capilaridade com o aumento da relação água/cimento. Esse fenômeno pode ser explicado pela porosidade mais

---

aberta e interconectada para amostras com elevada relação água/cimento (NEVILLE, 1997). A relação água/cimento, por ser o parâmetro controlador da porosidade, influenciará nas propriedades ligadas aos mecanismos de transporte, já que ao se reduzir a relação água/cimento haverá uma diminuição na quantidade de vazios da argamassa (MENDES et al., 2010).

## POTENCIAL DE CORROSÃO

Durante todo o ensaio observou-se valores nitidamente superiores (mais positivos) de potencial de corrosão na etapa de secagem a 50°C, devido à perda de água e conseqüente diminuição de volume de eletrólito nos poros. Na análise de potencial, observa-se também a tendência dos valores medidos na etapa de umectação de se apresentarem mais negativos, indicando uma maior probabilidade de corrosão.

Na Figura 4 são apresentados os resultados das séries com relação a/c igual a 0,7 submetidas ao período de 7 dias de cura. De acordo com o gráfico, as séries dos cimentos CII-Z-32 e CIV-32 exibiram amplitudes de variação de potencial similares. Entretanto, a série do cimento CIII-40 apresentou uma maior variação nos valores de potencial quando da mudança da fase de imersão parcial para a de secagem, mostrando valores significativamente mais positivos na secagem.

É interessante observar que as três séries entraram na faixa de valores menores que -350 mV (probabilidade de corrosão acima de 90%) na fase de imersão parcial aos 21 dias de ensaio. Verifica-se ainda que os valores de potencial na fase de imersão parcial estabilizam-se próximos a -600 mV.

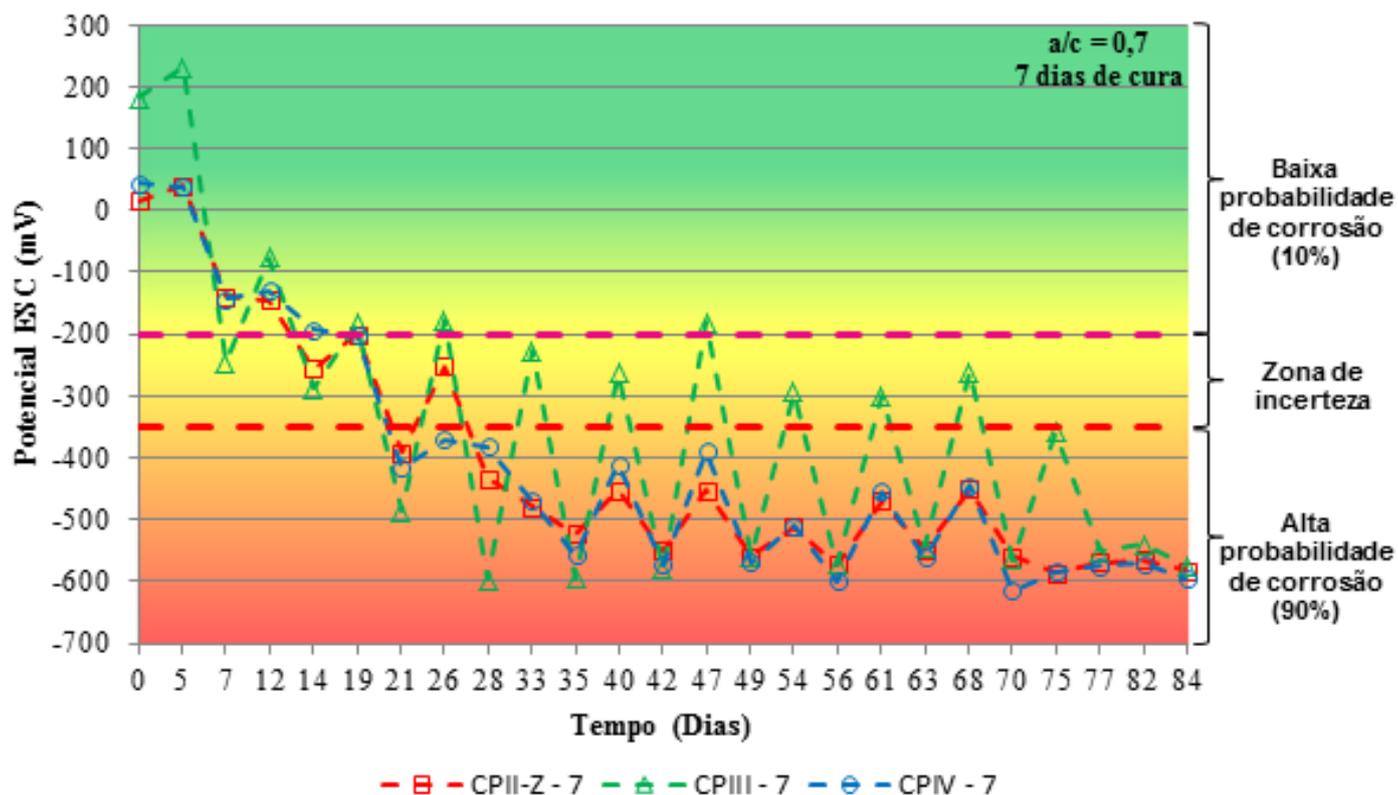
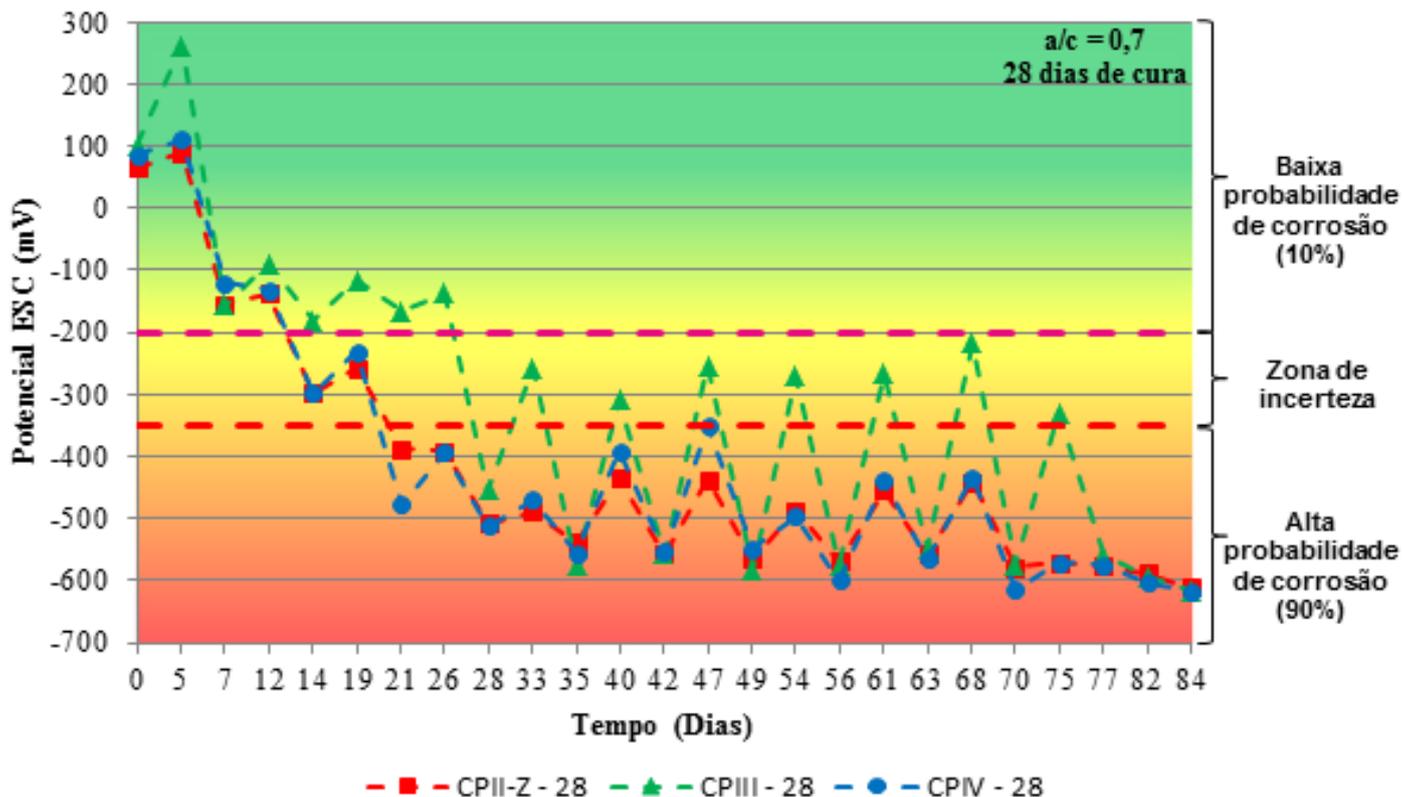


Figura 4 – Evoluções dos potenciais de corrosão das séries com relação a/c=0,7 e cura de 7 dias.

Na Figura 5 são apresentados os resultados das séries com relação a/c igual a 0,7 submetidas ao período de 28 dias de cura. Também se observa que as séries do cimento CPII-Z-32 e CPIV-32 apresentaram amplitudes de variação de potencial similares e menores que a do cimento CPIII-40.



Na Figura 5 são apresentados os resultados das séries com relação a/c igual a 0,7 submetidas ao período de 28 dias de cura. Também se observa que as séries do cimento CPII-Z-32 e CPIV-32 apresentaram amplitudes de variação de potencial similares e menores que a do cimento CPIII-40.

Figura 5 – Evoluções dos potenciais de corrosão das séries com relação a/c=0,7 e cura de 28 dias.

Verifica-se que as séries do cimento CPII-Z-32 e CPIV-32 ingressaram na faixa de valores mais negativos do que -350 mV aos 21 dias de ensaio na fase de umecção, assim como ocorrido para as séries submetidas a um menor período de cura. Todavia, a série do cimento CPIII-40 somente atingiu valores para probabilidade de corrosão maior que 90% após 28 dias de ensaio, ou seja, um ciclo a mais que as outras séries.

Para as séries com relação a/c igual a 0,7 os corpos-de-prova moldados com cimento CPIII-40 apresentaram melhores resultados, uma vez que foram os últimos a apresentar valores indicando alta probabilidade de corrosão (>90%) quando submetidos a 28 dias de cura. As séries dos cimentos CPII-Z-32 e CPIV-32 obtiveram

resultados similares e não apresentaram diferença significativa nos resultados devido ao aumento do período de cura.

Na Figura 6 são apresentados os resultados das séries com relação a/c igual a 0,4 submetidas ao período de 7 dias de cura. Analisando-se o gráfico, nota-se que as séries apresentam diferentes amplitudes de variação de potencial.

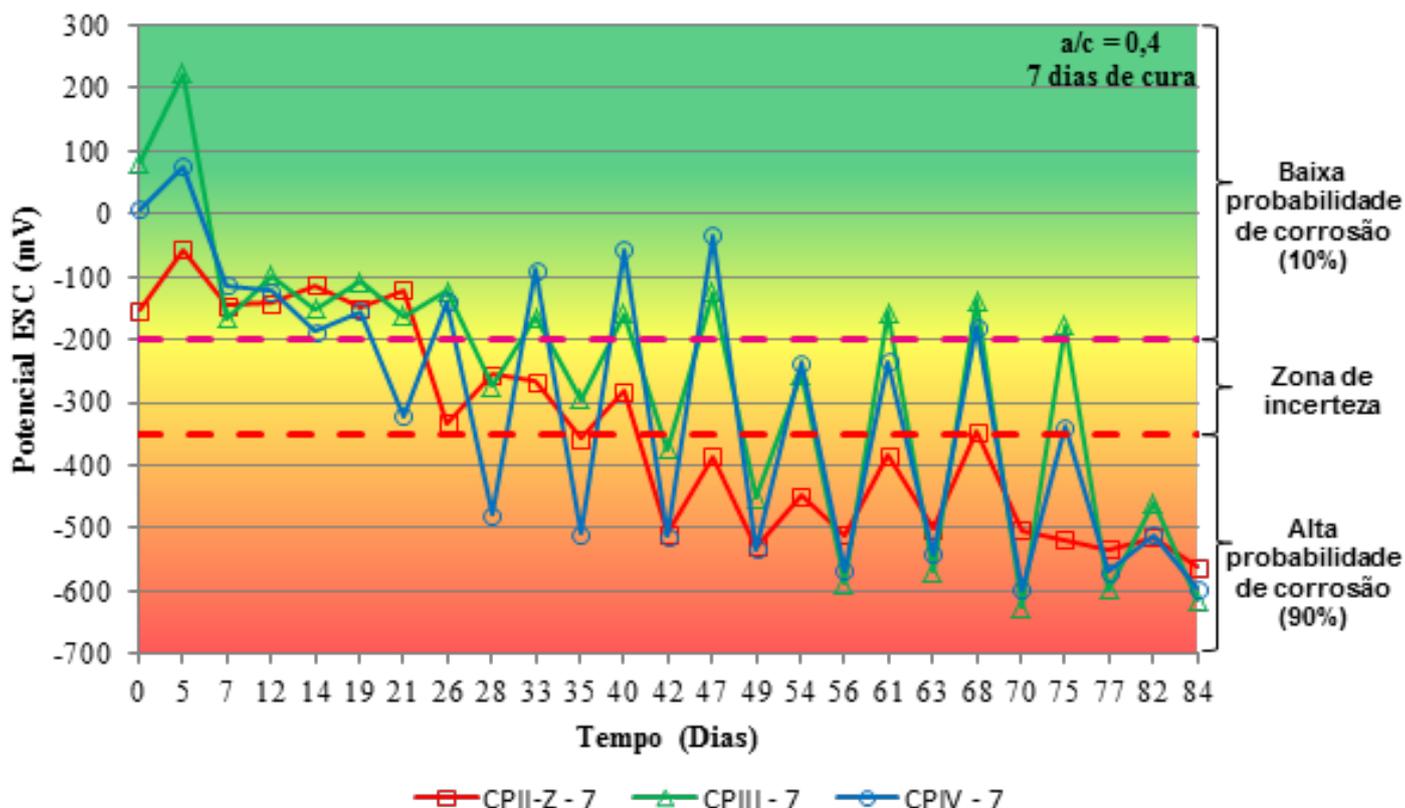


Figura 6 – Evoluções dos potenciais de corrosão das séries com relação a/c=0,4 e cura de 7 dias.

Verifica-se que as séries ingressaram na faixa de valores mais negativos que -350 mV em momentos distintos, sendo a do cimento CPIV-32 a primeira a ingressar aos 28 dias de ensaio, a do cimento CPII-Z-32 a segunda aos 35 dias (1 ciclo após a do CPIV-32) e a do cimento CPIII-40 a última aos 42 dias (2 ciclos após a do CPIV-32).

A Figura 7 apresenta os resultados das séries com relação a/c igual a 0,4 submetidas ao período de 28 dias de cura. De acordo com o gráfico verificam-se amplitudes variáveis para as três séries.

---

Percebe-se claramente o efeito benéfico causado pelo prolongamento do período de cura para as séries com relação a/c 0,4, uma vez que as séries (exceto a do cimento CPIV-32) demoraram mais a apresentar probabilidade de corrosão maior que 90%, o que representa um aumento da resistência à corrosão. A série do cimento CPII-Z-32 adentrou na região de valores mais negativos do que -350 mV após 42 dias de ensaio, ou seja, ao final do 6º ciclo. Já a série do cimento CPIII-40 foi a que apresentou os melhores resultados, tendo em vista que só passou a apresentar probabilidade de corrosão acima de 90% ao final do 8º ciclo (56 dias de ensaio), dois ciclos após a série do cimento CPII-Z-32.

Para as séries com relação a/c igual a 0,4, os corpos-de-prova confeccionados com cimento CPIII-40 também apresentaram os melhores resultados, seguidos das séries dos cimentos CPII-Z-32 e CPIV-32, nesta ordem; confirmando, em geral, os resultados do ensaio de absorção de água.

De forma geral, verificou-se uma melhoria na resistência à corrosão das séries com a redução da relação a/c; isso se deve ao fato de que relação água/ligante é um fator preponderante para a proteção das armaduras de concreto armado, pois alteração nesta variável provoca variações significativas no grau de corrosão apresentado pela estrutura. Além disso, à proporção que se diminui a quantidade de água, maior será a proteção proporcionada à armadura, devido à diminuição do tamanho dos poros e, por conseguinte, maior será a resistência à penetração de fluídos e agentes agressivos (PEREIRA et al., 2010).

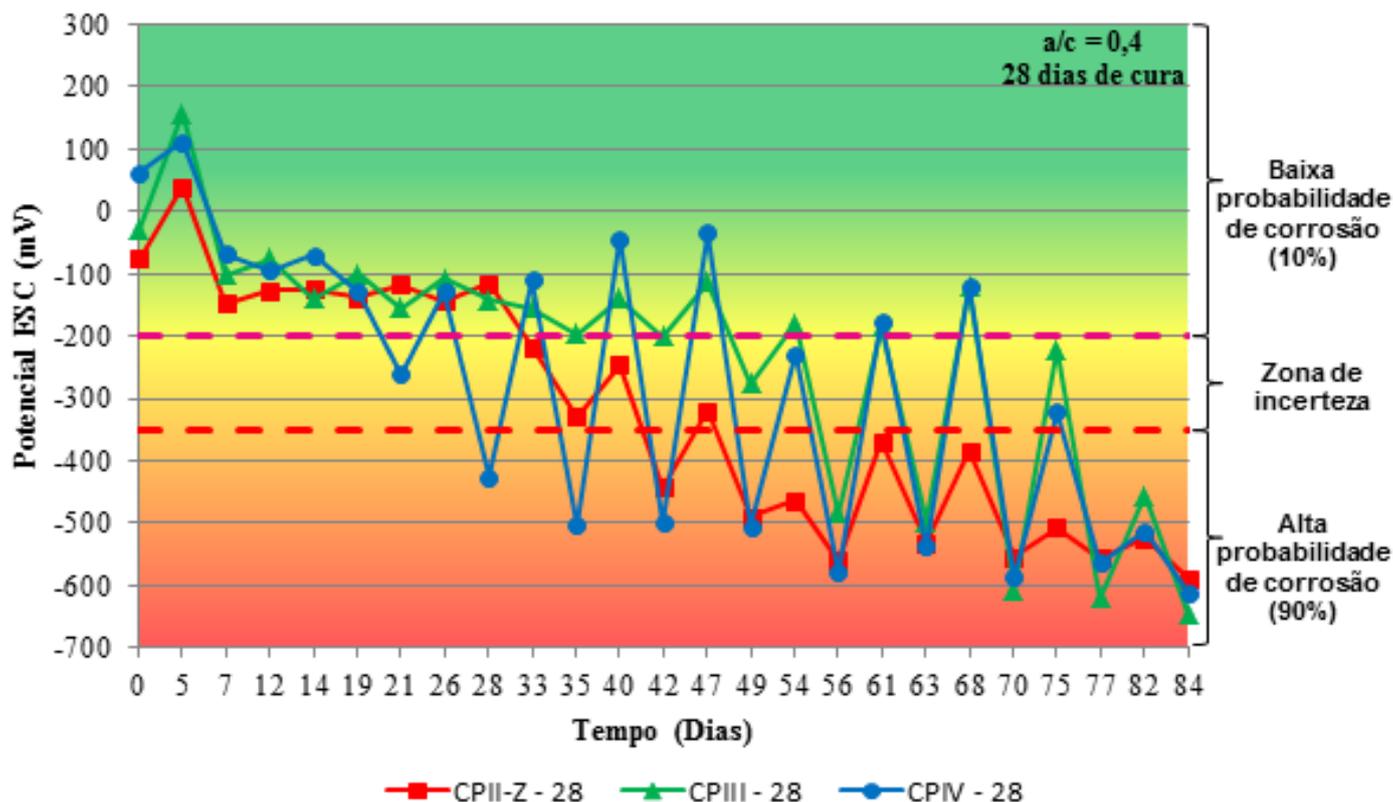


Figura 7 – Evoluções dos potenciais de corrosão das séries com relação a/c=0,4 e cura de 28 dias.

O período de cura teve influência mais significativa nas séries com relação a/c igual a 0,4, uma vez que a resistência à corrosão dos corpos-de-prova foi majorada com a prolongação do período de cura. Quanto melhor for o procedimento de cura adotado, maior será a resistência à corrosão das estruturas de concreto armado, uma vez que a resistividade elétrica do concreto é majorada (GUNEYISI; OZTURAN; GESOGLU, 2004) e a penetração de íons cloretos é reduzida (GASTALDINI et al., 2010).

Os resultados mostram que, para as duas relações a/c estudadas, as séries moldadas com o cimento CP III-40 apresentaram maior resistência à corrosão. Tumidajski e Chan (1996) corroboram tal assertiva, afirmando que concretos que incorporam escória de alto-forno em substituição parcial do cimento Portland são mais eficientes em prevenir o ingresso de íons cloretos do que os concretos com cimentos comuns.

## CONCLUSÕES

Considerando as condições de ensaio na qual a pesquisa foi desenvolvida e o objetivo deste trabalho em estudar a capacidade de proteção de alguns tipos de cimento (CPII-Z-32, CPIII-40 e CPIV-32), quanto à corrosão das armaduras sob a ação de íons cloretos, pode-se concluir que:

- A redução da relação água/cimento melhorou as propriedades das argamassas confeccionadas, para os três tipos de cimento estudados, como também a resistência à corrosão devido à ação de íons cloretos;
- O aumento do período de cura melhora o desempenho dos cimentos, principalmente quando se utiliza uma baixa relação água/cimento;
- Para o ensaio complementar realizado (absorção por capilaridade) as argamassas moldadas com o cimento CPIII-40 apresentaram os melhores resultados;
- O cimento CPIII-40 obteve um melhor desempenho em relação à corrosão por íons cloretos para as duas relações água/cimento estudadas, sobretudo para a relação água/cimento igual a 0,4;
- Para aumentar a durabilidade das estruturas deve-se especificar o cimento a ser utilizado de acordo com as condições ambientais, potencialmente agressivas, em que as estruturas estarão expostas, associando a utilização de uma baixa relação água/cimento e de um período de cura prolongado;
- De acordo com o ensaio de absorção de água por capilaridade e com a técnica eletroquímica de potencial de corrosão aplicada no ensaio de corrosão acelerada, foi possível classificar os três cimentos utilizados em ordem crescente de desempenho, conforme segue: CPIV-32, CPII-Z-32 e CPIII-40.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), o PROCAD/NF e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 876: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete – (1999 reaproved 2009). Annual Book of

ASTM Standard, 2009.

\_\_\_\_\_. ASTM C 1152: Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. – (1997 reaproved 2004). Annual Book of ASTM Standard, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

AYRA, C.; BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B. Factors influencing chloride-binding in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 20, p. 29-300, 1990.

CASCUDO, Oswaldo. Inspeção e diagnóstico da estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. v. 2. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. Cap. 35, p. 1071 - 1108.

DELLINGHAUSEN, L. M.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; VANZIN, F. J. F.; VEIGA, K. K.; ENGEL, M. K. Penetração de cloretos em concretos com diferentes aglomerantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. Anais... Curitiba: IBRACON, 2009.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; SACILOTO, A. P.; MISSAU, F.; HOPPE, T. F. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p.783-793, 2010.

GUNEYISI, Erhan; OZTURAN, Turan; GESOGLU, Mehmet. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, p.449-461, may. 2004.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Introducción. In: HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F. (Ed.). *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto*. São Paulo: CARGRAPHICS, 2007. p. 17 - 32.

HONG, K.; HOOTON, R. D. Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover. *Cement and*

Concrete Research, v. 29, p. 1379-1386, 1999.

HUSNI, R; BENITEZ, A; MANZELLI, A.; MACCHI, C; CHARREAU, G; LUCO, L. F.; GUITELMAN, N. Acciones y mecanismos de deterioro de las estructuras. In: HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F. (Ed.). Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto. São Paulo: CARGRAPHICS, 2007. p. 35 - 90.

JUCÁ, Tatiana Renata Pereira. Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. Construction and Building Materials, v. 20, p. 1476-1484, 2009.

MEHTA, Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, M. V. A. da Silva; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; FERREIRA, R. B. Avaliação das propriedades de transporte massa em concretos contendo adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. Anais... Fortaleza: IBRACON, 2010.

MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos. 1996. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

NEVILLE, A. M. Propriedade do concreto. São Paulo: Pini, 1997, 738 p.

NGUYEN, T. S.; LORENTE, S.; CARCASSES, M. Effect of the environment on the chloride diffusion through CEM-I and CEM-V mortars: An experimental study. Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p.795-803, feb. 2009.

PEREIRA, Eduardo; MENEGHETTI, Leila Cristina; RESENDE, Andréa; FABRO, Gilmar. Avaliação do grau de corrosão das armaduras para diferentes espessuras de revestimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. Anais... Fortaleza: IBRACON, 2010.

PEREIRA, Victor Correia de Oliveira. Estudo da influência do tipo de cimento em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloretos. 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

RASHEEDUZZAFAR; AL-SAADOUN, S. S.; AL-

GAHTANI, A. S.; DAKHIL, F. H. Effect of aluminate content of cement on corrosion of reinforced steel in concrete. Cement and Concrete Research, v. 20, p. 723-738, 1990.

SILVA, Maristela Gomes; SILVA, Vanessa Gomes; TANESI, Jussara. Uma análise crítica sobre a vida útil e a durabilidade na NBR 6118/2003. Concreto & Construção, v. 58, p. 96-101, 2010.

TUMIDAJSKI, P. J.; CHAN, G. W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 4, p.551-556, may. 1996.

WINSLOW, D.; LIU, D. The pore structure of paste in concrete. Cement and Concrete Research, Vol.20, p. 227-235, 1990.