

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Possibilidade de prever a durabilidade de concreto dosado em central com uma célula de quatro eletrodos usando Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.

M. M. Mennucci^a, R. B. P. Bendezu^b, A. P. Alonso^c, E. Polesello^d, D. C. C. dal Molin^e, H. G. de Melo^f, X. R. Nóvoa^g

Abstract

Brazilian standards NBR 7212, NBR 6118 and NBR 15575 stipulate a time limit of 150 minutes for a concrete load to be discharged/applied completely, concrete has strength and durability. As chloride ions is one of the main aggressive agents for concrete reinforcement, its durability is directly linked to the ability of the concrete to resist chloride ions penetration. The aim of this work is to investigate the effect of time elapsed since the production of concrete dosed in central to its application in impedance response (using electrochemical impedance spectroscopy - EIS) on exposed walls by 3.5 years to a chloride-containing environment, assessing both the face directly exposed to the atmosphere and the inside of the wall. For this, a CP-IV cement was used to produce concretes with water / cement ratio = 0.52 with was applied to the wall after different times of application: 0h, 2h and 6h. From the wall, cylindrical samples were removed from two different regions: one directly exposed to a marine environment during 3.5 years (external samples) and the other from an internal region of the same wall, which was not directly exposed to the aggressive environment (internal samples). The results showed that, for the external samples, the EIS response for the 0h concrete was different from those obtained for the 2h and 6h, whereas for the internal samples all the EIS diagrams were similar. It was also revealed that the time it takes the concrete to be released decreases the impedance response.

Keywords: concrete durability, EIS, CPIV, water / cement ratio = 0.52, time to discharge.

Resumo

As normas NBR 7212, NBR6118 e NBR 15575 estabelecem que um concreto dosado em central seja descarregado/aplicado completamente em no máximo 150 min., tenha resistência mecânica e durabilidade. Sendo o cloreto um dos principais agentes agressivos da armadura inserida no concreto de uma estrutura, a durabilidade desta está ligada diretamente à capacidade dos íons cloreto em penetrá-la. O objetivo desse trabalho é investigar o efeito do tempo decorrido desde a produção do concreto dosado em central até a sua aplicação na

^a Pós-doutoranda PMT/EPUSP e NORIE/UFRGS

^b Pós-doutoranda PMT/EPUSP

^c Estudante de engenharia UVIGO

^d Doutorando NORIE/UFRGS

^e Professora Dr^a NORIE/UFRGS

^f Professor Dr. PMT/EPUSP

^g Professor Dr. UVIGO

resposta da impedância (utilizando espectroscopia de impedância eletroquímica - EIS) em paredes expostas por 3,5 anos em ambiente marinho, avaliando tanto a face exposta diretamente à atmosfera como a parte interna da parede. Para tal, utilizou-se o cimento CP-IV para fabricar os concretos com relação água/cimento = 0,52, com diferentes tempos de mistura (0h, 2h e 6h) até o lançamento na fôrma (“parede”). A partir da parede, cilindros foram removidos de duas regiões diferentes: uma diretamente exposta ao ambiente marinho (as amostras externas) e outra da parte interna da mesma parede, que não foi diretamente exposta ao ambiente agressivo (amostras internas). Os resultados indicam que, para as amostras externas, a resposta de EIS para o concreto 0h é diferente daquelas obtidas para 2h e 6h, enquanto que para as amostras internas todos os diagramas de EIS foram semelhantes. Também foi revelado que o tempo de mistura prolongado do concreto diminui a resposta da impedância.

Palavras-chave: durabilidade de concreto dosado central, EIS, CPIV, a/c=0,52, tempos de lançamento.

Introdução

Hoje em dia, grande parte do concreto consumido no Brasil sai de centrais dosadoras, pela praticidade, custo, exigências do mercado por um melhor controle na dosagem, assim como uniformidade e homogeneidade. O resíduo gerado é um dos grandes problemas das centrais dosadoras, por ser agressivo ao meio ambiente. Esse resíduo é proveniente majoritariamente de sobras de concretos não aceitos em obra por estar com tempo de mistura acima do especificado por norma. A NBR 7212 (1), para execução de concreto dosado em central, determina o tempo máximo de transporte da central dosadora até a obra em 90 minutos, e como tempo máximo para o descarregamento completo (aplicação) do concreto – 150 minutos. As reações de hidratação do cimento e a perda de trabalhabilidade durante as primeiras horas (o que dificulta o lançamento e o adensamento do concreto) são os prováveis fatores que limitam o tempo de utilização do concreto (2-3). Quando estas limitações não são respeitadas, o desempenho do concreto ou da estrutura com ele produzida pode ser afetado.

As normas NBR 6118 e 15575 (4-5) estabelecem que estruturas de concreto precisam ter resistência mecânica e durabilidade para alcançar uma longa vida útil. Apesar disso, muitas estruturas apresentam manifestações patológicas, sendo a corrosão das armaduras um dos problemas de maior incidência tanto no Brasil como no exterior (6-13). Dentre os agentes responsáveis pela despassivação da armadura, o cloreto é um dos principais, e sua agressividade está diretamente ligada à capacidade destes íons em difundir pela camada de cobertura de concreto. Daí a importância da qualidade do concreto, que pode ser afetada, entre diversos fatores, pelo tempo de mistura e lançamento do concreto.

Desta forma, o objetivo desse trabalho é investigar o efeito do tempo decorrido desde a produção do concreto dosado em central até a sua aplicação (recém misturado, 2 e 6 horas após o início da mistura) na resposta da impedância (utilizando espectroscopia de impedância eletroquímica - EIS) em paredes expostas por 3,5 anos em ambiente marinho, avaliando tanto a face exposta diretamente à atmosfera como a parte interna da parede .

Metodologia

A metodologia empregada nesse trabalho foi baseada em Polesello (2) e Díaz e colaboradores (6).

Os corpos-de-prova de concreto foram fabricados com cimento Portland pozolânico CP-IV32 e relação água/cimento de 0,52. Toda a metodologia empregada na fabricação do concreto e a caracterização dos materiais está minuciosamente detalhada em Polesello (2). Após fabricação, os concretos foram lançados em fôrmas com tempos diferentes de mistura: 0h, 2h e 6h (Figura 1) (2) e expostos na cidade de Tramandaí-RS, que corresponde a uma atmosfera marinha, de julho de 2011 até dezembro de 2014 (Figura 2).



Figura 1 – Lançamento e vibração do concreto nas fôrmas para fabricação dos blocos da “parede”.



Figura 2 – Blocos formando as “paredes” expostas em Tramandaí-RS.

Após exposição durante 3,5 anos ao ambiente marinho da cidade de Tramandaí-RS, foram retirados corpos-de-prova das paredes (dezembro de 2014) com broca extratora Hilti, para analisar e comparar o comportamento, através da utilização de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), da parte interna da parede (não diretamente exposta à atmosfera marinha) e da parte externa, exposta diretamente ao ambiente marinho. Foram extraídas amostras feitas de concretos lançados após 0h, 2h e 6h do início da mistura no caminhão betoneira (Figura 3).



Figura 3 –Extração dos cilindros das “paredes” de concreto expostas em Tramandaí-RS.

Dos cilindros retirados das paredes foram feitas fatias de 2 cm, que foram enviadas para a Universidade de Vigo, onde os ensaios eletroquímicos foram realizados conforme Díaz e colaboradores (6).

O eletrólito foi 1 mol/L NaCl e o volume de cada compartimento da célula 200 cm³. Quatro anéis de vedação definem 20 cm² de área molhada, dois entre as folhas de grafite e o eletrólito (no final da célula) e entre os dois lados da “membrana” de concreto e o eletrólito (6). As medidas de impedância usando dois eletrodos (ECS) entre as folhas de grafite foram feitas empregando um analisador de frequência HP 4194A. As medidas foram obtidas de 40MHz a 100 Hz.

As fatias de concreto foram saturadas com 1 mol/L NaCl, vácuo de 30 minutos (Figura 4), antes de serem colocadas na célula de quatro eletrodos.

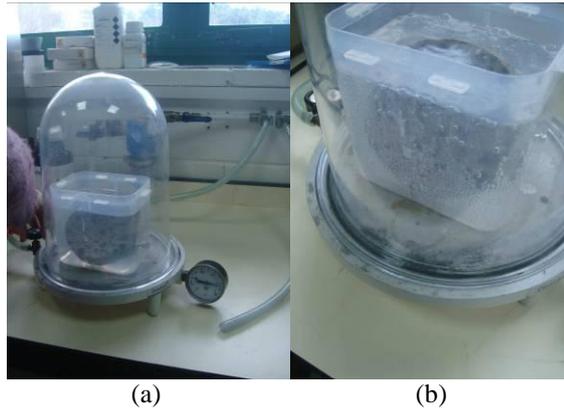


Figura 4 – (a) e (b) Retirada do ar e saturação com 1 mol/L NaCl dos poros do concreto por vácuo.

A Figura 5 apresenta a montagem da célula, o corte das folhas de grafite e a fatia de concreto colocada no meio da célula como uma membrana. A Figura 6 mostra a célula montada (6).

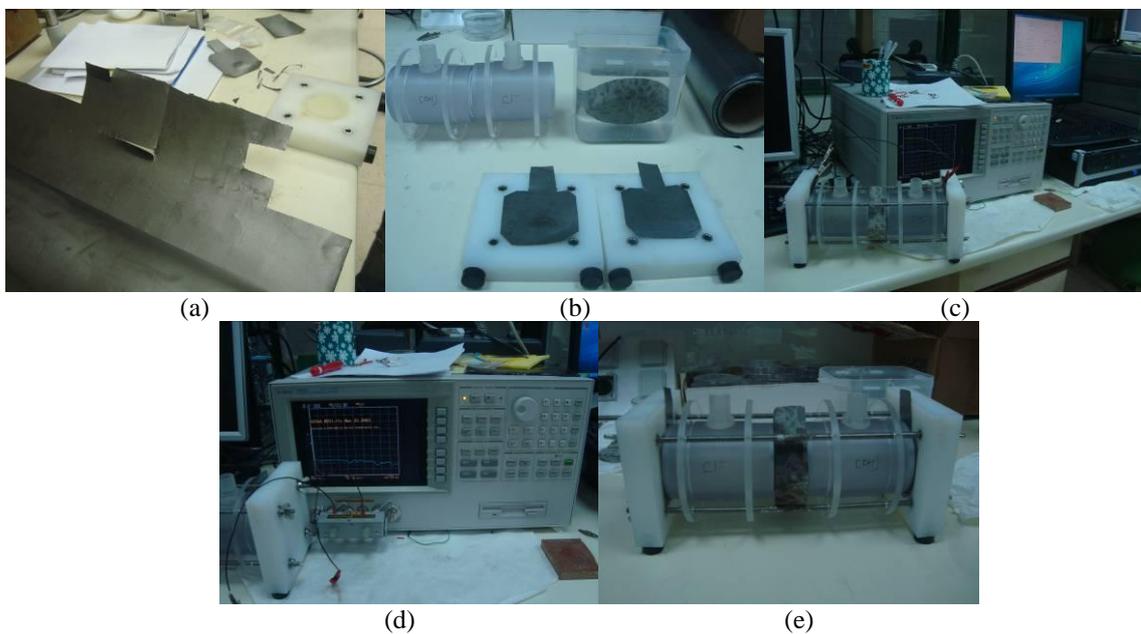


Figura 5 –Preparação da célula de 4 eletrodos conforme (14); (a) corte das folhas de grafite; (b) folhas de grafite posicionadas na célula; (c) fatias de concreto de 2 cm (como membrana) com os anéis de vedação dos dois lados da célula, definindo 20 cm² de área molhada de concreto; (d) aquisição dos dados de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e (e) vista da célula montada sem os eletrodos ECS.

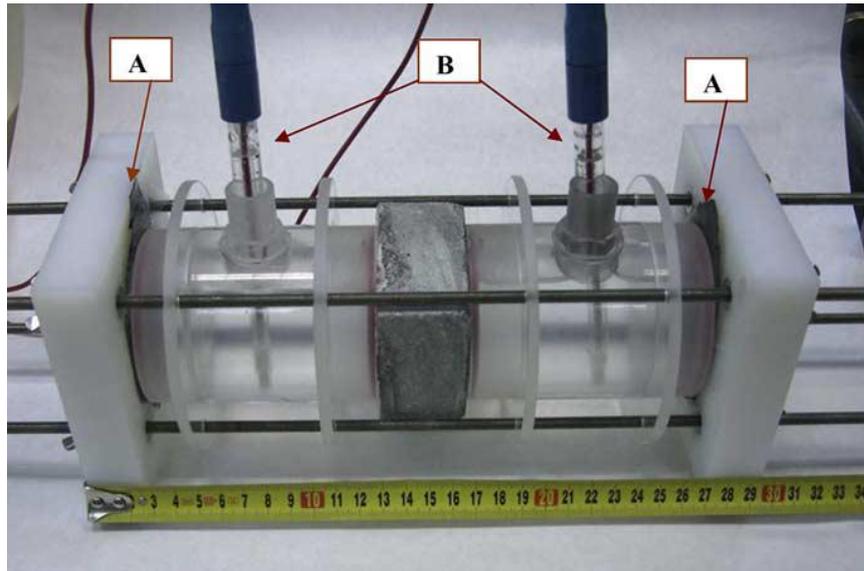


Figura 6 – Célula de DÍAZ e colaboradores (14), onde A são as folhas de grafite onde é aplicado o campo elétrico (DC e/ou AC); B os eletrodos de referência (SCE); e no meio da célula a fatia da amostra desse trabalho com 2 cm de espessura e 20 cm² de área molhada, delimitada pelos anéis de vedação.

Resultados e discussão

No trabalho de Polesello (2) fica claro que não existe diferença significativa entre a resistência dos concretos produzidos com CPIV e lançados com tempos de mistura diferentes (Figura 7), desde que a trabalhabilidade dos mesmos seja corrigida com aditivo superplastificante antes da colocação nas fôrmas.

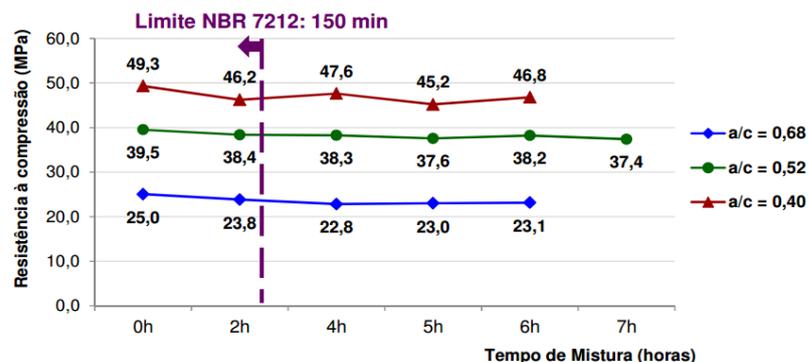


Figura 7 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias do concreto com CP IV produzido na central de concreto e lançado em diferentes tempos de mistura (2).

Os resultados dos experimentos feitos na célula de quatro eletrodos são qualitativos, a intenção é a comparação entre as amostras de concreto produzidas com diferentes tempos de mistura, e da parte interna e externa (exposta diretamente ao ambiente) das amostras. Assim sendo, os resultados de impedância são apresentados em Ohm, pois todas as áreas delimitadas pela célula são iguais. Para fatias de 2 cm também seria necessário usar um fator de correção da resistência de 0,7. Entretanto, como todas as amostras têm 2 cm, o fator de correção não foi utilizado.

A Figura 8 apresenta os diagramas de Nyquist e de Bode para a face exposta diretamente ao meio ambiente. Relembra-se que todas as amostras foram feitas com cimento Portland IV e com relação água/cimento= 0,52, a diferença é o tempo de lançamento (0h, 2h e 6h).

O diagrama de Nyquist para a amostra de 0h apresenta comportamento diferente dos demais tempos de lançamento, enquanto os diagramas de 2h e 6h apresentam respostas semelhantes. Para 0h, duas constantes de tempo bem definidas são observadas, enquanto para 2h e 6h apenas um arco capacitivo fica bem definido. Entretanto, para estas duas últimas condições, na região de baixas frequências, aparentemente, uma segunda constante de tempo tem início, indicando que se uma faixa de frequências mais ampla tivesse sido empregada, uma segunda constante de tempo poderia ter sido definida.

A figura 8 mostra também que a impedância é maior quando o tempo de lançamento é menor, o que indica que, para a face exposta ao ambiente, quanto menor o tempo de lançamento, mais resistente à penetração será o material, o que fica mais claro na Tabela 1. A ordem de grandeza da impedância na frequência de 100Hz das amostras com tempo 0h é em torno de 2,15 vezes daquela com 6h. Porém a relação pode não ser tão direta assim, se o primeiro arco capacitivo para a amostra 0h tiver origem no mesmo fenômeno que os arcos capacitivos das outras amostras, o que poderia significar que o fenômeno para 0h estaria mais acelerado. Daí a melhor análise da Figura 8 seria que, para a amostra produzida com 0h, ocorre uma aceleração do fenômeno difusional. Assim, para esta amostra, o arco capacitivo em altas frequências é definido em uma frequência mais elevada em relação às demais, indicando cinética mais rápida para o processo. Por sua vez, para as outras duas amostras verifica-se que o aumento do tempo de 2h para 6h provoca uma diminuição da impedância. A Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores de impedância no fechamento do arco capacitivo.

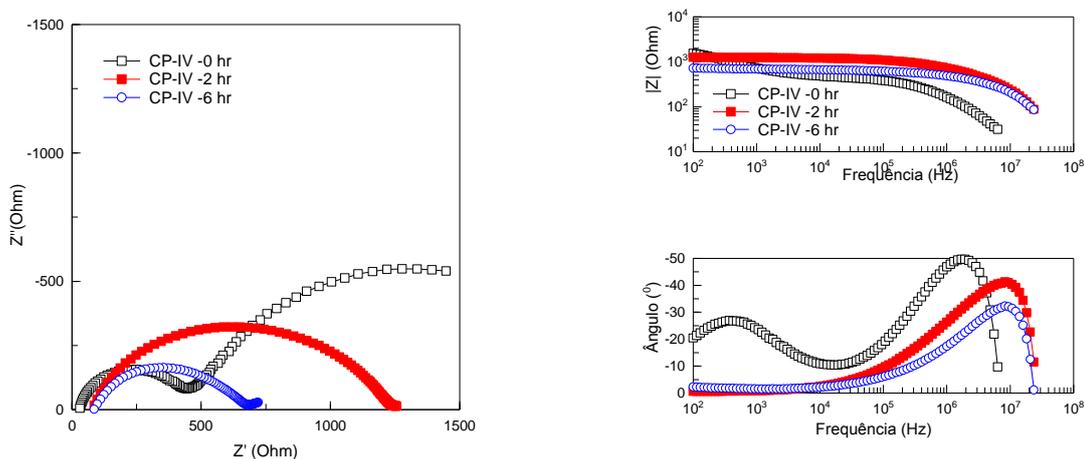


Figura 8 - Diagramas de impedância em solução de 1 mol/L NaCl na célula com 4 eletrodos (dois de referência e duas folhas de grafite (6)) para os diferentes tempos de lançamentos dos concretos com a/c=0,52: CP IV_0 h, CP IV_2 h e CP IV_6 h. Face do concreto diretamente exposta ao ambiente.

Tabela 1 – Valores de impedância na frequência 100 Hz para as amostras da Figura 8 (face externa do concreto).

Amostra	Z em 100Hz
0 h	1544 Ω
2 h	1256 Ω
6 h	720 Ω

Tabela 2 – Valores de impedância no fechamento do arco capacitivo das amostras da Figura 8.

Amostra	Z (Ω)	Frequência (Hz)
0 h	458	16959
2 h	1224	3064
6 h	678	3064

A Figura 9 apresenta os diagramas de Nyquist e de Bode para a face interna do cilindro de concreto (não diretamente exposta à atmosfera marinha). Os resultados mostram que não há diferenças no mecanismo e que a ordem de grandeza da impedância das amostras com tempo 0h é em torno de 1,5 vezes da com 6h (Tabela 3). A aceleração do processo verificada na parte diretamente exposta ao ambiente não foi constatada na parte mais interna das amostras.

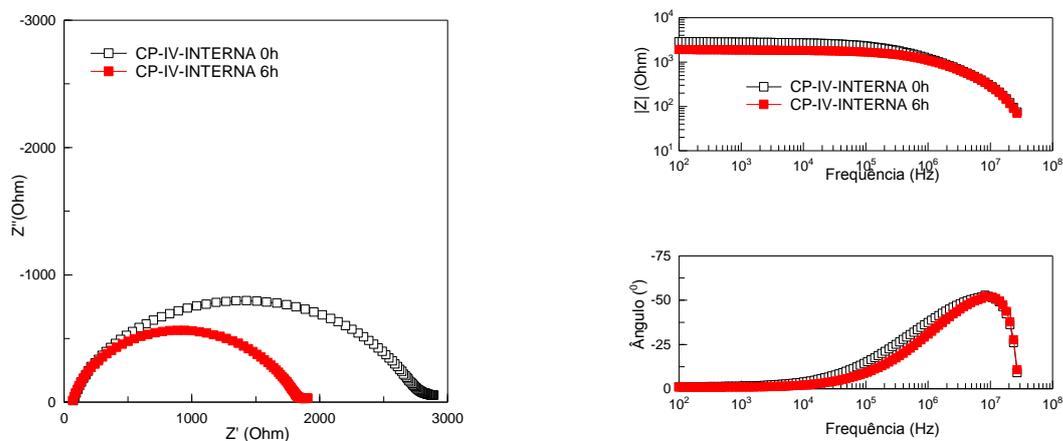


Figura 9 – Diagramas de impedância em solução de 1 mol/L NaCl na célula com 4 eletrodos (dois de referência e duas folhas de grafite (6)) para os diferentes tempos de lançamentos dos concretos com $a/c=0,52$: CP IV_0 h, e CP IV_6 h. Face do concreto interna exposta ao ambiente.

Tabela 3 – Valores de impedância na frequência 100 Hz para as amostras da Figura 9 (face interna do concreto).

Amostra	Z em 100Hz
0 h	2893 Ω
6 h	1907 Ω

A grande diferença entre a parte interna e a externa (diretamente exposta ao ambiente) dos cilindros de concreto está relacionada à quantidade de cloreto que penetrou nos poros durante os 3,5 anos de exposição, bem como quanto de água o concreto perdeu (já “secou”, na Figura 3 a amostra está seca na parte externa e “molhada” na parte interna). Para comparar o efeito do local de exposição na mesma condição de produção das amostras, as Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, a comparação entre os diagramas de impedância das partes externa e interna para os tempos de lançamento de 0 h e de 6 h. A Tabela 4 sumariza a comparação entre os valores de impedância na frequência 100 Hz dos diagramas destas Figuras, já a Tabela 5 apresenta a comparação entre os valores de impedância no fechamento dos arcos capacitivos das Figuras 10 e 11.

Na Figura 10 a face interna tem um comportamento diferente daquele exibido pela parte externa. O arco capacitivo altas frequências possui diâmetro muito maior, e o fenômeno em baixas frequências não se define para a faixa de frequências investigada. Como esperado, a parte interna apresenta impedância maior. Na parte interna houve uma menor penetração de cloreto durante o tempo de exposição em ambiente marinho. O cloreto presente penetrou durante a saturação a vácuo realizada em solução de 1 mol/L de NaCl.

Na Figura 11, para as amostras com 6h, a face interna e a externa têm comportamentos semelhantes, e que corresponde ao apresentado na face interna com o tempo de 0h. A diferença entre os valores da impedância das amostras a 100 Hz é em torno de 2,65 vezes. Novamente, como esperado, a parte interna apresenta impedância maior.

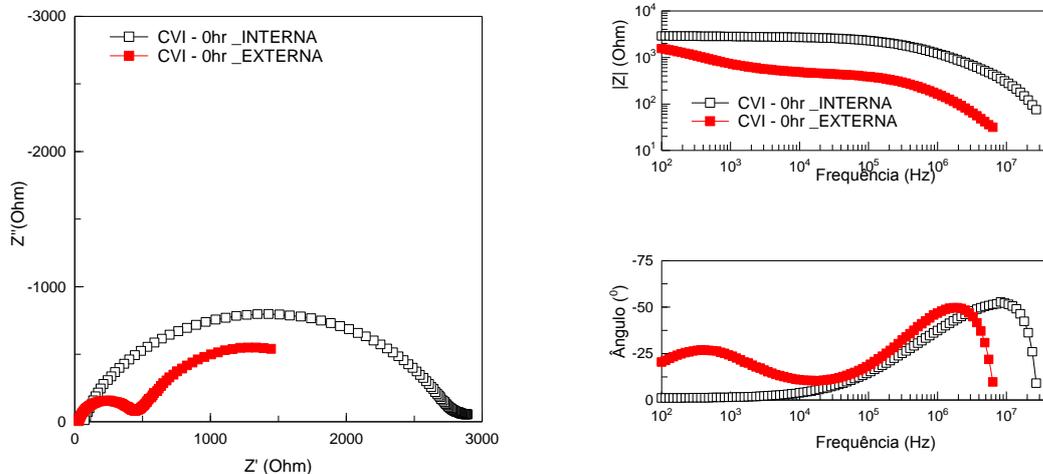


Figura 10 – Diagramas de impedância em solução de 1 mol/L NaCl na célula com 4 eletrodos (dois de referência e duas folhas de grafite (6)) para as diferentes faces da amostra de concreto com $a/c=0,52$: CP IV_0 h interna, e CP IV_0 h externa.

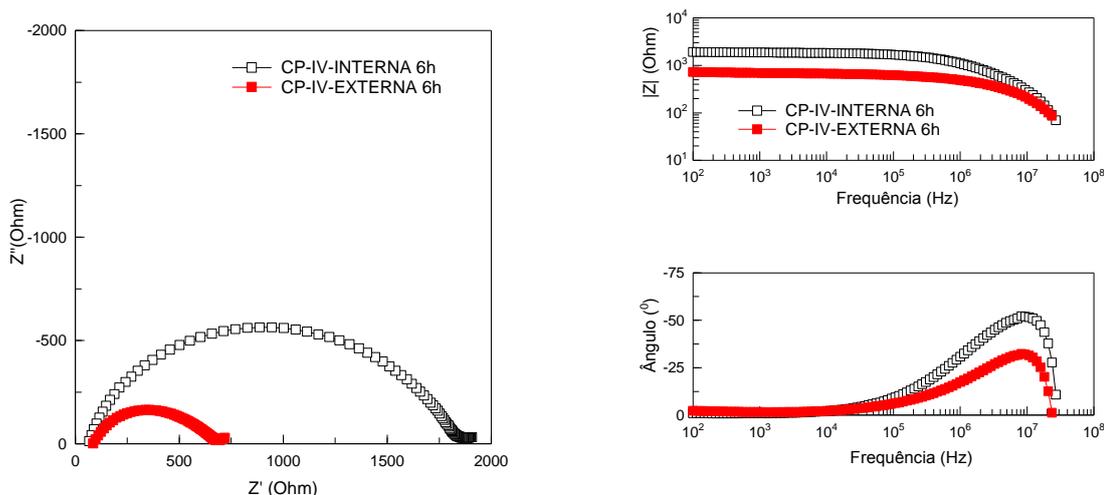


Figura 11 – Diagramas de impedância em solução de 1 mol/L NaCl na célula com 4 eletrodos (dois de referência e duas folhas de grafite (6)) para as diferentes faces da amostra do concreto com $a/c=0,52$: CP IV_6 h interna, e CP IV_6 h externa.

Tabela 4 – Valores de impedância na frequência 100 Hz para as amostras das Figuras 10 e 11.

Amostra	$ Z $ em 100Hz
0 h interna	2893 Ω
0 h externa	1544 Ω
6 h interna	1907 Ω
6 h externa	720 Ω

Tabela 5 – Valores de impedância no fechamento do arco capacitivo das amostras das Figuras 10 e 11.

Amostra	$ Z $ (Ω)	Frequência (Hz)
0 h interna	2765	3064
0 h externa	458	16959
6 h interna	1836	3064
6h externa	678	3064

Conclusões

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que apesar da resistência à compressão de concretos produzidos com CPIV e relação água/cimento de 0,52 não sofrer redução mesmo quando lançados após 6 horas do início da mistura (desde que mantida a trabalhabilidade com o uso de aditivo superplastificante), observa-se que quanto maior o tempo decorrido para lançar o concreto, menor o valor de impedância.

Os resultados indicaram ainda que os corpos-de-prova com face exposta diretamente ao ambiente (externa) apresentam valor de impedância menor comparados com aqueles apresentados pelos corpos-de-prova com face interna, o que era esperado, já que a parte interna apresenta uma menor penetração de cloretos do ambiente marinho.

Apenas a amostra com 0 h com face externa (exposta diretamente à atmosfera marinha) apresentou mecanismo diferente, para todas as outras amostras os diagramas de impedância apresentaram o mesmo formato. Quanto maior o tempo para lançar o concreto menor o valor de impedância, o que poderia significar uma menor durabilidade, mas como discutido a relação pode não ser tão direta assim.

Mais estudos precisam ser feitos para elucidar se a armadura que fica na parte interna do concreto e sua durabilidade são afetadas por essas diferenças.

Referências bibliográficas

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7212 – execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- (2) POLESELLO, E. **Avaliação da resistência à compressão e da absorção de água de concretos utilizados após o tempo máximo de mistura e transporte especificado pela NBR7212**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. (<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/62046>).
- (3) POLESELLO, E. et al. O limite de tempo especificado pela NBR 7212, para mistura e transporte do concreto, pode ser ultrapassado? **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. v. 6 n.2 (Abril 2013) p. 339-359.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15575 – Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- (6) MEHTA, P.K. Durability of Concrete - Fifty Years of Progress? In: Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, 1993. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: NORIE/PPGEC/UFRGS, 1993. p.33
- (7) STEWART, M.G.; ROSOWSKY, D.V. Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks. *Structural Safety*, n. 20, p. 91-109, 1998.
- (8) CARMONA, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da Patologia no Brasil: Estudo Estatístico. In: Trabajos Apresentados en la Jornada Español e Potuques sobre Estructuras y Materiales, 1988. Madrid. Anais. Madrid: CEDEX/ICcET. p.99-124.
- (9) DAL MOLIN, D.C.C. Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. 1988. 220p.
- (10) ARANHA, P.M.S. Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica. 1994. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- (11) ANDRADE, J.J.O. Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão da Armadura: Iniciação por Cloretos. 2001. 278p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- (12) HELENE, P.R.L. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. 1993. 271p. Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- (13) NINCE, A.A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. 1996. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

(14) DÍAZ, B.; NÓVOA X.R., PÉREZ M.C. Study of the chloride diffusion in mortar: a new method of determining diffusion coefficients based on impedance measurements. **Cement & Concrete Composites**. 28 (2006) 237-245.