

VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COM O FORMATO DE CORPOS DE PROVA PARA DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO

Ronaldo A. Medeiros-Junior (ITA) ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br
Maryangela G Lima (ITA) magdlima@gmail.com

Resumo: O monitoramento das características do concreto após a sua exposição ao ambiente natural é muito importante para assegurar a vida útil das estruturas de concreto armado. A resistividade elétrica é um parâmetro relacionado com a permeabilidade do concreto, e conseqüentemente, com a resistência do mesmo a penetração de agentes agressivos, tais como: CO₂ e cloretos. A resistividade elétrica de uma estrutura de concreto pode ser monitorada no tempo por meio de um ensaio não destrutivo. Essa técnica apresenta um custo atrativo e é de fácil execução. Entretanto, alguns parâmetros desse ensaio ainda necessitam de maior discussão para facilitar a padronização desta técnica. Este estudo examinou a influência do fator forma na resistividade elétrica do concreto. Para isso, corpos de prova cilíndricos e cúbicos foram moldados. Quatro tipos de concreto foram usados e a resistividade elétrica foi monitorada por um período de 60 dias. Os resultados de resistividade elétrica para as amostras cilíndricas foram superiores a 100% dos resultados para as amostras cúbicas. Também foi observada uma boa correlação entre os resultados com R² igual a 0,98.

Palavras-chave: Resistividade elétrica, vida útil, ensaio não destrutivo, fator forma.

VARIATION OF CONCRETE ELECTRICAL RESISTIVITY WITH SPECIMENS SHAPE FOR DIFFERENT TYPES OF CEMENT

Abstract: The monitoring of concrete parameters is very important to ensure the service life of concrete structures. The electrical resistivity is a parameter related to the concrete permeability, and therefore, the resistance to the penetration of aggressive agents such as CO₂ and chloride. The electrical resistivity can be monitored over time by a non-destructive testing. This technique presents an attractive cost and is easy to perform. However some parameters of this test are not well defined in literature, making it difficult to standardize the technique. This study examined the influence of the shape factor on the electrical resistivity of the concrete. To this, cylindrical and prismatic specimens were molded. Four types of concrete were used and the electrical resistivity was monitored over a period of 60 days. Electrical resistivity values from the cylindrical samples were over 100% higher than the prismatic samples. It was also found a good correlation between the values with R² equal to 0.98.

Keywords: Electrical resistivity, Service life, Non-destructive test, Shape factor.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto vem se tornando uma preocupação progressiva na construção civil principalmente devido ao intenso uso de materiais não renováveis. A tecnologia do concreto mostrou importantes avanços com o passar do tempo, entretanto, ainda é comum encontrar alto número de construções com patologias (Medeiros-Junior et al, 2014a).

Entender os mecanismos de degradação das estruturas de concreto é extremamente importante para uma recuperação mais racional. Dessa forma, se espera minimizar perdas e falhas que podem surgir devido a interpretações distorcidas.

A resistividade elétrica do concreto pode ser considerada como um parâmetro promissor para modelar a vida útil de estruturas de concreto. Esse parâmetro é bastante útil devido à praticidade de execução da técnica. Devido à sua natureza não destrutiva, a reprodução contínua do ensaio de resistividade elétrica é favorecida para controle da qualidade do concreto sem afetar a integridade física da estrutura.

O ensaio de resistividade elétrica do concreto tem um baixo custo e é de fácil implementação (Andrade e D'Andréa, 2010). Diversos autores (Alonso et al, 1988; Gulikers, 2005; Ghods et al, 2007; Medeiros-Junior et al, 2014b) consideram esse parâmetro como um fator de grande importância para indicar a velocidade de corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado.

A resistividade elétrica pode ser expressa em ($k\Omega.cm$); trata-se da propriedade que reflete a habilidade do material em carregar cargas elétricas no interior do concreto. Dessa forma, esse parâmetro também é definido como o inverso da condutividade do material (Halliday e Resnick, 1994).

O uso de dados a partir de ensaios não destrutivos é recomendado entre novos modelos disponíveis na literatura para prever a vida útil de estruturas de concreto (Andrade, 2004). Sabe-se que a resistividade é relacionada com a permeabilidade do concreto. Portanto, também é relacionada com a resistência do material a penetração de agentes agressivos - por exemplo, dióxido de carbono e cloretos (Medeiros-Junior et al, 2014c).

No entanto, alguns parâmetros deste ensaio ainda carecem de discussão na literatura, o que torna difícil a padronização do método. Sendo assim, o objetivo deste artigo é investigar a influência do formato e dimensão de corpos de prova nas medidas de resistividade elétrica do concreto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova cilíndricos e cúbicos foram utilizados no ensaio de resistividade elétrica. As amostras cilíndricas tiveram dimensão de 100 x 200 mm (diâmetro x altura). Já as amostras cúbicas, arestas de 250 mm (Figura 1).

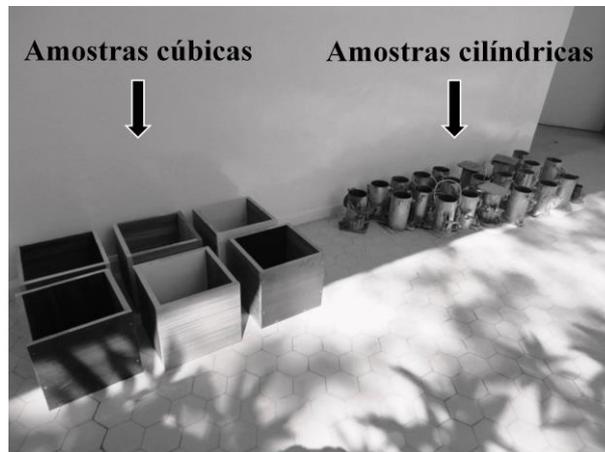


Figura 1 – Corpos de prova cilíndricos e cúbicos.

Os materiais e as proporções utilizadas (traço e a/c) são apresentadas na Tabela 1. De acordo com a Tabela 1, quatro tipos de amostras de concreto foram moldadas (A1, A2, A3, A4). A principal diferença entre elas é o tipo de cimento. Todas as outras proporções foram mantidas constantes entre as dosagens investigadas, incluindo a relação a/c. Não foram utilizados aditivos químicos nas amostras.

Tabela 1 – Tipos de amostras de concreto investigadas – traço em massa.

Código da amostra	Tipo de cimento	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c
A1	CP II-F	1	1,4	2,1	0,5
A2	CP III RS	1	1,4	2,1	0,5
A3	CP IV	1	1,4	2,1	0,5
A4	CP V	1	1,4	2,1	0,5

Os quatro tipos de cimentos utilizados são comercialmente disponíveis no Brasil. Esses cimentos apresentam diferentes composições químicas devido a presença ou não de adições minerais. As seguintes Normas Brasileiras (NBR) governam a caracterização desses cimentos:

- a) CP II-F: Cimento Portland composto com fíler calcário (NBR 11578, 1991);
- b) CP III RS: Cimento Portland de alto forno (NBR 5735, 1991) e resistente a sulfatos (NBR 5737, 1992);
- c) CP IV: Cimento Portland pozolânico (NBR 5736, 1991);
- d) CP V: Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733, 1991).

As Tabelas 2 e 3 mostram os limites definidos pela normalização brasileira para as propriedades químicas e mecânicas dos cimentos utilizados.

Tabela 2 – Propriedades químicas (% em massa).

Propriedades	CP II-F	CP III RS	CP IV	CP V
Clinker + sulfato de cálcio	94-90	40-25	85-45	100-95
Escória de alto forno	-	60-70	-	-
Pozolanas	-	-	15-50	-
Material Carbonático	6-10	0-5	0-5	0-5

Tabela 3 – Propriedades mecânicas.

Propriedades	CP II-F	CP III RS	CP IV	CP V
Resíduo na peneira 75µm	≤ 12,0 %	≤ 8,0 %	≤ 8,0 %	≤ 6,0 %
Resistência à compressão – 3 dias	≥ 10,0 MPa	≥ 12,0 MPa	≥ 10,0 MPa	≥ 24,0 MPa
Resistência à compressão – 7 dias	≥ 20,0 MPa	≥ 23,0 MPa	≥ 20,0 MPa	≥ 34,0 MPa
Resistência à compressão – 28 dias	≥ 32,0 MPa	≥ 40,0 MPa	≥ 32,0 MPa	-

As amostras foram desmoldadas após 24 h da moldagem e foram curadas durante 28 dias em uma câmara úmida (umidade relativa > 95%). Após esse período, os primeiros ensaios de resistividade elétrica foram conduzidos. Posteriormente, as amostras permaneceram em ambiente de laboratório até completarem 60 dias para novas medidas de resistividade elétrica.

Um equipamento comercial foi utilizado para o ensaio de resistividade elétrica. A calibração do equipamento foi sempre verificada antes da realização dos ensaios, conforme recomendação do fornecedor.

O método dos quatro pontos (também conhecido como método de Wenner) foi empregado no ensaio de resistividade. Essa é a técnica mais conhecida e utilizada para ensaios de resistividade elétrica superficial do concreto (Medeiros-Junior, 2014).

Finalmente, os resultados de resistividade elétrica obtidos para as amostras com formatos cilíndricos e cúbicos foram comparados entre si. Dessa forma, as diferenças e correlações entre os resultados foram observadas e discutidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica para ambas as amostras (cilíndricas e cúbicas) são apresentados na Figura 2.

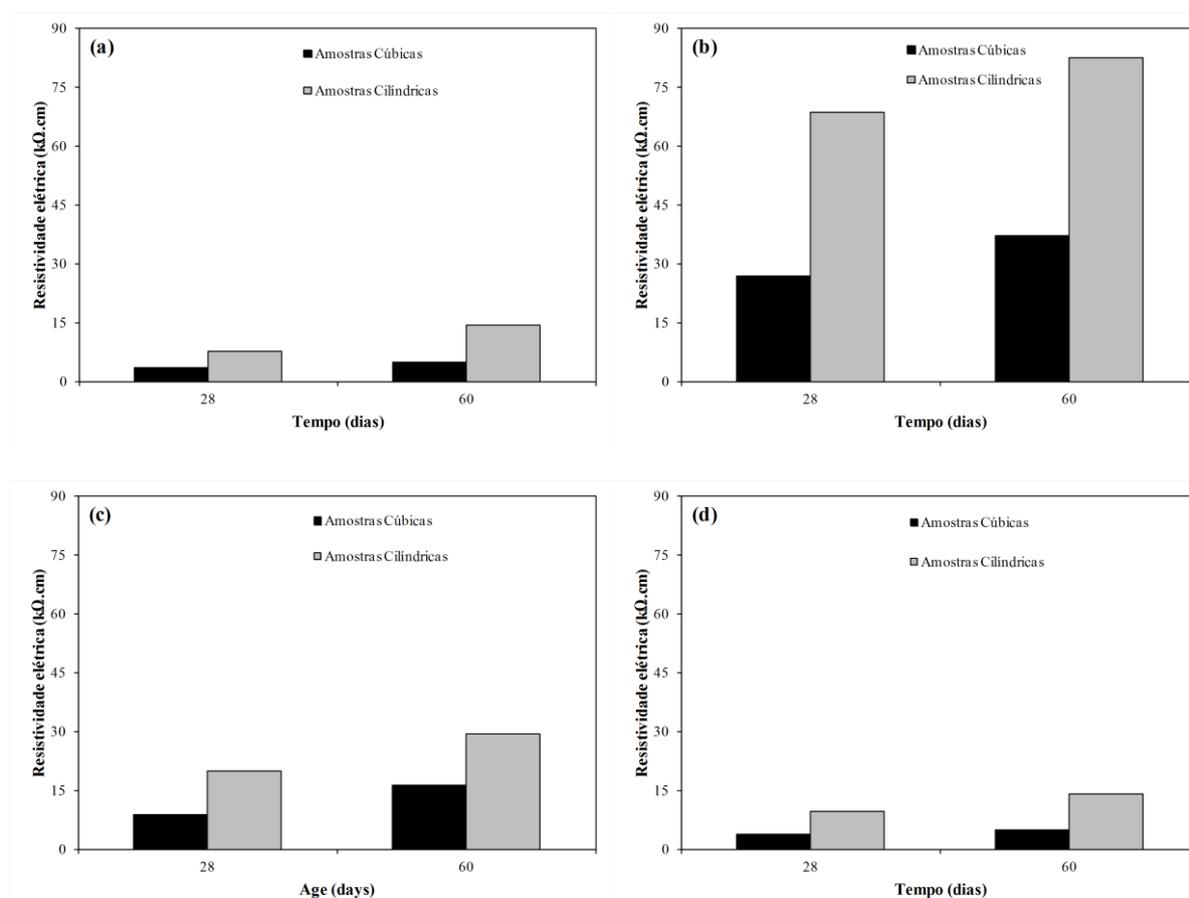


Figura 2 – Resultados da resistividade elétrica das amostras: a) A1; b) A2; c) A3; e d) A4..

De acordo com a Figura 2, o formato dos corpos de prova influenciaram as medidas de resistividade. A resistividade elétrica das amostras cilíndricas (100 mm diâmetro por 200 mm altura) são maiores que as amostras cúbicas (arestas de 250 mm).

A variação percentual da resistividade elétrica para as amostras cilíndricas e cúbicas são aproximadamente 124% para o concreto tipo A1 aos 28 dias. Para os concretos tipos A2, A3 e A4, esse valor foi de 154%, 127% e 153%, respectivamente.

Quando considerado os ensaios realizados aos 60 dias, a variação percentual da resistividade elétrica foi de aproximadamente 202%, 121%, 81% e 186%, para as amostras tipos A1, A2, A3 e A4, respectivamente.

De acordo com a Figura 2b, a amostra A2 mostrou maiores valores de resistividade elétrica, seguida pela amostra A3 (Figura 2c). Essas amostras contém cimentos com adições.

O cimento utilizado na amostras A2 tem cerca de 65% de escória de alto forno. O cimento usado na amostras A3, cerca de 35% de pozolana. Essas adições contribuíram para elevar a resistividade elétrica do concreto. Sabe-se que as escórias e as pozolanas refinam os poros do concreto e reduzem a permeabilidade das amostras (Medeiros-Junior et al, 2014b). Esse efeito ocasionou na redução da condutividade do concreto. Portanto, os cimentos com adições reduzem a mobilidade dos íons dentro da microestrutura do concreto.

De acordo com a Figura 2, a resistividade elétrica cresce com o tempo de ensaio. Nas idades iniciais, o concreto apresenta menores valores de resistividade elétrica. Contudo, esse parâmetro tende a evoluir com o tempo devido a progressiva hidratação dos compósitos cimentícios. Outros estudos também encontraram resultados similares (Baweja et al, 1997; Andrade e D'Andrea, 2011; Medeiros-Junior, 2014).

A resistividade elétrica aos 60 dias da amostra A1 (formato cúbico) é 40% maior que a resistividade aos 28 dias. Esse crescimento é de 90% para a mesma amostra, porém considerando o formato cilíndrico dos corpos de prova.

As Figuras 3 e 4 revela o crescimento percentual da resistividade elétrica das amostras cúbicas e cilíndricas, respectivamente, com o tempo.

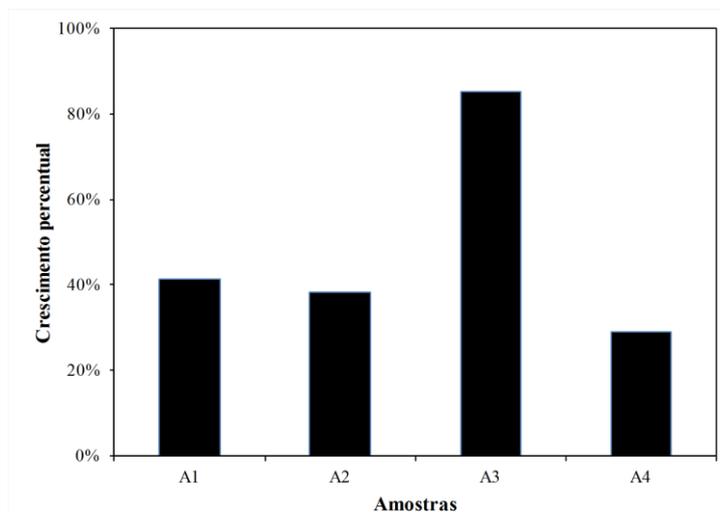


Figura 3 – Crescimento percentual da resistividade elétrica nas amostras cúbicas.

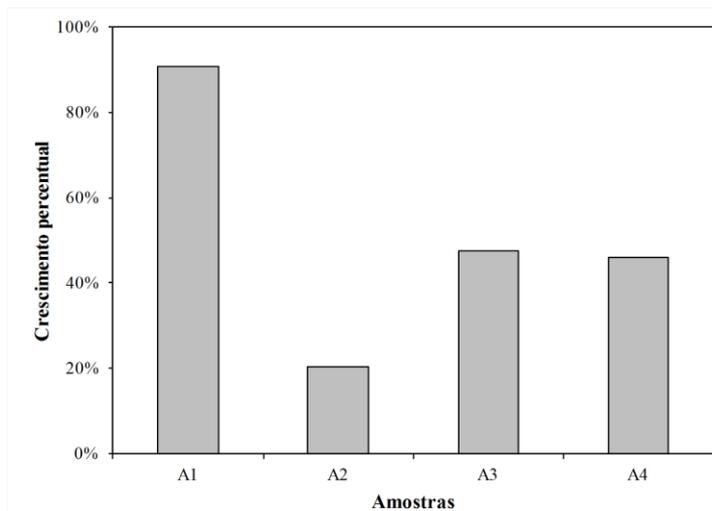


Figura 4 – Crescimento percentual da resistividade elétrica nas amostras cilíndricas.

De acordo com a Figura 3, considerando as amostras cúbicas, o crescimento da resistividade elétrica parece ser mais significativo para a amostra A3. Já para as amostras cilíndricas, esse comportamento foi identificado para a amostra A1. Em ambos, o percentual de crescimento foi de aproximadamente 90%.

A correlação entre os diferentes formatos dos corpos de prova foi determinada. O resultado está apresentado na Figura 5.

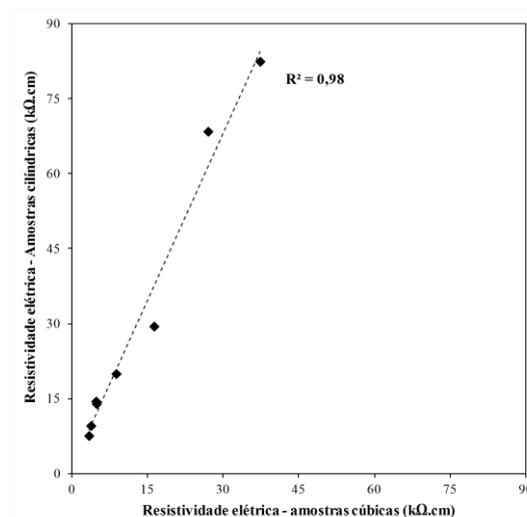


Figura 5 – Correlação entre as resistividades elétricas – fator forma.

Uma boa correlação foi encontrada entre os valores de resistividade elétrica dos corpos de prova com diferentes formatos e dimensões. De acordo com a Figura 5, R^2 igual a 0,98 foi determinado. Os resultados dos ensaios providenciaram a Equação 1, que correlaciona esses valores. No entanto, ressalta-se que essa equação requer uma aplicação prática para sua validação. A princípio, a equação deve ser aplicada com cautela, apenas para os tipos de concreto analisados neste artigo e para idade máxima de 60 dias.

$$\rho_c = 2,24\rho_p + 1,07 \tag{Eq. (1)}$$

Onde: ρ_c = resistividade elétrica (k Ω .cm) para corpos de prova com formato cilíndrico e dimensão: 100 x 200 mm (diâmetro x altura); ρ_p = resistividade elétrica (k Ω .cm) para corpos de prova com formato cúbico, com 250 mm de aresta.

Portanto, os resultados demonstram que o fator forma das amostras de concreto deve ser considerado quando comparados resultados de resistividade elétrica.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados do presente estudo, foi verificado que a resistividade elétrica cresce com a idade do concreto pelo menos até 60 dias. Não foi investigada a evolução desse parâmetro para idades superiores neste estudo. Também foi observado que o tipo de cimento influencia na resistividade elétrica. Cimentos com adições em sua composição apresentam maiores valores de resistividade, devido ao efeito do refinamento dos poros ocasionado pelas adições. Outros fatores que tiveram efeito nos resultados do ensaio de resistividade elétrica do concreto foram os formatos (cilíndrico e cúbico) e os tamanhos dos corpos de prova. Sendo assim, o fator forma deve ser considerado nas normalizações e nos modelos baseados nesse parâmetro. Foi identificado que as amostras cilíndricas mostraram maiores valores de resistividade elétrica do que as amostras cúbicas. Uma boa correlação linear foi encontrada para os valores de resistividade elétrica investigados neste artigo.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a escolha de outros traços e dimensões dos corpos de prova, para investigar a tendência observada neste trabalho. Também recomenda-se o estudo da resistividade elétrica para idades mais avançadas do concreto (acima de 60 dias), bem como a verificação do efeito da água (variação das relações água/cimento) nos resultados encontrados neste artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a: “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo” (FAPESP); e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

REFERÊNCIAS

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. *Relation between concrete resistivity and corrosion rate of the reinforcements in carbonated mortar made with several cement types.* *Cement and Concrete Research*, v.18, n.5, p.687-698, set, 1988.

ANDRADE, C. *Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity.* In: International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM Symposium. Evanston, Illinois, USA, 2004.

ANDRADE, C.; D’ANDRÉA, R. *Electrical resistivity as microstructural parameter for the modeling of service life of reinforced concrete structures.* In: 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure. Delft, The Netherlands, 2010.

ANDRADE, C.; D’ANDRÉA, R. *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad.* *Revista ALCONPAT*, v.1, n.2, p.93-101, mai-ago, 2011.

BAWEJA, D.; ROPER, H.; SIRIVIVATNANON, V. *Quantitative descriptions of steel corrosion in concrete using resistivity and anodic polarisation data.* In: Proceedings 4th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Malhotra, V. M. (ed.), SP 170-3, 1997.

GHODS, P.; ISGOR, O.B.; POUR-GHAZ, M. *A practical method for calculating the corrosion rate of uniformly depassivated reinforcing bars in concrete.* *Materials and Corrosion*, v.58, n.4, p.265-272, abr, 2007.

GULIKERS, J. *Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement.* *Materials and Corrosion*, v.56, n.6, p.393-403, jun, 2005.

HALLIDAY, D; RESNICK, R. *Fundamentos da física. Eletromagnetismo.* 3.ed., v. 3, Rio de Janeiro: LCT, 1994.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A. *Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos.* Tese (doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São Jose dos Campos, São Paulo, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M.G.; FREIXO, V.B. *Verificação da durabilidade de estruturas de concreto – aplicação de dados de campo em métodos de normalizações.* *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v.6, n.3, p.136-149, dez, 2014a.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M.G.; MEDEIROS, M.H.F.; REAL, L.V. *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento.* *Revista ALCONPAT*, v.4, n.2, p.116-132, 2014b.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M.G.; MEDEIROS, M.H.F.; *Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport.* *Environment, Development and Sustainability*, in press, 2014c. DOI: 10.1007/s10668-014-9592-z

NBR 5733 *Cimento Portland de alta resistência inicial.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1991.

NBR 5735 *Cimento Portland de alto-forno.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1991.

NBR 5736 *Cimento Portland pozolânico.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1991.

NBR 5737 *Cimentos Portland resistentes a sulfatos.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1992.

NBR 11578 *Cimento Portland composto - Especificação.* Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1991.