

A Resistividade Elétrica do Concreto e a sua Correlação com a Durabilidade das Estruturas

Lourdimine Santos de Jesus¹

Resumo

A resistividade elétrica é a propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Diversas pesquisas demonstraram que a resistividade elétrica é bastante sensível a fatores intrínsecos ao concreto e às características do seu ambiente de exposição. As medidas de resistividade elétrica muito dizem respeito à conectividade e à distribuição dos diâmetros dos poros presentes na matriz do concreto, ao conteúdo de umidade presente nos poros do concreto e à resistência do concreto à penetração de líquidos e gases, fatores intimamente relacionados à penetração dos agentes agressivos no interior do concreto e ao surgimento e evolução de diversas patologias que afetam a durabilidade das estruturas. Este trabalho visa apresentar conceitos e discussões da comunidade científica brasileira e internacional quanto aos fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto e sua correlação com a durabilidade das estruturas. As discussões apresentadas indicam que estruturas de concreto que apresentem maiores valores de resistividade elétrica sejam mais duráveis do que aquelas de baixa resistividade elétrica pois estas últimas serão mais suscetíveis aos agentes agressivos externos e a uma rápida evolução do processo de corrosão das armaduras.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Durabilidade; Concreto; Estruturas; Microestrutura.

1 Introdução

Os agentes agressivos presentes nos ambientes nos quais as estruturas de concreto estão expostas são responsáveis por boa parte das patologias apresentadas ao longo da sua vida útil.

A interação entre as estruturas de concreto armado e o seu ambiente de exposição influencia diretamente a sua durabilidade. Esta interação ocorre pela penetração de agentes agressivos presentes no ambiente na forma de gases, vapores e líquidos através dos poros e fissuras do concreto. Aspectos relacionados às características microestruturais do concreto, à concentração das substâncias no ambiente e aos mecanismos de transporte destas substâncias através do concreto influenciam significativamente tal interação.

Segundo Schiessl (1987) as características microestruturais que influenciam no transporte de substâncias no concreto estão relacionadas especificamente à sua porosidade, à distribuição de tamanho dos poros, sua conectividade e tortuosidade e à quantidade de fissuras.

A resistividade elétrica é um parâmetro intimamente relacionado às características microestruturais do concreto e apresenta grande sensibilidade a fatores que indicam a sua resistência à penetração de substâncias líquidas ou gasosas. Dessa forma, é um parâmetro que abrange propriedades fundamentais relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado.

Este trabalho visa apresentar conceitos e discussões da comunidade científica brasileira e internacional quanto aos fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto e sua correlação com a durabilidade das estruturas.

2 A Resistividade Elétrica do Concreto

A resistividade elétrica é a propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Conforme a ASTM G57:1990, a medida da resistividade indica a habilidade relativa de um determinado meio em transportar correntes elétricas.

¹ Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil e Estruturas pela UnB – Universidade de Brasília. Analista do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. e-mail: lourdimine@hotmail.com

A resistividade elétrica também pode ser definida como a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção transversal constante, no qual a corrente é uniforme e continuamente distribuída (ESBACH, 1975² *apud* WHITING e NAGI, 2003), ou seja, é a resistência elétrica entre faces opostas de um volume unitário de material.

O princípio de medida da resistividade baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre eletrodos posicionados em duas faces opostas e planas do material e a posterior medida da corrente resultante. Também pode ser realizada por meio da leitura da corrente elétrica gerada por uma diferença de potencial aplicada entre eletrodos colocados sobre a superfície ou embutidos no concreto.

De acordo com Monfore (1968) a condução da corrente elétrica através do concreto é de natureza essencialmente eletrolítica e ocorre por meio dos íons presentes na água evaporável das pastas de cimento (Ca^{+2} , Na^{+} , K^{+} , OH^{-} e SO_4^{-2}). Algo semelhante foi citado por Shekarchi et al. (2004) que afirmam que o fluxo da corrente elétrica no concreto se dá por meio dos íons dissolvidos na água que preenche total ou parcialmente a rede de poros interconectados da pasta.

Segundo Whittington (1981) outro possível caminho para passagem da corrente elétrica é por meio dos próprios compostos e produtos hidratados do cimento (C-S-H, água adsorvida ao C-S-H, e partículas não-hidratadas de cimento). Hansson e Hansson (1983) afirmaram que, em uma matriz de cimento na qual os poros não são conectados, é possível que a transferência de elétrons através do gel C-S-H promova o aumento da resistência elétrica e, conseqüentemente, o aumento da resistividade.

3 Fatores que Influenciam a Resistividade Elétrica do Concreto

3.1 Características do Concreto

A resistividade elétrica do concreto depende da microestrutura da matriz de cimento, do volume e da distribuição do tamanho dos poros, e da concentração e da mobilidade dos íons presentes na solução aquosa da estrutura dos poros (POLDER, 2001; WHITING e NAGI, 2003). Desta forma, a proporção dos materiais na mistura, a relação água-cimento e a utilização de adições minerais e de aditivos são fatores que

influenciam a resistividade elétrica do concreto, por alterarem tanto a microestrutura da matriz quanto as características da solução de poro. Segundo Polder (2001), em função destes fatores e das condições de saturação do concreto analisado, a resistividade elétrica pode apresentar resultados que variem de $10 \Omega \cdot \text{m}$ e $10^5 \Omega \cdot \text{m}$.

Segundo Andrade (2004) a resistividade elétrica relaciona-se à microestrutura do concreto de tal forma que, em um concreto saturado, ela pode ser utilizada como uma medida indireta da conectividade dos poros.

3.1.1 Relação água-cimento

A relação de água-cimento é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho do concreto. Esse parâmetro influencia consideravelmente a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no volume total de poros e na quantidade de poros de maiores diâmetros. Assim, quanto maior a relação água-cimento, maior o volume de poros e maior a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor a resistividade elétrica.

3.1.2 Tipo e quantidade de agregados

A resistividade elétrica do agregado é muito maior que a resistividade da pasta de cimento. Em suas análises, Monfore (1968) mediu a resistividade elétrica de vários agregados tipicamente utilizados em concreto e obteve resultados praticamente infinitos em comparação à resistividade da pasta de cimento: $880.000 \Omega \cdot \text{cm}$, no caso de agregados graníticos. Desta forma, a resistividade do concreto é muito mais sensível às alterações das características da pasta de cimento do que às mudanças no tipo de agregado.

Além disso, a resistividade aumenta com o aumento da quantidade de agregado utilizado. Segundo Monfore (1968), a presença dos agregados, partículas praticamente não-condutoras, entre a matriz do concreto, causa a obstrução da passagem da corrente elétrica, fazendo com que o comprimento efetivo da trajetória a ser percorrida pela corrente seja maior que a dimensão do material na direção da corrente. Assim, quanto maior for o teor de agregados, maior será o seu efeito de obstrução e maior será a resistividade.

Por meio de espectroscopia de impedância, McCarter³ *apud* Hunkeler (1996) observou que a resis-

2 Esbach, O. E. and Souders. **Handbook of Engineering Fundamentals**, New York: John Wiley & Sons, 1975.

3 McCarter, W. J. A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration. **Cement Concr. Res.** 1994. 24. 1097-1110.

tividade elétrica de argamassas e concretos é completamente dependente da fração volumétrica da pasta de cimento da mistura. Segundo este autor, o aumento da quantidade de agregado tem o efeito de reduzir a área da seção transversal pela qual ocorrerá a condução da corrente. Nos resultados obtidos por McCarter *apud* Hunkeler (1996), a resistividade elétrica diminuiu com o aumento da fração volumétrica da pasta.

3.1.3 Consumo de cimento

O consumo de cimento determina o volume de pasta presente no concreto e, devido à sensibilidade da resistividade às alterações da matriz do concreto, espera-se que o aumento do volume de pasta afete a resistividade. De acordo com Hughes (1985) a resistividade elétrica do concreto aumenta com a redução do consumo de cimento. No entanto, os estudos desenvolvidos por esse autor mostraram que a influência do consumo de cimento é pequena em concretos com baixa relação água/cimento.

3.1.4 Utilização de adições minerais

Adições minerais como cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto-forno, adições comumente utilizadas como materiais cimentícios suplementares, ou filers, materiais inertes de pequenas dimensões, alteram significativamente a microestrutura da matriz de cimento devido aos efeitos pozolânico e microfíler que apresentam.

Esses materiais mostram influência na resistividade elétrica do concreto, pois provocam o refinamento da estrutura dos poros da matriz e, especificamente, no caso dos materiais pozolânicos, diminuem a concentração iônica da solução. Assim, a utilização desses materiais conduz a um aumento da resistividade do concreto em relação ao concreto convencional (DETWILER e METHA, 1989; AÏTCIN, 2000).

O refinamento da estrutura dos poros ocasionado pelas adições pozolânicas está associado à sua reação com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produto da hidratação do cimento, e com a água. Essa reação forma o gel C-S-H que se distribui por toda a estrutura do material e torna a estrutura da pasta mais densa. Detwiler e Metha (1989) afirmam que a sílica ativa no concreto elimina poros de tamanho entre 500 e 0,5 microns e reduz o tamanho dos poros de 50 a 500 vezes.

Alguns autores afirmam que o refinamento dos poros ocasionado pelas adições minerais é causado, também, por um efeito físico, provavelmente relacionado à dimensão e à forma das partículas. Segundo Bache⁴ *apud* Detwiler e Metha (1989), o efeito fíler é o principal efeito físico da sílica ativa no concreto que, por causa de sua finura, permite o preenchimento dos espaços entre os grãos de cimento, a areia e o agregado graúdo. Além disso, o efeito físico de partículas finas também se expressa na sua atuação como pontos de nucleação para os produtos das reações de hidratação do cimento (AÏTCIN, 2000).

A densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, provavelmente mais tortuosos e descontínuos, dificultam a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica.

Além disso o aumento da resistividade da solução aquosa dos poros provocada pela utilização de materiais pozolânicos foi citado por Hunkeler (1996) como uma das causas do aumento da resistividade. Segundo Duchesene⁵ *et al. apud* Shi (2004), os materiais cimentícios suplementares incorporam mais álcalis aos produtos da hidratação, o que resulta em uma concentração mais baixa de álcalis na solução de poro. De acordo com McCarter *et al.* (2000), a alteração na condutividade da água dos poros é particularmente significativa no caso de materiais com sílica ativa, nos quais a condutividade da solução aquosa presente nos poros pode ser consideravelmente reduzida no período entre 28 dias e 365 dias.

Polder (2001) apresentou resultados de resistividade elétrica de concretos produzidos com cimento com escória de alto-forno (> 65%) ou por adição de cinza volante (> 25%) e sílica ativa (> 5%) significativamente superiores aos resultados apresentados pelas misturas de referência. Em condições saturadas, a resistividade dos concretos com adições variou entre 300 $\Omega\cdot\text{m}$ e 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, enquanto que os concretos de referência apresentaram valores de resistividade elétrica entre 50 $\Omega\cdot\text{m}$ e 200 $\Omega\cdot\text{m}$.

3.1.5 Utilização de aditivos químicos

Os aditivos químicos são materiais adicionados à mistura de concreto para alterar as suas propriedades no estado fresco e controlar o desenvolvimento do processo de hidratação do cimento. Esses aditivos

4 Bache, H. H. **Densified cement/ultra-fine particle-based materials**. Second International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ontario, Canada, 1981.

5 Duchesene, J., Berube, M. A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanism. Part 2. Pore solution chemistry, **Cem. Concr. Res.** 24 (2) (1994) 221-230.

podem ser, dentre outros, agentes incorporadores de ar, plastificantes, superplastificantes, promotores de viscosidade, retardadores ou aceleradores de pega.

Espera-se que a influência dos aditivos na resistividade seja apenas indireta e que esteja relacionada às alterações que estes promovem na microestrutura da matriz em função da influência no volume de poros, na trabalhabilidade da mistura e na evolução do processo de hidratação do cimento (WHITING e NAGI, 2003).

Os aditivos plastificantes e superplastificantes, por exemplo, aumentam a trabalhabilidade da mistura e, conseqüentemente, reduzem a demanda de água do concreto, o que possibilita a redução da relação água/aglomerante e o aumento da resistividade elétrica do concreto.

Os aditivos incorporadores de ar também provocam certa influência na trabalhabilidade do concreto e podem, de forma muito mais limitada, causar as alterações citadas anteriormente para os aditivos plastificantes e superplastificantes. Além disso tais aditivos aumentam o volume total de poros presentes na matriz. No entanto, os vazios incorporados não são comunicáveis e, portanto, não aumentarão a capacidade de condução da corrente elétrica através do concreto. Ao contrário disto, as bolhas de ar incorporado podem atuar como interrupções nos canais capilares do concreto, causando descontinuidades.

Os aditivos retardadores e aceleradores de pega, por sua vez, desde que isentos de cloretos, influenciarão na resistividade elétrica apenas como um reflexo da sua influência no processo de hidratação do cimento.

3.1.6 Grau de hidratação do cimento

A resistividade elétrica do concreto aumenta com o passar do tempo. Esse aumento está relacionado à hidratação da pasta de cimento. Durante o processo de hidratação do cimento, os compostos formados passam a preencher, de forma progressiva, parte dos vazios inicialmente ocupados pelo eletrólito, alterando a estrutura de poros da pasta. Segundo Taylor e Arulanandan (1974), esse efeito de preenchimento provocado pelos produtos da hidratação do cimento diminui a conectividade dos capilares.

A evolução da resistividade elétrica do concreto com o tempo é muito semelhante à do aumento da resistência mecânica. A diminuição da porosidade com o avanço da hidratação conduz a uma redução de porosidade que se reflete tanto na resistência mecânica quanto na resistividade (Andrade, 2005).

Além disso a quantidade de água evaporável presente nos poros e a concentração dos íons em dissolução (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , SO_4^- e OH^-) variam durante

o processo de hidratação do cimento e, como o fluxo da corrente através do concreto depende do movimento de íons na água evaporável da matriz, é provável que esta variação também influencie a resistividade.

Andrade (2004) afirma que a diminuição da porosidade com o avanço do grau de hidratação se reflete tanto na resistência mecânica quanto na resistividade elétrica. Segundo essa autora, a lei que pode ser aplicada para a evolução da resistividade é a descrita na Equação 1:

$$\rho_{es,28d} = \rho_{es,t} \cdot e^m \quad \text{Eq. [1]}$$

onde $\rho_{es,28d}$ é a resistividade do concreto saturado aos 28 dias ($\Omega.m$), $\rho_{es,t}$ é a resistividade em um tempo t ($\Omega.m$) e m é um parâmetro que varia em função das características da mistura.

3.2 Características Ambientais

3.2.1 Temperatura

A resistividade é o parâmetro inverso da condutividade e, portanto, depende da temperatura. O efeito da temperatura na resistividade de um material sólido e poroso como o concreto envolve a mobilidade dos íons e as suas interações com as fases sólidas (CASTELLOTE *et al.*, 2002).

Em geral a elevação da temperatura diminui a resistividade elétrica devido ao aumento da mobilidade iônica na água presente nos poros, porém pode produzir o efeito oposto e ocasionar o aumento da resistividade, caso provoque a evaporação da água livre do concreto (ANDRADE, 2004).

Polder (2001) afirma que aproximações empíricas podem ser utilizadas para corrigir os valores de resistividade medidos. De acordo com McCarter *et al.* (1981), a resistividade elétrica a uma temperatura t (ρ_t) está relacionada à sua resistividade a uma temperatura de referência θ (ρ_θ) por meio da Equação 2:

$$\rho_t = \frac{\rho_\theta}{[1 + \alpha(t - \theta)]} \quad \text{Eq. [2]}$$

onde $\rho_{es,t}$ é a resistividade elétrica a uma temperatura t ($\Omega.m$), ρ_θ é a resistividade a uma temperatura de referência ($\Omega.m$).

Polder (2001), no entanto, alertou para o fato de que o efeito da temperatura na resistividade elétrica pode variar em função do teor de umidade do concreto. Esse autor cita estudos realizados em laboratório, nos quais o efeito da temperatura na resistividade elétrica foi de 3% para cada grau Kelvin alterado em concretos

saturados, enquanto que, em concretos secos, a mudança da temperatura alterou a resistividade em 5% por grau Kelvin.

Devido à dificuldade de mensurar todos os efeitos relacionados às variações de temperatura que podem alterar a resistividade do concreto, para que a resistividade seja utilizada como um parâmetro de caracterização da microestrutura do concreto, faz-se necessário padronizar os resultados tendo como base uma mesma temperatura. Castellote *et al.* (2002) sugerem a adoção de 25 °C como a temperatura de referência.

3.2.2 Umidade relativa

O grau de saturação na rede de poros capilares do concreto varia em função das condições atmosféricas do ambiente no qual está exposto. As alterações na umidade relativa e a ocorrência de chuvas podem alterar o conteúdo de umidade do concreto (CASTELLOTE *et al.*, 2002).

Whiting e Nagi (2003) afirmaram que o grau de saturação dos poros é a variável que possui maior influência na resistividade elétrica do concreto. A afirmação destes autores é coerente, pois, como o fluxo da corrente através do concreto se dá, predominantemente, pela água contida nos poros, quanto maior for o grau de saturação dos poros do concreto, menor será a sua resistividade elétrica.

Em suas pesquisas Hunkeler (1996) observou que a condutividade elétrica dos concretos e das argamassas utilizados foi drasticamente reduzida com a diminuição da umidade relativa, chegando a ser praticamente nula à umidade relativa de 40%. Segundo Whiting e Nagi (2003), embora a pasta de cimento mantenha quantidades de água significativas no seu interior, à umidade relativa de 40%, esta é essencialmente não-condutora, pois as forças de superfície imobilizam os íons dissolvidos na água do poro.

Polder (2002) apresentou resultados que expressam a influência da umidade relativa na resistividade. Nesses resultados, concretos convencionais em condição saturada apresentavam resistividade elétrica entre 50 Ω .m e 200 Ω .m, enquanto que os concretos expostos a um ambiente com 80% de umidade relativa apresentaram valores de resistividade que variaram entre 100 Ω .m e 400 Ω .m.

3.3 Características dos Elementos Estruturais

3.3.1 Presença da armadura

A armadura do concreto é um material altamente condutivo. É possível que ela promova um caminho preferencial para a passagem da corrente, caso esteja localizada nas proximidades do eletrodo. Para que esse efeito seja minimizado, deve-se determinar o local da armadura utilizando-se equipamentos apropriados, e se efetuarem medidas na região entre as barras ou perpendicularmente a elas.

Gowers e Millard⁶ *apud* Whiting e Nagi (2003) mostraram que a influência da armadura na resistividade só é significativa quando as medidas são realizadas diretamente na região das barras.

3.3.2 Camadas superficiais

A resistividade da camada superficial de uma peça de concreto pode diferir da resistividade do seu interior. Gradientes de umidade provocados pela secagem ou pela ocorrência de chuvas, maior porosidade do concreto na região superficial, ocasionada pela exsudação ou pela deficiência do processo de cura, podem produzir, nas peças de concreto, uma camada superficial de baixa resistividade elétrica. Além disso, há possibilidade de ocorrerem heterogeneidades locais ocasionadas por partículas de agregados.

De acordo com Millard (1991) as camadas superficiais de baixa resistividade influem significativamente nas medidas de resistividade, mesmo quando estas camadas são muito finas.

3.4 Ação de Agentes Agressivos

3.4.1 Penetração de íons cloreto

A bibliografia a respeito da influência da penetração de íons cloreto na resistividade elétrica do concreto apresenta resultados contraditórios que não permitem uma análise conclusiva do fenômeno.

Alguns autores afirmam que o efeito da penetração de cloretos na resistividade é relativamente pequeno (POLDER, 2001; SHEKARCHI *et al.*, 2004). Segundo Andrade (2004) a contaminação por íons cloreto reduz a resistividade, porém esta redução é pouco significativa por ser pequena a influência dos íons cloreto na condutividade de soluções alcalinas, como a contida nos poros do concreto. Além disso, esta mesma

6 Gowers, K. R. and Millard, S. G. The Effect of Steel Reinforcement Bars on the Measurement of Concrete Resistivity. **British Journal of Non-Destructive Testing**, vol. 33, n° 11, 1991, p. 551-554.

autora afirma que a influência da composição química da solução do poro possui um pequeno impacto na resistividade total do concreto, pois a resistividade de soluções com valores de pH elevados variam de 30 Ω .cm a 100 Ω .cm, valores relativamente pequenos quando comparados à resistividade do concreto com elevados graus de hidratação.

Hunkeler (1996), no entanto, defende que o aumento do teor de cloretos no interior do concreto pode reduzir significativamente a sua resistividade elétrica. De acordo com esse autor, altas concentrações de cloreto (entre 1 e 2 M%/cimento) reduzem a resistividade em duas, ou, no máximo, três vezes. Outros autores também observaram uma significativa influência da presença de cloretos na resistividade. Browne⁷ et al. apud Hunkeler (1996) observaram uma diminuição de 27% na resistividade do concreto quando este apresentava uma concentração de 0,45 M%/concreto e, para concretos com 0,045 M%/concreto, a redução da resistividade foi de aproximadamente 7%. Segundo Neville⁸ apud Helene (1986), teores de apenas 0,6% de cloretos são suficientes para reduzir a resistividade de uma argamassa em cerca de 15 vezes.

Alguns autores afirmam que a magnitude da influência da penetração de cloretos no concreto depende da capacidade de fixação de cloretos apresentada pelo cimento utilizado. De acordo com Whiting e Nagi (2003), por exemplo, quando for utilizado cimento com teores elevados de C_3A , a fixação dos íons cloreto será maior e, então, a influência de uma determinada quantidade de cloreto na resistividade elétrica pode ser menor que quando baixos teores de C_3A forem utilizados. Além disso, esses autores afirmam que, como os produtos da hidratação de concretos com escória de alto-forno são mais efetivos em fixar os íons cloreto (DHIR *et al.*, 1990), a influência destes íons será menor em concretos com escória.

Pruckner e Gjorv (2004) alertaram ainda para um possível aumento da resistividade ocasionado pela presença de cloretos no concreto. De acordo com esses autores, as reações de fixação dos íons cloreto, quando o cloreto de sódio é a fonte destes íons, liberam NaOH(aq), que provoca o aumento do pH da solução aquosa dos poros. Esse aumento da alcalinidade funcionaria como um ativador da hidratação do cimento, o que torna a estrutura da pasta mais densa e com poros menores, e causa o aumento da resistividade elétrica.

3.4.2 Carbonatação

A carbonatação do concreto conduz ao endurecimento da camada superficial do concreto e também provoca um significativo aumento da resistividade da zona superficial (MILLARD, 1991). No entanto, Polder (2001) afirma que a influência da resistividade da camada carbonatada será pequena caso a sua espessura seja muito menor do que a distância entre os eletrodos utilizados para a execução do ensaio. Whiting e Nagi (2003) afirmam que, quando a resistividade elétrica da camada superficial é mais alta do que a resistividade do concreto subjacente, como no caso de uma camada carbonatada, o erro na medida da resistividade do concreto é pequeno.

Além disso, quando o concreto carbonata, ocorre a redução da concentração da solução do poro, o que pode aumentar a sua resistividade.

4 Considerações Finais

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível às características microestruturais da matriz do concreto. Fatores relacionados à estrutura de poros, à composição e à concentração da água livre presente nos poros do concreto e às características ambientais às quais o concreto está submetido apresentam reflexos diretos na resistividade do concreto.

De uma forma mais abrangente, pode-se afirmar que a resistividade elétrica apresenta grande sensibilidade a fatores que indicam a capacidade do concreto em resistir à penetração de substâncias líquidas ou gasosas. Essa propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material e, no caso do concreto armado, está intimamente relacionada à penetração de agentes agressivos no seu interior e também à velocidade do processo de corrosão das armaduras, a partir do momento em que ela se inicie. Por esses motivos, a resistividade elétrica constitui-se em um parâmetro que abrange propriedades fundamentais relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado.

Em um mesmo grau de saturação, quanto maior for a fração volumétrica dos poros do concreto e

7 Browne, R. D., Geoghegan, M. P. The corrosion of concrete marine structures: the present situation. **Proc. Symp. on corrosion of steel reinforcements in concrete construction**, Sot. Chem. Ind., Materials Preservation Group, Road and Building Materials Group, London 15, February 1978, Sot. Chem. Ind., London, 1979.

8 Neville, A. M. **Tecnologia del concreto (Properties of concrete)**. Trad. Victor M. Pavón R., México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. v. 2, 1979, 395 p.

quanto mais conectados forem estes poros, menor será a sua resistividade. Por outro lado, a densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, provavelmente mais tortuosos e descontínuos, dificultam a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica. Assim, conclui-se que estruturas de concreto que apresentem maiores valores de resistividade elétrica sejam mais duráveis do que aquelas que apresentam baixa resistividade elétrica, pois essas últimas serão mais suscetíveis aos agentes agressivos externos e a uma rápida evolução do processo de corrosão das armaduras.

A resistividade pode ser utilizada como parâmetro de previsão da vida útil de estruturas existentes a partir de ensaios não destrutivos de fácil execução que podem ser realizados *in loco*.

É necessário, no entanto, observar que fatores ambientais, como a temperatura e a umidade relativa do ambiente, têm grande influência na resistividade, uma vez que alteram a mobilidade iônica e a concentração da solução do poro. Devido à dificuldade de mensurar todos os efeitos relacionados às variações de temperatura que podem alterar a resistividade do concreto, para que a resistividade seja utilizada como um parâmetro de caracterização da microestrutura do concreto e da sua vida útil, faz-se necessário padronizar a temperatura e umidade relativa.

5 Referências

- AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo, Editora Pini e Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method – G 57:95a** (reapproved 2001). Annual Book of ASTM Standard, v. 3.2., p. 225-229, 2002.
- ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity. In: International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM. **Proceedings...** Evanston: 2004. p. 1-8.
- ANDRADE, C. Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity. In: IV International ACI/CANMET Conference. **Proceedings...** Brazil, 2005. p. 599-608.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204. **Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica volumétrica**. Rio de Janeiro, Dezembro de 2012.
- CASTELLOTE, M., ANDRADE, C. ALONSO, C. Standardization, to reference of 25 °C, of Electrical Resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. **ACI Materials Journal**. v. 99, n. 2, 2002, p. 119-128.
- DETWILER, R. J.; METHA, P. K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. **ACI Materials Journal**. v. 86, n. 6, November-December, 1989, p. 609-914.
- DHIR, R. K., JONES, M. R, AHMED, H. E. H, SENEVIRATNE, A. M. G. Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 2, n. 152, 1990, p. 177-185.
- EWINS, A. J. Resistivity measurements in concrete. **British Journal of Non-Destructive Testing**. v. 32, n. 3, Mar, 1990, p. 120-126.
- HANSSON, I. L. H.; HANSSON, C. M. Electrical resistivity of Portland cement based materials. **Cement and Concrete Research**, 1983, v. 13, p. 675-683.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão de armaduras em concreto armado**. São Paulo, PINI/IPT, 1986, 47p.
- HUGHES, B. P, SOLEIT A. K. O, BRIERLEY, R. W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 37, n. 133, p. 243-248, 1985.
- HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution-a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 381-389, 1996.
- MCCARTER, W. J, FORDE, M. C., WITTINGTON, H. W. Resistivity characteristic of concrete. Institute of Civil Engineers, Part 2. **Proceedings...** Edinburgh, 1981. v. 71. p. 107-117.
- MILLARD, S. G. **Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques**. Institution of Civil Engineers, Part 2: Research and Theory. **Proceedings**. v. 91, n. 2, Mar, 1991, p. 71-88.
- MONFORE, G. E. The Electrical Resistivity of Concrete. **Journal of the PCA Research and Development Laboratories**. v. 10, n. 2, p. 35-48, 1968.
- POLDER, R.B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, 2001, p. 125-131.
- PRUCKNER, F., GJØRV, O. E. Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity. **Cement and Concrete Research**. v. 34, 2004, p. 1209-1217.
- SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a avaliação**

da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto armado. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research.** n. 34, 2004, p. 537-545.

SCHIESSL, P. Influence of the Composition of Concrete on the Corrosion Protection of the Reinforcement. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987, v. 2, p. 1634-1650.

SHEKARCHI, M., TADAYON, M. CHINI, M., HOSEINI, M. ALIZADEH, R., GHODS, P., MONTAZER, S. H. Predicting chloride penetration

into concrete containing silica fume, with measuring the electrical resistivity of concrete. In. 4^o International Conference on Concrete under Severe Conditions. CONSEC'04. **Proceedings...** Seoul, Korea, 2004.

TAYLOR, M. A., ARULANANDAN, K. Relations between electrical and physical properties of cement pastes. **Cement and Concrete Research.** v. 4, n. 6, 1974, p. 881-897.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review.** R&D Serial n^o 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p.

WITTINGTON, H. W., MCCARTER, J., FORDE, M. C. The conduction of electrical through concrete. **Magazine of Concrete Research.** v. 33, n. 114, 1981, p. 48-60.