

Disciplina Patologia das Construções/IFS

ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS

FONTE: trechos retirados da Prática Recomendada do IBRACON – Prática Recomendada do IBRACON – Procedimento de Determinação da Resistividade Elétrica em Corpos de Prova e Testemunhos de Concreto. **Aquisição completo** em www.ibracon.org.br

1. INTRODUÇÃO

Razões para o desenvolvimento de estruturas duráveis, um dos objetivos de normas de dimensionamento, custos e sustentabilidade ambiental.

Medida de Resistividade Elétrica (iônica) = grande aliada na prevenção de processos de deterioração do concreto, podendo contribuir para ampliar a vida útil de projeto.

A Resistividade Elétrica (iônica) do concreto, assim como o seu inverso, a condutividade iônica (elétrica), são propriedades características de um concreto e, tanto servem para avaliar a durabilidade em ambiente de carbonatação quanto em um ambiente rico em cloretos. Em ambas as situações, a durabilidade está relacionada a ataque à armadura (aço) e não ao concreto.

2. CONCEITOS BÁSICOS

A Resistividade Elétrica de um material é definida como a sua capacidade de suportar a transferência de íons submetidos a um campo elétrico, sendo o inverso da condutividade elétrica.

É uma propriedade inerente ao material e define o quanto ela se opõe à passagem de corrente elétrica. Assim, quanto menor a Resistividade, mais facilmente ele permitirá a passagem de corrente elétrica.

Quando um material é submetido a uma diferença de potencial, é estabelecida uma corrente entre os seus terminais, que é caracterizado pelo movimento das cargas elétricas livres em seu interior. Durante esse movimento desordenado das cargas, vários elétrons interagem uns com outros e com os átomos que constituem o condutor, o que

dificulta a passagem de corrente elétrica. Essa dificuldade é denominada de Resistência Elétrica.

A natureza elétrica do material influencia no fluxo de elétrons: quanto maior for a quantidade de elétrons livres, maior será a facilidade da corrente ser estabelecida.

3. MÉTODO USUAIS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

3.2 Método Direto = método dos dois pontos

Conhecendo-se com precisão as dimensões do material, pode-se fazer uma medida direta da sua Resistividade Elétrica, medindo-se a diferença de potencial e a corrente elétrica que flui através da amostra sob a ação de um campo elétrico de corrente aplicada.

A Fig. 1 esboça o método.

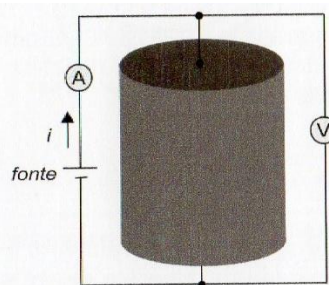


Figura 1 – Arranjo experimental para o método de duas pontas (ou de dois terminais).

FORNTE: Os Autores.

¹ N.T. Pico a pico (pk-pk) é a diferença entre as amplitudes máximas positivas e máximas negativas de uma forma de onda.

Sua aplicação é limitada em ensaios no campo.

3.3 Método dos Quatro Pontos

Foi originalmente proposto por F. Wenner, 1915, para medir a Resistividade Elétrica da Terra, então é conhecida como Método de Wenner.

Ocorre o contato de quatro sondas com a amostra, sendo que duas delas geram a diferença de potencial e as outras duas monitoram a tensão (V), conforme Fig.3 e 4. Então, uma corrente elétrica é aplicada aos dois pinos externos da sonda e a diferença de potencial resultante entre os dois pinos internos é medida.

O cálculo da Resistividade Elétrica pelo Método de Wenner em corpos de prova com dimensões semi-infinitas utiliza as equações 1 e 21, tais como:

$$R = V/I \text{ e } \rho = Kf.R$$

R = resistência elétrica em Ω

V= diferença de potencial entre eletrodos

I = corrente elétrica em A que circula pelo circuito

P = resistividade elétrica em $\Omega.m$

Kf = fator de forma, associado às dimensões das amostras, em m.

No entanto, o fator de forma Kf depende do espaçamento entre as sondas, conforme equação:

$$Kf. = 2\pi a$$

Onde a = é a distância entre as pontas do resistímetro, em m.

A Resistividade Elétrica é obtida em $\Omega.m$, utilizando-se o valor médio de seis medições de resistência elétrica, calculada conforme:

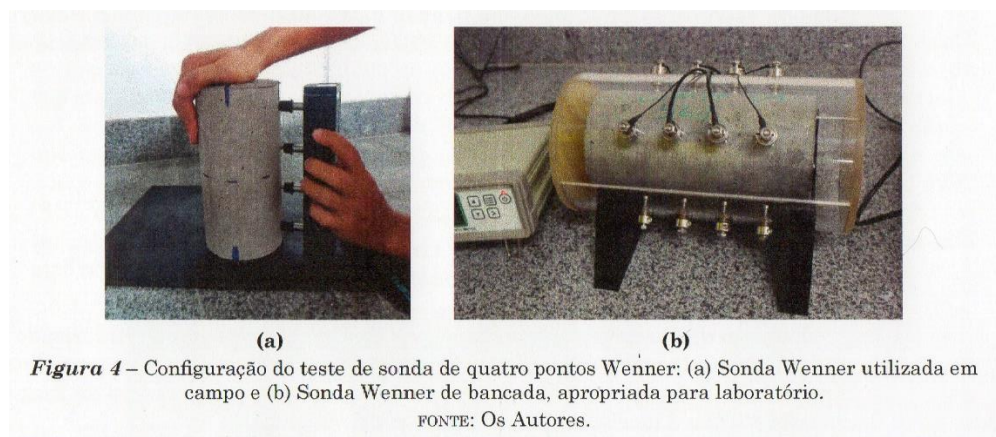
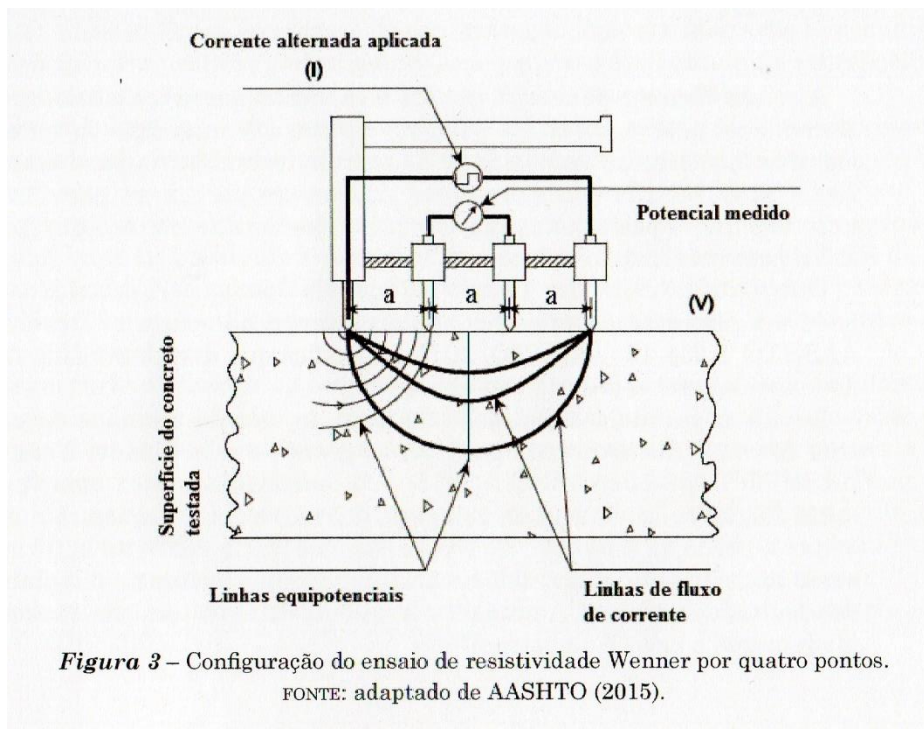
$$P = (V/I).2\pi a$$

Há a necessidade no campo de usar um pacômetro, uma vez que o posicionamento incorreto de sondas em relação às armaduras pode inferir em resultados errôneos.

O método mede a Resistividade Superficial que pode ser diferente da Resistividade interior do concreto. Devido a isso, normas especificam que devem ser feitas diversas medidas ao longo da lateral do corpo de prova.

Devido a grande sensibilidade do teste ao teor de umidade do concreto, as amostras devem estar saturadas para evitar grande variabilidade. Colocar a amostra em uma vasilha com uma lâmina de água de 2,5 cm girando-a durante o teste, recorrendo a norma AASHTOT 358-15 para evitar perda de umidade.

Se a amostra começar a secar, as leituras de resistividade serão mais altas, aumentando a variabilidade nas leituras e possibilitando a obtenção de resultados errôneos. A mudança frequente da água também é recomendada (aprox. a cada 5 amostras).



4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA e DURABILIDADE DO CONCRETO

A Resistividade Elétrica P ($\Omega \cdot m$) é a propriedade do concreto que reflete a condição de passagem de carga elétrica pelo interior do material, relacionada aos mecanismos de transporte de agentes agressivos. O concreto, quando úmido, é considerado um semicondutor com resistividade elétrica da ordem de $10^2 \Omega \cdot m$, e quando seco em estufa atua como um isolante elétrico com resistividade da ordem de $10^9 \Omega \cdot m$.

A Resistividade Elétrica atua como forma de medida indireta da conectividade dos poros do concreto, uma vez que define a capacidade deste em permitir a transferência de íons através da sua microestrutura. Além do efeito físico proveniente da

conectividade dos poros, o efeito químico da composição da solução presente nesses poros também interfere nos valores da resistividade.

Como a corrosão é um processo eletroquímico e que ocorre em meio aquoso, a determinação da Resistividade Elétrica pode atuar como forma de controle e avaliação da proteção oferecida pelo concreto à armadura.

A Resistividade Elétrica permite avaliar a facilidade de mobilidade dos cloretos através dos poros de concreto endurecido.

Essa avaliação pode ocorrer antes da despassivação do aço, num ambiente de equilíbrio termodinâmico, mas, uma maior ou menor resistividade só vai atuar após a despassivação acelerando ou reduzindo a cinética da corrosão.

A Resistividade Elétrica está estritamente ligada ao modelo de vida útil das estruturas, pois indica a possibilidade de ocorrência.

No **PERÍODO DE INICIAÇÃO**, a medição da Resistividade Elétrica pode indicar o grau de facilidade da entrada de agentes agressivos e, no **PERÍODO DE PROPAGAÇÃO**, após despassivação, dá uma ideia de intensidade da corrente de corrosão.

Atua como eficiente indicador de durabilidade do concreto.

5. CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E DIFUSIVIDADE DE CLORETOS

O ingresso de cloretos pode ser causado pela ação de diversos mecanismos de transporte, absorção de água, permeabilidade (gradiente de pressão), difusão iônica (gradiente de concentração) e migração iônica (diferença de potencial). Na prática, normalmente esse processo é resultado da sobreposição desses mecanismos.

Absorção capilar é um processo rápido, enquanto a difusão é um processo lento, porém contínuo, sendo estes os principais mecanismos atuantes no que remete à penetração de cloretos em ambiente marinho.

Absorção de água por capilaridade ocorre principalmente nas camadas mais próximas à superfície, regiões sujeitas a ciclos de molhagem e secagem. Nas camadas mais internas do concreto, o mecanismo predominante é a difusão iônica.

O transporte de fluidos no concreto depende de uma extensa gama de fatores como, por exemplo, a distribuição e a interconectividade dos poros. A maioria dos mecanismos de transporte em um material poroso é dependente do potencial gerador de um fluxo de massa.

Dentre todos os mecanismos, a difusão iônica é considerada como um dos mais atuantes em concretos saturados e se caracteriza como mecanismo preponderante no

contexto de iniciação da corrosão, pois, permite a continuidade do movimento de cloretos até que os íons atinjam a armadura. O transporte por difusão iônica é caracterizado pelo movimento de substâncias de um meio para outro, por efeito de gradiente de concentração iônica, com o objetivo de atingir o equilíbrio do sistema, ou seja, igualar as concentrações.

Em ambientes com concentração de cloretos, a resistividade do concreto em condições de saturação está diretamente relacionada com a sua difusividade, que é expressa pelo coeficiente de difusão.

$$D_e = A / P_{ef}$$

D_e = coeficiente de difusão efetivo;

A é uma constante que depende da concentração do ambiente;

P_{ef} = resistividade elétrica efetiva medida em condição de saturação.

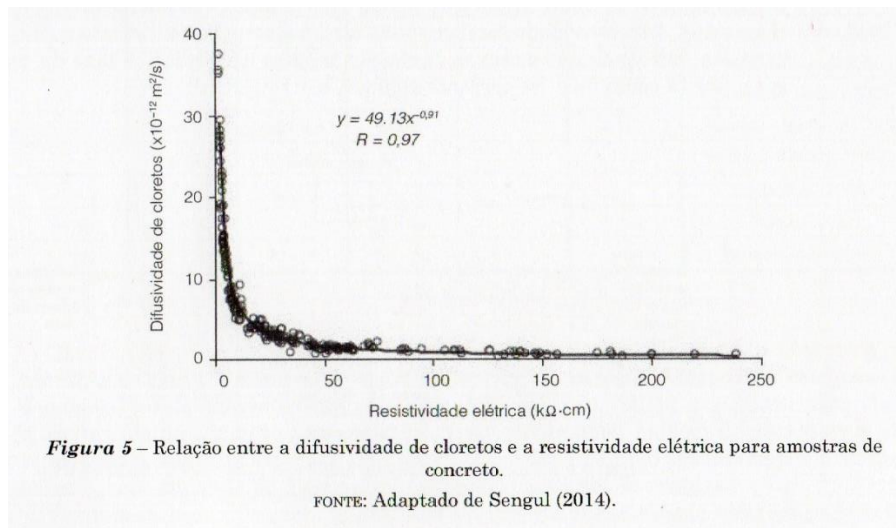


Tabela 1 – Coeficientes de determinação obtidos por diversos autores para a correlação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos.

Autores	Coefficiente de determinação
Tong e Gjerv (2001)	$r^2 = 0,98$
Polder e Peelen (2002)	$r^2 = 0,60$
Santos (2006)	$r^2 = 0,92$
Medeiros-Junior et al. (2014)	$r^2 = 0,83$
Andrade et al. (2014)	$r^2 = 0,38$
Sengul (2014)	$r^2 = 0,97$
Presuel, Liu e Paredes (2015)	$r^2 = 0,84-0,89$
Real (2015)	$r^2 = 0,87$
Noort, Hunger e Spiesz (2016)	$r^2 = 0,88$

Fonte: Os Autores.

Tabela 2 – Valores de resistividade elétrica ($k\Omega\cdot cm$) associados à possibilidade de penetração de cloretos

Possibilidade de penetração de cloretos						Referência
Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Desprezível	
-	< 12	12 - 21	21 - 37	37 - 254	> 254	AASHTO (2015)
-	< 12	12 - 21	21 - 37	37 - 254	> 254	FM 5-578 (2004)
-	< 7	7 - 13	13 - 24,3	24,3 - 191	> 191	FHWA-KS-14-15 (KANSAS DEPARTMENT, 2015)
-	< 16	16 - 28	28 - 50	50 - 343	> 343	Ghosh e Quang (2015)
< 5	5 - 7,5	7,5 - 15	15 - 35	> 35	-	Sengul (2014)

FORNTE: Os Autores.

6. CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E CORROSÃO DA ARMADURA

Visto que o processo corrosivo de armaduras dentro do concreto é um processo eletroquímico, a Resistividade Elétrica do meio no qual os mesmos estão presentes apresenta uma significativa influencia em sua taxa de corrosão, sendo um importante parâmetro a ser considerado nas análises de durabilidade e vida útil de estruturas.

A Resistividade Elétrica influencia diretamente no processo de corrosão eletroquímica porque tem capacidade de explicar bem o fluxo de íons entre as regiões do ânodo e do cátodo pela microestrutura.

Tabela 2 – Valores de resistividade elétrica ($k\Omega\cdot cm$) associados à possibilidade de penetração de cloretos

Possibilidade de penetração de cloretos						Referência
Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Desprezível	
-	< 12	12 - 21	21 - 37	37 - 254	> 254	AASHTO (2015)
-	< 12	12 - 21	21 - 37	37 - 254	> 254	FM 5-578 (2004)
-	< 7	7 - 13	13 - 24,3	24,3 - 191	> 191	FHWA-KS-14-15 (KANSAS DEPARTMENT, 2015)
-	< 16	16 - 28	28 - 50	50 - 343	> 343	Ghosh e Quang (2015)
< 5	5 - 7,5	7,5 - 15	15 - 35	> 35	-	Sengul (2014)

FORNTE: Os Autores.

Tabela 3 – Valores de resistividade elétrica ($k\Omega\cdot cm$) associados à probabilidade de ocorrência da corrosão.

Probabilidade de ocorrência da corrosão						Referência
Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa	Desprezível	
-	< 10	10 - 50	50 - 100	-	> 100	RILEM TC 154-EMC (2000)
-	< 10	10 - 50	50 - 100	-	> 100	COST 509 (1997)
-	< 5	5 - 10	10 - 20	> 20	-	CEB 192 (1989)
-	< 6,7	6,7 - 11,7	11,7 - 20,6	20,6 - 141,1	> 141,1	Azarsa e Gupta (2017)
-	< 5	5 - 10	10 - 20	-	> 20	Song <i>et al.</i> (2007)
-	< 10	10 - 50	50 - 100	-	> 100	PROCEQ (2017)
-	< 10	-	-	> 30	-	Morris <i>et al.</i> (2002)
-	< 10	10 - 50	50 - 100	-	> 100	Ghosh e Quang (2015)
< 5	5 - 10	10 - 20	> 20	-	-	Bungey (1989)
-	< 10	10 - 50	50 - 100	-	100 - 200	Andrade e Alonso (2001)
-	< 10	10 - 20	20 - 100	-	> 100	Yu, Li e Chen (2017)
-	< 5	5 - 12	> 12	-	-	Cavaliér e Vassie (1980)
-	< 6,5	6,5 - 8,5	> 8,5	-	-	Hope, Ip e Manning (1985)
-	< 10	10 - 100	> 100	-	-	Andrade e Alonso (1996)
-	< 8	8 - 12	> 12	-	-	Smith <i>et al.</i> (2004)
< 10	10 - 50	-	50 - 100	-	> 100	Polder (2001)
< 15	15 - 20	20 - 55	55 - 80	-	> 80	Balestra <i>et al.</i> (2019)

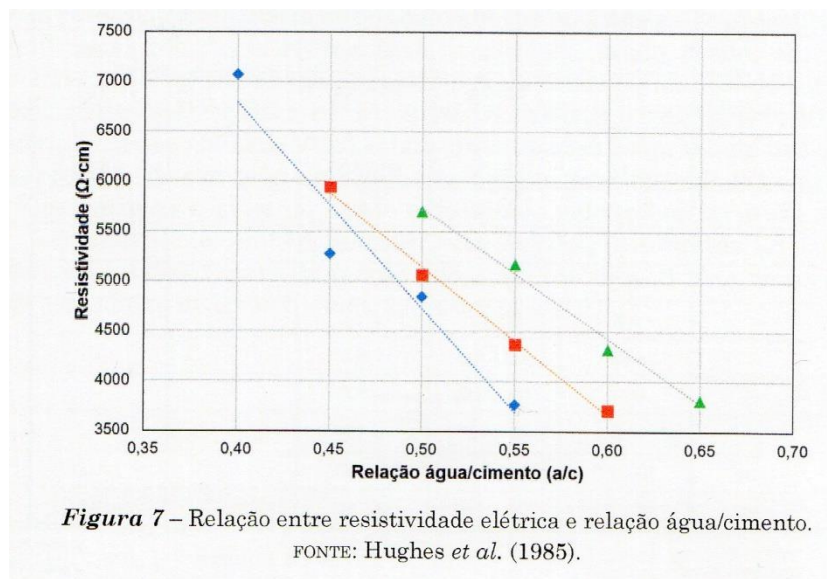
FORNTE: Os Autores.

7. FATORES DE INFLUÊNCIA NA AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

7.1 Parâmetros associados ao concreto

7.1.1 Relação a/c

Redução do a/c eleva a Resistividade Elétrica devido diminuição da porosidade e consequente dificuldade de mobilidade iônica na solução aquosa, ou seja, menor disponibilidade de eletrólito.



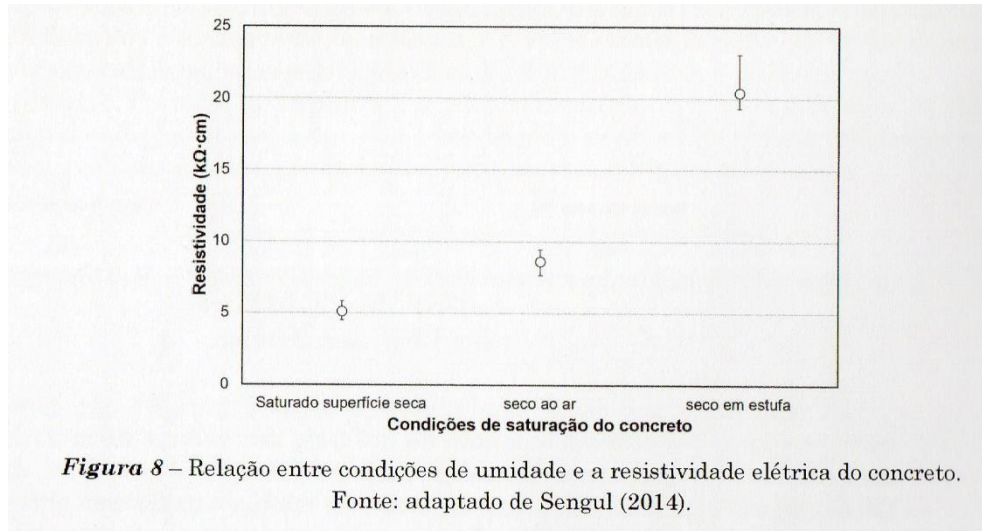
Tendência de redução dos valores da Resistividade Elétrica com o aumento do a/c, independente do consumo de cimento.

7.1.2 Umidade da Amostra

A Resistividade Elétrica depende do grau de saturação dos poros da estrutura, uma vez que a corrente elétrica é transportada por íons que fluem pelos poros.

Portanto, com um teor de umidade mais elevado há uma maior mobilidade iônica, alta possibilidade de iniciação da corrosão e, assim, consequente redução de resistividade elétrica do concreto.

O aumento da Resistividade Elétrica com a redução do teor de umidade está ilustrado na Figura 8.



7.1.3 Presença de contaminantes

A presença de contaminantes como cloretos, sulfatos e nitratos pode viabilizar e acelerar a corrosão, pois, como são eletrólitos fortes, permitem que o meio apresente baixa resistividade, possibilitando o fluxo de elétrons, ocasionando uma maior cinética após despassivação.

Tabela 4 – Condutividade equivalente (λ_0) de íons em solução aquosa com concentração infinita a 25°C.

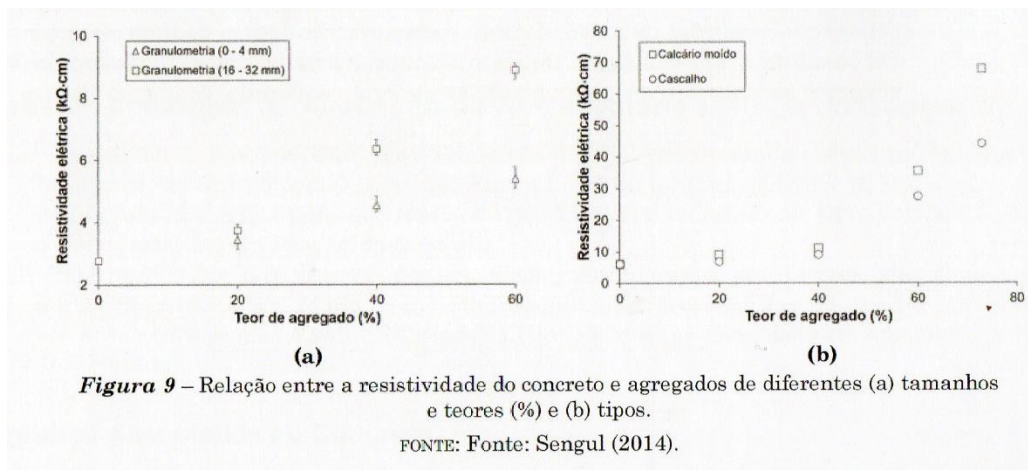
Íon	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	OH ⁻	Cl ⁻
λ_0 (m ⁻¹ Ω ⁻¹)	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,01980	0,00763

FONTE: adaptado de Adamson (1973 *apud* SHI, 2004).

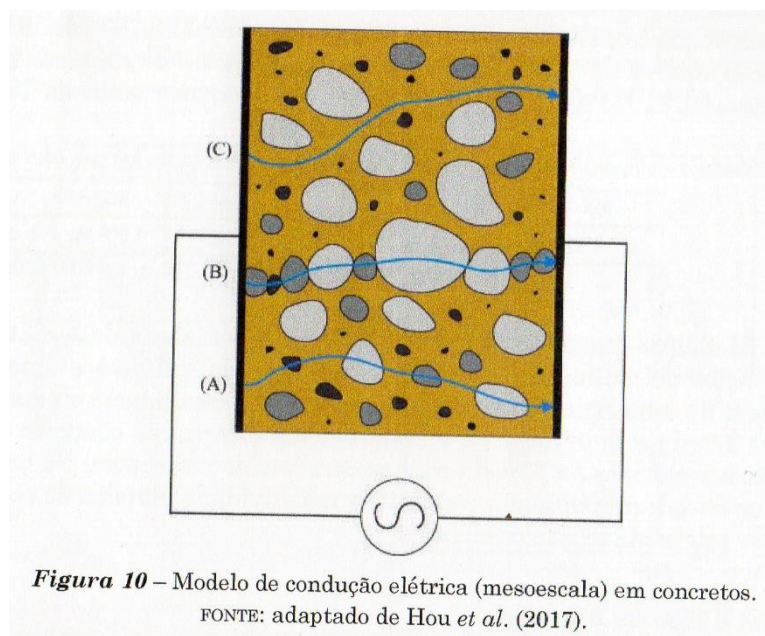
7.1.4 Tamanho e Tipo de Agregado

A resistividade da pasta de cimento, em geral, é muito menor que a do agregado. Isso ocorre devido a facilidade de fluxo da corrente elétrica através dos poros presentes na pasta de cimento que, geralmente, estão presentes em maior quantidade que nos agregados.

Aumentando o teor de agregado na produção do concreto, há um considerável aumento na Resistividade Elétrica devido à obstrução da passagem de corrente causado pelas partículas dos agregados, que são praticamente isolantes e pela diminuição no volume da pasta.



Caminhos prováveis para condução elétrica nos concretos. Observa-se que a opção (C) mostra a condução elétrica preferencial pela pasta.

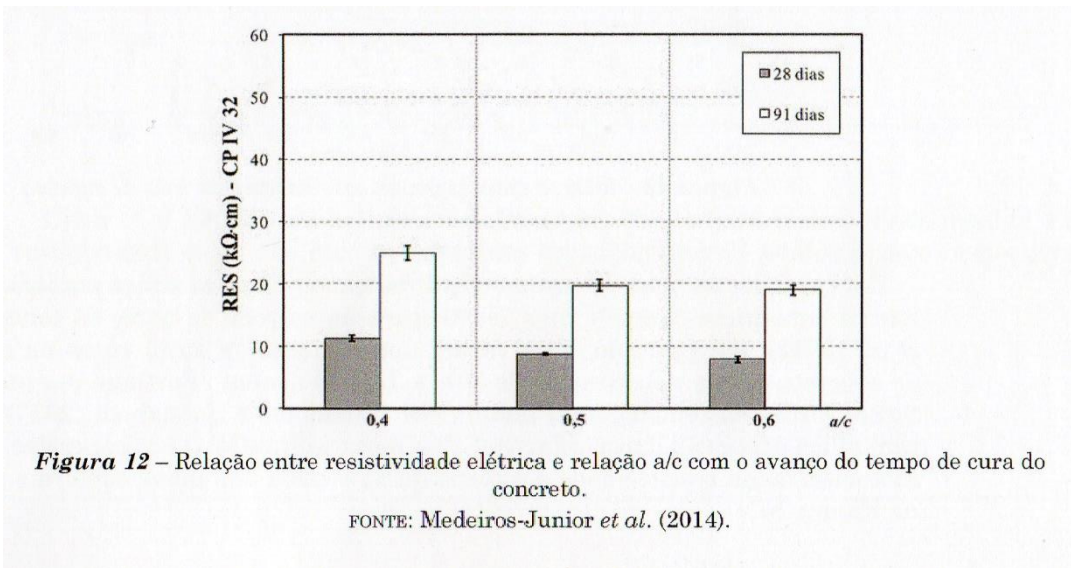
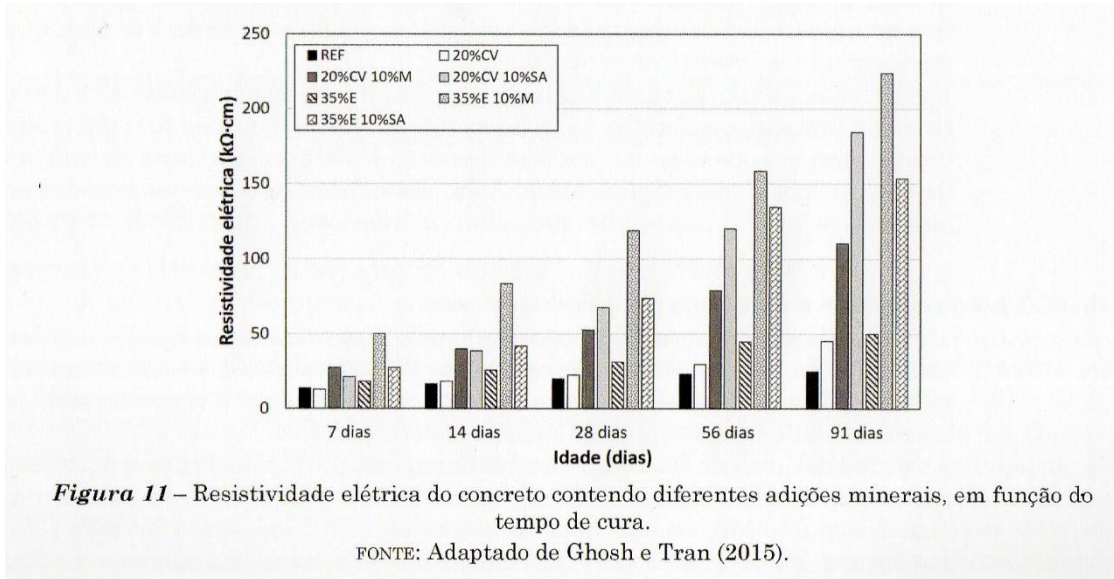


7.1.5 Idade e Tipo de Cura do concreto

A Resistividade Elétrica é sensível às alterações provenientes da pasta de cimento.

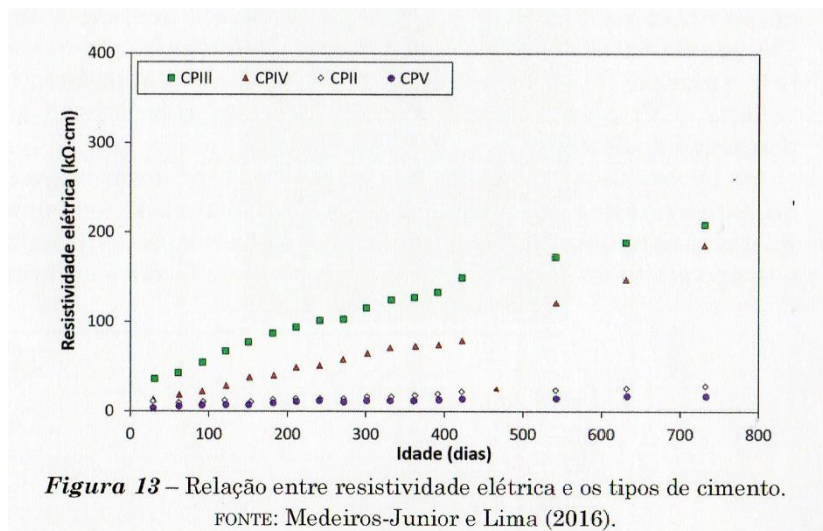
A Hidratação ao longo do tempo de cura, normalmente, reduz a sua porosidade e a forma como esses poros estão interconectados. Devido a isso, tem-se que a Resistividade do concreto aumenta com o tempo, devido ao refinamento da estrutura de poro.

A Resistividade Elétrica aumenta com o avanço do tempo de ensaio para todas as misturas com o mesmo tipo de cimento e mesma relação a/c, conformando que o tempo maior de cura do concreto influencia de forma significativa na Resistividade Elétrica.



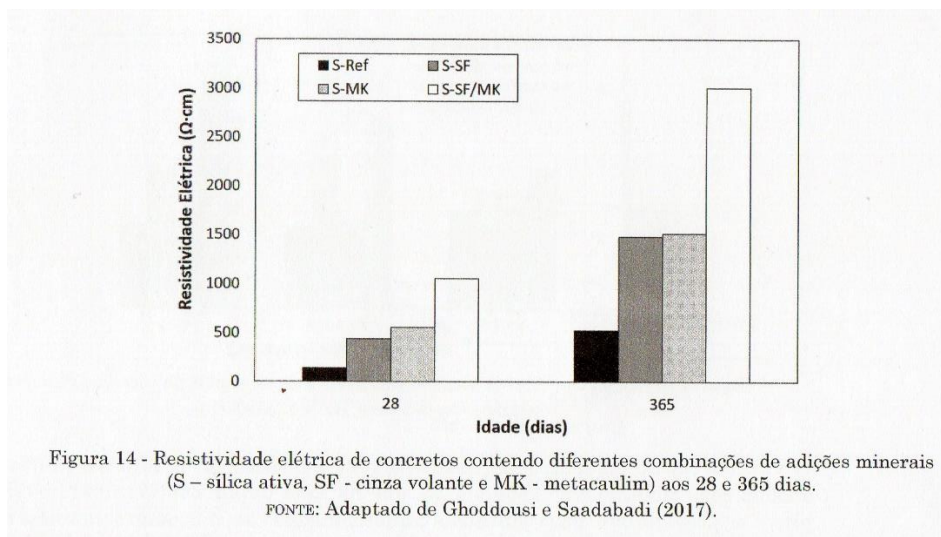
7.1.6 Tipo de cimento e presença de adições minerais

Aumento da Resistividade Elétrica ocorre com: menor relação a/c; presença de adições minerais ativas e maior tempo de cura do concreto.



Adição mineral modifica a microestrutura da matriz cimentícia e propõe uma reestruturação na rede de poros.

Lubeck et al. (2012), por exemplo, observaram um aumento de até 5x na Resistividade Elétrica após a substituição de 50% a 70% do cimento Portland por escória de alto forno.



7.1.7 Parâmetros de Ensaio página 11

A geometria da amostra pode influenciar diretamente na Resistividade Elétrica dos concretos. É necessário compreender que as diferenças significativas nos valores da Resistividade Elétrica ocorrem devido as diferenças existentes no formato e no espaçamento dos eletrodos posicionados na superfície.

No Método dos Quatro Pontos, a distância “a” correspondente ao espaçamento dos eletrodos é um importante dado a ser considerado na verificação das resistividades.

Morris et al. (1996) sugerem uma correção geométrica que estabelece relação entre configuração e espaçamento entre os pontos e formato da amostra (largura e diâmetro). Ao correlacionar essas medidas determinam o fator de forma **Kf**.

Verifica-se que há uma influência do tamanho do corpo de prova nos resultados. As Figuras 15 e 16 bem como a Tabela 5 ilustram esses resultados.

A Norma europeia UNE 83088-2 confirmou a necessidade de se considerar a geometria da amostra e a configuração dos eletrodos em Resistividade Elétrica com possibilidade de minimizar erros.

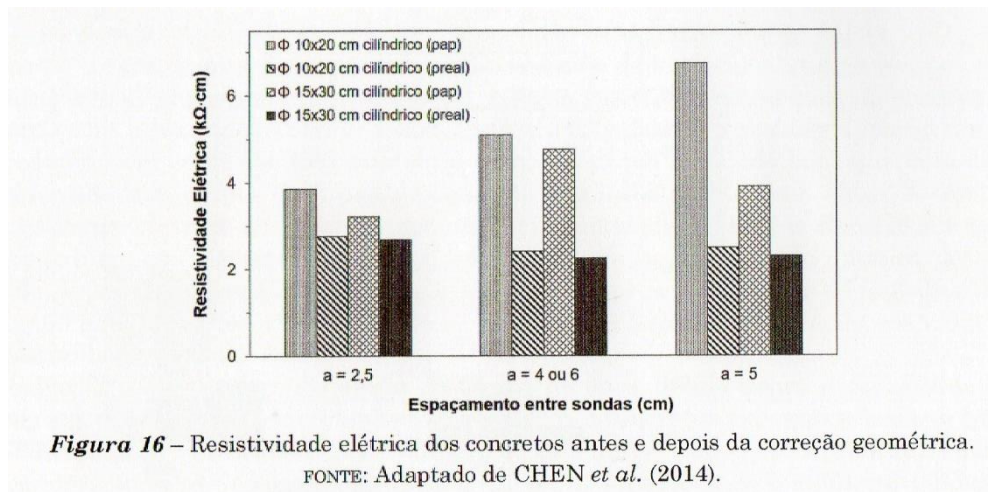
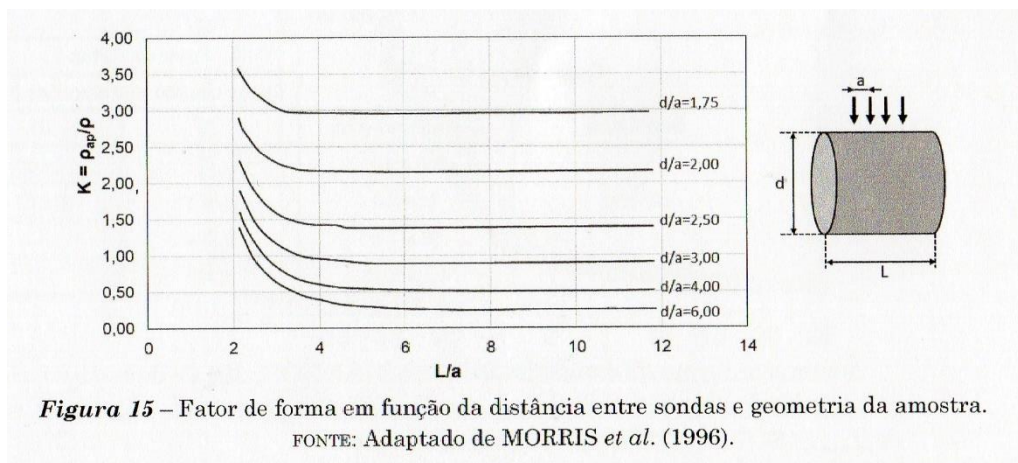


Tabela 5 – Fator de forma, k_p , para diferentes tipos de corpos-de-prova e espaçamento entre pontas das sondas.

Corpo de prova		Fator de forma k_p	
		Espaçamento entre pontas (mm)	
Geometria	Dimensões (cm)	38	50
Cilindro	30 x 15	0,714	0,606
	20 x 10	0,571	0,377
	15 x 7,5	0,384	-
Prisma	4 x 4 x 16	0,172	-

FONTE: UNE 83988-2 (AENOR, 2014).

7.1.8 Temperatura

A temperatura afeta o fluxo de corrente elétrica do concreto, e esse fluxo é intensificado pela presença de íons que possuem elevada condutividade elétrica.

De acordo com a NBR 9204/2012, a Resistividade Elétrica apresenta uma variação de 3% a 5% com o aumento ou diminuição da temperatura em 1°C. A Fig. 18 ilustra essa relação.

As variações de mobilidade dos elétrons em diferentes temperaturas refletem nas variações da resistividade, pois, quando a temperatura aumenta, os elétrons sofrem maior excitação, aumentando a condutividade elétrica, e, conseqüentemente diminuindo a Resistividade Elétrica.

7.1.9 Presença de Armaduras

A Figura 19 mostra a influência de leituras de Resistividade Elétrica em regiões que contenham armaduras ou em regiões livres destas, para um mesmo concreto.

A presença de um elemento mais condutor (aço) na área de influência do aparelho faz com que as leituras sejam subestimadas, comprometendo a confiabilidade dos resultados. A elevada condutibilidade elétrica do aço torna o uso da pacometria importante

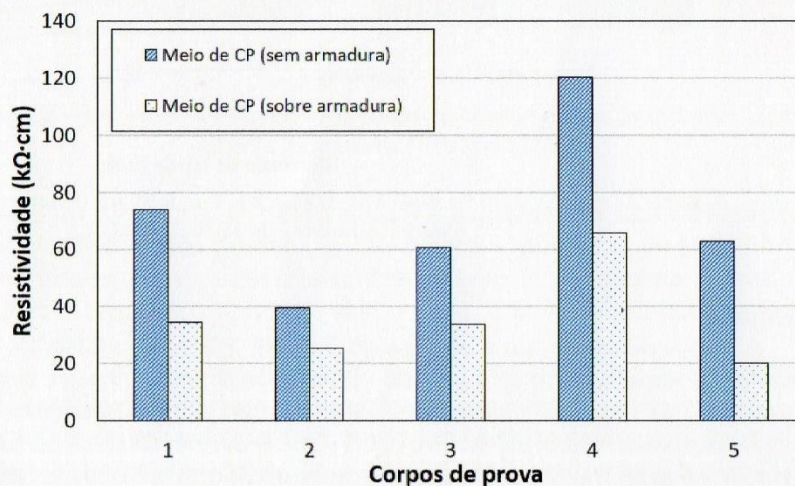


Figura 19 – Influência da presença da armadura sobre as leituras de resistividade elétrica do concreto.
 FONTE: Adaptado de Medeiros (2001).

7.1.10 Métodos de Medida

Método 4 Pontos = chamado método superficial e Método Volumétrico ou Direto.

Cortc e Azzi (2017), mostraram que valores das medidas pelos dois métodos são proporcionais, sendo a Resistividade Elétrica superficial cerca de 50% superiores aos obtidos pelo Método Volumétrico. A Fig. 20 ilustra os resultados.

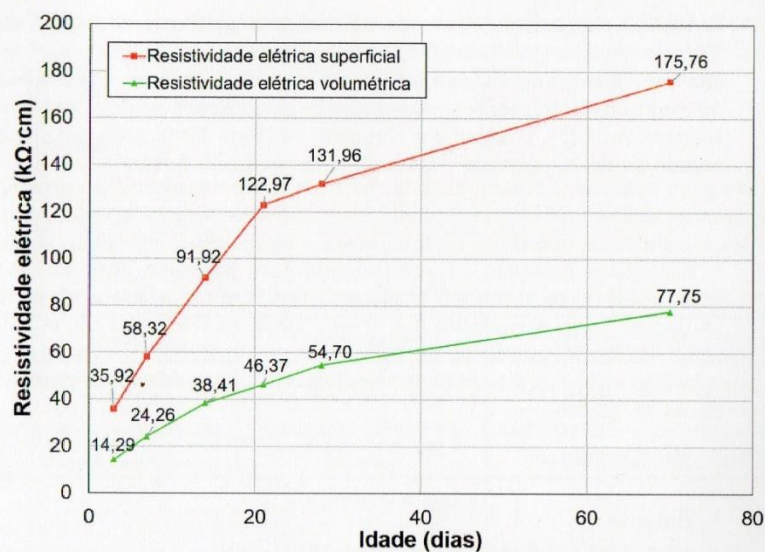


Figura 20 – Comparação entre os valores de resistividade elétrica obtidos pelo método volumétrico (direto) e pelo método superficial (quatro pontos).
 FONTE: Adaptado de Costa e Azzi (2017).

8. MODELOS TEÓRICOS DE PREDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

Modelos teóricos para prever a Vida Útil de estruturas, em sua maioria simulam o ingresso de agentes agressivos no concreto.

Resumidamente, é possível estimar a Resistividade Elétrica do concreto com os seguintes dados de entrada: fator de tortuosidade (m); relação a/c e volume da pasta, em relação ao concreto.

D'Andrea, enquanto estiveram no *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*. Archie (1942) sugeriu, por meio de estudos referentes à exploração de óleo e gás em solos arenosos, que a resistividade da salmoura (ρ_o) e a resistividade da areia (ρ) com poros totalmente preenchidos pela salmoura estão relacionadas por um fator de resistividade (F), conforme a Equação 14. Este fator pode ser obtido a partir da porosidade da areia (ϵ), onde τ é a inclinação da linha formada pela correlação entre F e ϵ .

$$\rho = \rho_o \cdot F = \rho_o \cdot \epsilon^{-\tau} \quad (14)$$

Embora a Equação 14 seja inicialmente proposta para as rochas arenosas, essa relação foi largamente estudada na literatura, demonstrando a possibilidade de sua utilização para o concreto (LI *et al.*, 2003; MAIERHOFER *et al.*, 2010; BREYSSE, 2012; SPRAGG *et al.*, 2013, MENDES *et al.*, 2018). Dessa forma, a Equação 15 estabelece uma ferramenta para estimar a resistividade elétrica do concreto a partir da lei de Archie.

$$\rho = \rho_o \cdot \epsilon^{-m} \quad (15)$$

Em que:

ρ é a resistividade elétrica do concreto ($\Omega \cdot m$);

ρ_o , a resistividade elétrica da fase aquosa do concreto, sendo aproximadamente igual a $0,5 \Omega \cdot m$, de acordo com Buenfeld *et al.* (1986) e Goñi e Andrade (1990);

ϵ representa a porosidade do concreto (% volume) e;

m é parâmetro referente à tortuosidade dos poros do concreto (entre 1 e 2, de acordo com Wong *et al.*, 1984).

Na Equação 15, m é o fator tortuosidade (ANDRADE e D'ANDREA, 2011), o qual representa a conectividade entre os poros e a tortuosidade da rede de vazios. D'Andrea (2010) encontrou valores de m entre 1,7 e 2,7, a depender do tipo de cimento e das edições presentes.

Para calcular a porosidade do concreto, inicialmente, é necessário estimar a porosidade da pasta de cimento (ϵ_p). O modelo clássico de Powers *et al.* (1959) pode ser utilizado para determinar ϵ_p (Equação 16).

$$\epsilon_p = \frac{(a/c) - 0,36\alpha}{(a/c) + 0,32} \cdot 100 \quad (16)$$

Em que:

a/c representa a relação água/cimento;

α está associado ao grau de hidratação do cimento.

Modelar o grau de hidratação (α) é uma atividade discutida por alguns estudos, que pode ser afetada por diferentes fatores, como o tipo de cimento, condições de cura e relação água/cimento (LIN e MEYER, 2009; GAWIN e WYRZYKOWSKI, 2010; RIDING *et al.*, 2012; PANG *et al.*, 2013). Contudo, de acordo com D'Andrea (2010), uma maneira simplificada de estimar α , para materiais cimentícios em condições avançadas de hidratação, é por meio do modelo de Mills (1966), conforme Equação 17.

$$\alpha = \frac{1,031 \cdot (a/c)}{0,194 + (a/c)} \leq 1,0 \quad (17)$$

A porosidade da pasta precisa ser convertida para a porosidade do concreto, visando a aplicação na Equação 15, o que é feito considerando a relação entre o volume de pasta e o volume de concreto, conforme a Equação 18.

$$\epsilon = \epsilon_p \cdot \gamma = \epsilon_p \cdot \frac{\text{Vol}_{\text{pasta}}}{\text{Vol}_{\text{concreto}}} \quad (18)$$

Resumidamente, é possível estimar a resistividade elétrica do concreto (Equação 15) com os seguintes dados de entrada: fator tortuosidade (m), relação água/cimento (a/c),

9. MÉTODOS DE ENSAIO

Sugere-se, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Métodos adotados de determinação da resistividade elétrica do concreto.

Ensaio	Metodologia	Métodos de base
Resistividade elétrica pelo método direto	Aplicação de campo elétrico nas bases do corpo de prova	UNE 83988-1 (AENOR, 2008)
Resistividade elétrica pelo método dos quatro pontos (método de Wenner)	Aplicação de corrente elétrica entre dois eletrodos de potencial	AASHTO T 358-15 (AASHTO, 2015) UNE 83988-2 (AENOR, 2014)

FONTE: Os Autores.

9.1 Preparação, extração e acondicionamento das amostras

Os ensaios podem ser realizados com os corpos de prova moldados, testemunhos (avaliação e/ou perícia) e medidas in loco (avaliação e/ou perícia), exigindo metodologias distintas de preparação e pré-acondicionamento destas.

9.2 Corpos de Prova Moldados

Dimensões de 10 x 20 cm, mínimo de três. No caso de outras dimensões, os valores de Resistividade Elétrica deverão ser corrigidos pelo Fator de Forma, conforme Tabela 5.

O ensaio deve ser realizado com amostras de concreto completamente saturadas. Não devem permanecer fora do ambiente de saturação em água por tempo superior a 5 minutos.

9.3 Testemunhos

As amostras devem ter uma boa representatividade. Deve-se utilizar plano de amostragem para garantir essa representatividade.

No caso de extração, o comprimento mínimo deve ser de 150 mm seguindo-se proporção de 2:1, não podendo conter armaduras. Mínimo três corpos nos locais analisados.

Após extraídos, esses testemunhos devem ser colocados em sacos plásticos individuais e identificados. Em laboratório, esses testemunhos devem ser imersos em água potável, no mínimo, 72 horas antes do ensaio.

9.4 Procedimento Experimental

Determinação da Resistividade Elétrica superficial pelo Método Wenner

Corpo de Prova ou testemunhos na condição saturada. Imersão pelos menos 72 horas antes do ensaio; ger condutor nas quatro pontas.

Medidas: dois para cada uma das quatro marcações; precisão de 0,5 mm; média de oito medidas em cada corpo de prova.

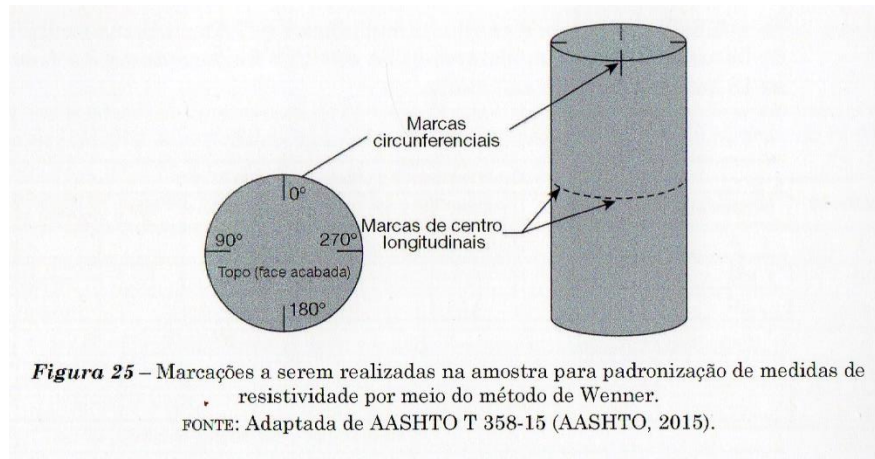


Tabela 10 – Risco de ocorrência de corrosão devido à ação de cloretos, com base nos valores de resistividade elétrica superficial ($k\Omega \cdot cm$) em amostras cilíndricas, saturadas e curadas em diferentes condições.

Espaçamento entre sondas	Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Desprezível
Amostras cilíndricas ($\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$), saturadas em água						
38 mm	< 5	5 - 12	12 - 21	21 - 37	37 - 254	> 254
50 mm	< 3,5	3,5 - 8	8 - 14	14 - 24,5	24,5 - 168	> 168
Amostras cilíndricas ($\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$), saturadas em solução de Ca(OH)_2						
38 mm	< 5,5	5,5 - 13	13 - 23	23 - 41	41 - 279	> 279
50 mm	< 4	4 - 9	9 - 15,5	15,5 - 27	27 - 185	> 185

FONTE: AASHTO (2015) e UNE 83988-2 (AENOR, 2014).