

Limites de resistividade para avaliar a durabilidade do concreto com impermeabilizante de massa e diferentes relações água/cimento

A. Guzmán^{1*} 

* Autor de Contato: mguzman@frm.utn.edu.ar

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.699>

Recebido: 03/08/2023 | Correções recebidas: 23/08/2023 | Aceito: 31/08/2023 | Publicado: 01/09/2023

RESUMO

No presente trabalho avalia-se como a variação da relação água/cimento influencia na resistividade elétrica do concreto; o tipo de cimento selecionado (CPP e CPF); e a incorporação de um impermeabilizante à massa de concreto. Corpos de prova cilíndricos foram feitos nos quais a resistividade foi avaliada usando o método da sonda de Wenner. Comparando os resultados obtidos com os valores limites da literatura, foi possível perceber a importância de limitar a relação água/cimento em 0,45, para aumentar a resistividade do concreto acima de certos limites consagrados. Por outro lado, o cimento CPP (pozolânico) revelou-se o que apresentou melhor desempenho, originando resultados de resistividade mais elevados, enquanto a incorporação do impermeabilizante de massa teve um efeito nulo ou contraproducente neste parâmetro.

Palavras-chave: durabilidade; corrosão; Sonda de Wenner; resistividade elétrica.

Citar como: Guzmán, A. (2023), “*Limites de resistividade para avaliar a durabilidade do concreto com impermeabilizante de massa e diferentes relações água/cimento*”, Revista ALCONPAT, 13 (3), pp. 286 – 298, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.699>

¹CeReDeTeC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza Argentina.

Contribuição de cada autor

Único autor.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2024.

Resistivity thresholds to evaluate durability of concrete with waterproofing agents and different water/cement ratios

ABSTRACT

In the present work it is evaluated how the variation of the water/cement ratio influences the electrical resistivity of the concrete; the type of cement selected (CPP and CPF); and the incorporation of a water repellent. Cylindrical specimens were made on which the resistivity was evaluated using the Wenner probe method. Comparing the results obtained with the threshold values indicated in the literature, it is possible to understand the importance of this degradation mechanism that implies limiting the maximum w/c ratio to 0.45. On the other hand, the CPP cement turned out to be the one with the best performance, giving rise to higher resistivity results, while the incorporation of the water repellent had a null or counterproductive effect on said parameter.

Keywords: durability; corrosion; Wenner probe; electrical resistivity.

Umbrales de resistividad para evaluar durabilidad del hormigón con hidrofugantes y diferentes relaciones agua/cemento

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa cómo influye en la resistividad eléctrica del hormigón la variación de la relación agua/cemento; el tipo de cemento seleccionado (CPP y CPF); y la incorporación de un hidrófugo. Se confeccionaron probetas cilíndricas sobre las que fue evaluada la resistividad mediante el método de la sonda de Wenner. Comparando los resultados obtenidos con los valores umbrales indicados en la literatura, se permite entender la importancia que frente a este mecanismo de degradación implica limitar a 0.45 la máxima relación a/c. Por otra parte, el cemento CPP resultó ser el de mejor desempeño, dando lugar a mayores resultados de resistividad, mientras que la incorporación del hidrófugo tuvo un efecto de nulo a contraproducente en dicho parámetro.

Palabras clave: durabilidad; corrosión; sonda Wenner; resistividad eléctrica..

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Embora o concreto armado se mostre um material muito durável na maioria dos ambientes, o ingresso de cloretos, a carbonatação ou a lixiviação de compostos de cálcio podem favorecer a corrosão da armadura e, portanto, a degradação do concreto. A corrosão da armadura é o resultado da transformação química do ferro (Fe) que a constitui, em óxido férrico hidratado ou simplesmente óxido ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$). Esse óxido tem volume aproximadamente 6 vezes maior que o do ferro que substitui quando não está oxidado. Este aumento de volume na interface armadura/concreto é o que leva à fissuração e perda do concreto de cobertura, e à ferrugem quebradiça e escamosa vermelha/marrom que ocorre nas barras.

Nesse sentido, o concreto confere ao aço uma dupla proteção de natureza: por um lado, é uma barreira física que o separa do meio ambiente e, por outro lado, o líquido encerrado na solução dos poros do concreto é um eletrólito que pode formar uma camada de óxido protetor ao redor da armadura, conhecido como filme passivo, com características muito aderentes, compactas e invisíveis (Irassar, 2001). Este líquido nos poros é constituído principalmente por íons hidróxido (OH) que conferem ao concreto uma elevada alcalinidade natural (pH ~ 12 a 13).

A taxa de corrosão do aço embutido no concreto dependerá, entre outras variáveis, da sua resistividade elétrica. Assim, o concreto, como os demais materiais, possui propriedades que o identificam, sendo a resistividade elétrica uma delas.

Esta propriedade é uma medida da maior ou menor possibilidade de uma corrente elétrica gerada pelo fluxo de íons poder ser conduzida, no nosso caso, através do concreto. O fato de um concreto armado apresentar baixa resistividade elétrica prejudicará sua durabilidade, haja vista que poderá ocorrer alto índice de corrosão na barra de aço quando ela estiver ativa, ou seja, despassivada e com disponibilidade de umidade e oxigênio.

Neste sentido, e com base num estudo realizado na Argentina (Di Maio et al., 2009) num total de 177 estruturas avaliadas, indica-se que a percentagem de estruturas afetadas por processos de corrosão das suas armaduras atinge aproximadamente 16%. A partir de uma análise de 1.512 casos diagnosticados com diferentes patologias no Sul do Brasil (Dal Molin, 1988), foi determinado que a incidência de corrosão das armaduras representa 40% do dano total. O impacto econômico da corrosão nas pontes rodoviárias dos EUA foi avaliado (Koch et al., 2002). A este respeito, o custo directo anual da corrosão de pontes rodoviárias é estimado em 8,3 mil milhões de dólares, consistindo em 3,8 mil milhões de dólares para o custo anual para substituir pontes estruturalmente deficientes nos próximos 10 anos e cerca de 5,0 mil milhões para manutenção. No Reino Unido, a estimativa do Departamento de Transportes de danos por corrosão induzidos por sal é de um total de £616,5 milhões em auto-estradas e pontes rodoviárias principais apenas em Inglaterra e no País de Gales (Wallbank, 1989). Essas pontes representam cerca de 10% do estoque total de pontes do país. Portanto, o custo final pode ser 10 vezes superior ao estimado pelo Departamento de Transportes. As estatísticas para a Europa, Ásia-Pacífico e Austrália são semelhantes.

O exposto mostra como os problemas de degradação das estruturas de concreto armado associados à corrosão das armaduras se revelam muito significativos e, face a isso, os elevados custos envolvidos na reparação destas estruturas afetadas.

Assim, foi oportunamente proposta uma metodologia para previsão da vida útil de estruturas de concreto armado através da utilização de indicadores de corrosão (D'Andrea, 2010). Neste sentido, constatou-se que a resistividade elétrica é o indicador de corrosão mais bem avaliado em termos de técnica e atributos de aplicação. Esta é uma propriedade que se correlaciona adequadamente com a resistência à compressão e a capacidade de transporte de agentes agressivos para o concreto. Por outro lado, a necessidade de poder quantificar a durabilidade do concreto levou à procura de um ensaio que seja capaz de considerar todas as fases envolvidas, desde o fabrico do concreto até à sua cura e endurecimento. A resistividade elétrica como inverso da condutividade-difusividade é

uma propriedade do concreto que permite seu controle de forma não destrutiva. A resistividade é um indicador da pega e da resistência mecânica, do grau de saturação do concreto e, portanto, do grau de cura e da impermeabilidade ou resistência à entrada de substâncias agressivas no concreto. Portanto, é um parâmetro que permite relacionar a microestrutura com o comportamento durável do concreto (Andrade e D'andrea, 2011).

Como o processo de corrosão das armaduras de concreto é parcialmente controlado pelo transporte de íons através da microestrutura do concreto, a capacidade de um material resistir à transferência de carga dependerá de sua resistividade elétrica. Portanto, é de se esperar uma ligação entre o processo de corrosão do aço embutido no concreto e a resistividade elétrica do concreto (Hornbostel et al., 2013).

Por esta razão, e dada a importância da resistividade na durabilidade do concreto armado contra processos corrosivos, as abordagens atuais para o dimensionamento do desempenho do concreto tendem a buscar ser capazes de utilizar parâmetros característicos associados à durabilidade conducentes à obtenção de uma resistividade alvo para o referido concreto, e assim, alcançar uma vida útil em serviço adequada (Andrade, 2018).

Os parâmetros que determinam a resistividade e, portanto, a durabilidade contra a corrosão da armadura, têm a ver com a porosidade do concreto, a composição química da solução dos poros e o grau de saturação destes (Polder et al., 2000).

Quanto à medição da resistividade elétrica, diversas regulamentações contemplam a realização de ensaios em concreto (NBR 9204, 1985; UNE 83988-2, 2008), bem como diversos organismos internacionais relacionados ao estudo de materiais de construção (RILEM TC-154-EMC, 2000; DURAR, 2008). Principalmente no que diz respeito ao método de medição conhecido como quatro pontas (sonda Wenner), este acaba por ser um teste não destrutivo e simples de realizar.

Conforme observado, a resistividade elétrica é um parâmetro que determina a velocidade com que o processo corrosivo se espalha na armadura embutida. Mas, por sua vez, a resistividade que o concreto pode desenvolver depende de certas características, como os materiais utilizados, suas proporções e as técnicas de colocação, compactação e cura.

Portanto, nesta pesquisa avaliamos como aspectos particulares relacionados aos materiais e ao projeto influenciam a resistividade elétrica do concreto, tais como: i) a variação da relação a/c (0,5, 0,6, 0,7 e 0,8); ii) o tipo de cimento selecionado (pozolânico e fillerizado) e iii) a incorporação de um aditivo (hidrorrepelente).

As diferentes combinações entre os parâmetros selecionados para a preparação do concreto de estudo, deram origem à realização de 16 lotes dos quais foram obtidos corpos de prova cilíndricos (100x200 mm), preparados de forma padronizada conforme Norma (IRAM 1534, 2004) e curados por imersão por 27 dias. As medições de resistividade em cada amostra foram realizadas usando o dispositivo CANIN (Canin +, 2012) usando a sonda Wenner (método de 4 pontos).

2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA E MEDIÇÃO USANDO A SONDA WENNER

Uma vez destruída a passividade do aço, seja por carbonatação, lixiviação de compostos de cálcio ou pela penetração do íon cloreto, a velocidade com que o processo de corrosão se desenvolve é controlada pela resistividade elétrica do concreto (que é função direta do teor de umidade) e disponibilidade de oxigênio. A resistividade é uma medida da capacidade do concreto de atuar como eletrólito e, conseqüentemente, de conduzir correntes de corrosão.

A resistividade elétrica é uma propriedade que um material possui de se opor à condução de corrente elétrica através dele. A Lei de Ohm estabelece que a intensidade I da corrente elétrica que circula por um condutor elétrico é diretamente proporcional à diferença de potencial V aplicada, e

inversamente proporcional à resistência R da mesma, que pode ser expressa conforme a seguinte equação:

$$I = V / R \quad (1)$$

onde I é a intensidade da corrente medida em amperes (A), V a diferença de potencial medida em volts (V) e R a resistência elétrica medida em ohms (Ω).

A resistividade é o grau de dificuldade que os elétrons encontram em seus movimentos, e seu valor descreve o comportamento de um material diante da passagem de corrente elétrica, o que dá uma ideia de quão bom ou ruim ele é um condutor. Um valor de resistividade alto indica que o material é um mau condutor, enquanto um valor de resistividade baixo indica que é um bom condutor. A resistividade elétrica é definida como:

$$\rho_p = R * A / L \quad (2)$$

onde ρ_p é a resistividade elétrica medida em ($\Omega \cdot m$), A é a área da seção transversal do material (m^2), L é o comprimento do material (m) e E é o potencial elétrico medido em volts (V). Um esquema representativo de medição de resistividade é apresentado na Figura 1.

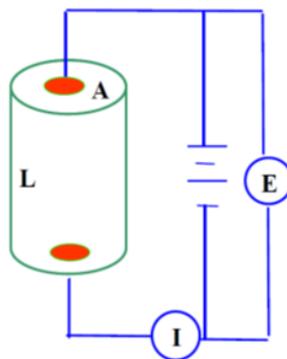


Figura 1. Esquema representativo para determinação da resistividade elétrica.

Para medir a resistividade de estruturas existentes, bem como em corpos de prova de laboratório, é comum utilizar como técnica a sonda Wenner de quatro pontos (Polder et al., 2000) (Figura 2).



Figura 2. Sonda Wenner utilizada. Esquema de medição.

Na superfície a ser medida, os eletrodos são colocados alinhados, separados por uma distância entre si (neste caso $a = 50$ mm), uma corrente alternada é aplicada através dos eletrodos externos e a queda de potencial resultante é medida com o interno eletrodos. A Figura 2 mostra o esquema de medição utilizando a sonda, sendo a resistividade de Wenner medida indicada na seguinte expressão:

$$\rho_w = 2 * \pi * a * V / L \tag{3}$$

3. CONCRETOS ESTUDADOS

Foram utilizados cimento Portland pozolânico (CPP-40) e cimento Portland fillerizado (CPF-40), atendendo a respectiva Norma (IRAM 50000, 2000). Os agregados utilizados foram agregados naturais laminados, com tamanho nominal máximo para agregado graúdo de 19 mm. Quanto ao aditivo hidrorrepelente, foi utilizado um impermeabilizante inorgânico à base de água.

Foram propostos para avaliação dezesseis tipos de concreto, cujos lotes foram dosados por peso, sendo a relação entre os diferentes componentes uma parte de cimento, duas partes de agregado fino e três partes de agregado graúdo (1:2:3). Em todos os casos os pesos dos materiais foram sempre os mesmos, variando apenas o teor de água e o aditivo hidrorrepelente, este último, nos casos de estudo em que foi utilizado.

O aditivo hidrorrepelente foi incorporado à água de amassadura numa dose que correspondeu à retirada de 10% do total previsto de água de amassadura e substituição deste volume pelo do aditivo, resultando assim num volume total de 9 partes de água mais 1 parte de aditivo. A Tabela 1 indica as características das pastas e a designação adotada para elas.

Tabela 1. Designação do estudo pastas. Proporção de materiais.

Designação	Relação a/c	tipo de cimento	Tipo de aditivo	Cimento [C]	Água [para]	Areia [AF]	Brita [AG]	Aditivo [H]
P-05	0,5	CPP-40 Pozolânico (P)	-	1	0,50	2	3	-
P-06	0,6				0,60			-
P-07	0,7				0,70			-
P-08	0,8				0,80			-
P-05-H	0,5		à prova d'água (H)		0,45			0,05
P-06-H	0,6				0,54			0,06
P-07-H	0,7				0,63			0,07
P-08-H	0,8				0,72			0,08
F-05	0,5	CPF-40 Fillerizado (F)	-	1	0,50	2	3	-
F-06	0,6				0,60			-
F-07	0,7				0,70			-
F-08	0,8				0,80			-
F-05-H	0,5		à prova d'água (H)		0,45			0,05
F-06-H	0,6				0,54			0,06
F-07-H	0,7				0,63			0,07
F-08-H	0,8				0,72			0,08

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

A medição da resistividade elétrica do concreto é sensível ao teor de umidade do concreto. Para garantir uma medição adequada e ao mesmo tempo condições iniciais iguais para cada ensaio de estudo, antes da medição, os corpos de prova foram deixados imersos em água por 72 horas, atingindo assim sua saturação. Em seguida, os corpos de prova foram retirados e secos

superficialmente com pano, procedendo-se imediatamente à respectiva medição da resistividade elétrica. A Figura 3 mostra o procedimento de medição realizado em um dos corpos de prova.



Figura 3: Procedimento de medição de resistividade. Dispositivo CANIN. Sonda Wenner.

Medições de resistividade elétrica foram realizadas em cada um dos grupos de pastas de estudo, cada um composto por três corpos de prova. Foram realizadas três medições em cada corpo de prova em sua superfície, com espaçamento de aproximadamente 120°. Foi realizada uma primeira medição geral em todos os corpos de prova e após 15 dias foi realizada uma segunda medição com a mesma metodologia da primeira. A Tabela 2 mostra os valores médios de resistividade de Wenner (ρ_w) obtidos em cada instância de medição e para cada corpo de prova.

Por outro lado, para obter uma leitura confiável, o enchimento de espuma da sonda Wenner foi constantemente umedecido, promovendo assim um bom contato elétrico entre as quatro pontas e a superfície do concreto. Ao mesmo tempo, foi aplicada uma leve pressão da sonda contra a superfície do concreto até que a leitura do aparelho ficasse estável e indicasse um campo “Corrente” superior a 50%, o que garantiu a confiabilidade da medição.

O valor da resistividade para cada pasta correspondeu à média das medidas obtidas em cada grupo, sendo cada uma delas e conforme indicado, composta por três corpos de prova. Da medição realizada obteve-se a resistividade elétrica de Wenner (ρ_w), mas como a amostra era um meio finito, foi necessário considerar um fator de forma (Ff) (UNE 83988-2, 2008; Morris et al., 1996) que leva em consideração as dimensões do corpo de prova e a separação entre as pontas da sonda. A partir deste fator de forma, foi então possível determinar a resistividade elétrica da amostra (ρ_p) de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_p = \rho_w * Ff \quad (4)$$

Para as dimensões dos corpos de prova e da sonda Wenner utilizada, esse fator acabou sendo 0,377. A Tabela 3 apresenta as resistividades médias obtidas para cada uma das pastas avaliadas.

Tabela 2. Médias das resistividades elétricas ρ_w nos corpos de prova de cada lote.

Designação das peças de teste	ρ_w (k Ω . cm) 1ª medição	ρ_w (k Ω . cm) 2ª medição	Designação das peças de teste	ρ_w (k Ω . cm) 1ª medição	ρ_w (k Ω . cm) 2ª medição
P-05-1	28,0	31,0	F-05-1	19,0	18,0
P-05-2	25,0	27,0	F-05-2	22,0	20,0
P-05-3	26,0	27,0	F-05-3	18,0	18,0
P-06-1	22,0	22,0	F-06-1	15,0	15,0
P-06-2	22,0	22,0	F-06-2	14,0	17,0
P-06-3	21,0	23,0	F-06-3	12,0	15,0
P-07-1	15,0	17,0	F-07-1	11,0	11,0
P-07-2	17,0	20,0	F-07-2	13,0	14,0
P-07-3	16,0	19,0	F-07-3	12,0	12,0
P-08-1	11,0	18,0	F-08-1	10,0	11,0
P-08-2	12,0	18,0	F-08-2	11,0	11,0
P-08-3	13,0	17,0	F-08-3	10,0	11,0
P-05-1-H	20,0	25,0	F-05-1-H	20,0	19,0
P-05-2-H	20,0	23,0	F-05-2-H	19,0	18,0
P-05-3-H	22,0	25,0	F-05-3-H	19,0	20,0
P-06-1-H	19,0	18,0	F-06-1-H	16,0	17,0
P-06-2-H	19,0	17,0	F-06-2-H	16,0	15,0
P-06-3-H	18,0	18,0	F-06-3-H	16,0	17,0
P-07-1-H	16,0	17,0	F-07-1-H	11,0	13,0
P-07-2-H	17,0	17,0	F-07-2-H	10,0	13,0
P-07-3-H	17,0	17,0	F-07-3-H	11,0	13,0
P-08-1-H	12,0	16,0	F-08-1-H	8,0	9,0
P-08-2-H	11,0	15,0	F-08-2-H	9,0	9,0
P-08-3-H	11,0	15,0	F-08-3-H	8,0	10,0

A partir dos resultados obtidos, observou-se a dependência da resistividade elétrica da relação a/c, do tipo de cimento e da incorporação do aditivo hidrorrepelente (Figura 4). Neste sentido, as pastas com melhor desempenho em termos dos valores de resistividade elétrica obtidos foram aquelas confeccionadas com cimento pozolânico Portland e sem incorporação do aditivo hidrorrepelente (P-0x).

Tabela 3: Resistividades elétricas médias ρ_w e ρ_p para cada pasta.

Designação	ρ_w (k Ω . cm)	ρ_p (k Ω . cm)
P-05	27.3	10.3
P-06	22,0	8.3
P-07	17.3	6,5
P-08	14,8	5.6
P-05-H	22,5	8,5
P-06-H	18.2	6.8
P-07-H	16,8	6.3
P-08-H	13.3	5,0
F-05	19.2	7.2
F-06	14,7	5.5
F-07	12.2	4.6
F-08	10.7	4,0
F-05-H	19.2	7.2
F-06-H	16.2	6.1
F-07-H	11.8	4,5
F-08-H	8.8	3.3

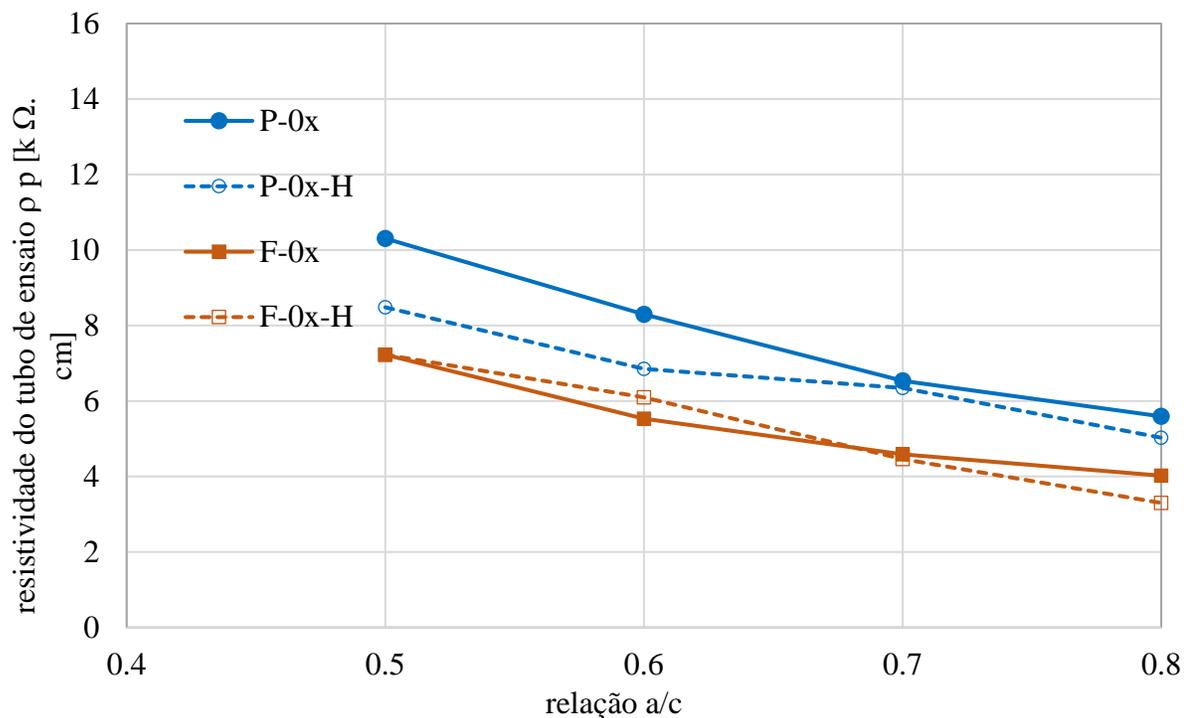


Figura 4: Resistividades elétricas obtidas para as diferentes pastas de estudo.

Dada a falta de regulamentações na República Argentina que abordem a avaliação da resistividade elétrica no concreto, as medidas obtidas no presente estudo foram comparadas com valores limite obtidos por Smith et al. (2004) com base em vários testes empíricos realizados em concreto. Valores de limiar semelhantes foram relatados por Cavalier e Vassie (1981), Hope et al. (1985), Broomfield e Millard (2002), bem como as instruções de uso do analisador de corrosão Proceq (Canin +, 2012).

Estes valores limiaries adotados são utilizados para inferir a probabilidade de corrosão da armadura, geralmente resultando em: i) Se $\rho p > 12 \text{ k } \Omega \cdot \text{cm}$, não é provável que exista corrosão; ii) Se $8 \text{ k } \Omega \cdot \text{cm} < \rho p < 12 \text{ k } \Omega \cdot \text{cm}$ é possível que exista corrosão; e iii) Se $\rho p < 8 \text{ k } \Omega \cdot \text{cm}$ é muito provável que exista corrosão.

Observa-se que em nenhum dos casos de estudo e para as relações a/c consideradas foi possível atingir a zona de baixa probabilidade de corrosão.

Neste sentido e com os resultados experimentais obtidos em cada etapa e representados graficamente, foi realizada uma extrapolação retroativa (Figura 5), representando ao mesmo tempo os limiaries acima mencionados. A partir do gráfico foi possível inferir qual seria a pasta com melhor desempenho (P-0x), qual seria o limite máximo para a relação a/c abaixo do qual concretos com resistividades elétricas conduzem a uma baixa probabilidade de ocorrência do fenômeno de corrosão. Esse limite máximo inferido para a relação a/c para a pasta indicada foi de aproximadamente 0,45. O restante das pastas e para relações a/c inferidas entre 0,4 e 0,45 a partir da extrapolação indicada, apresentariam níveis de resistividade elétrica propícios a uma probabilidade média de ocorrência do fenômeno de corrosão.

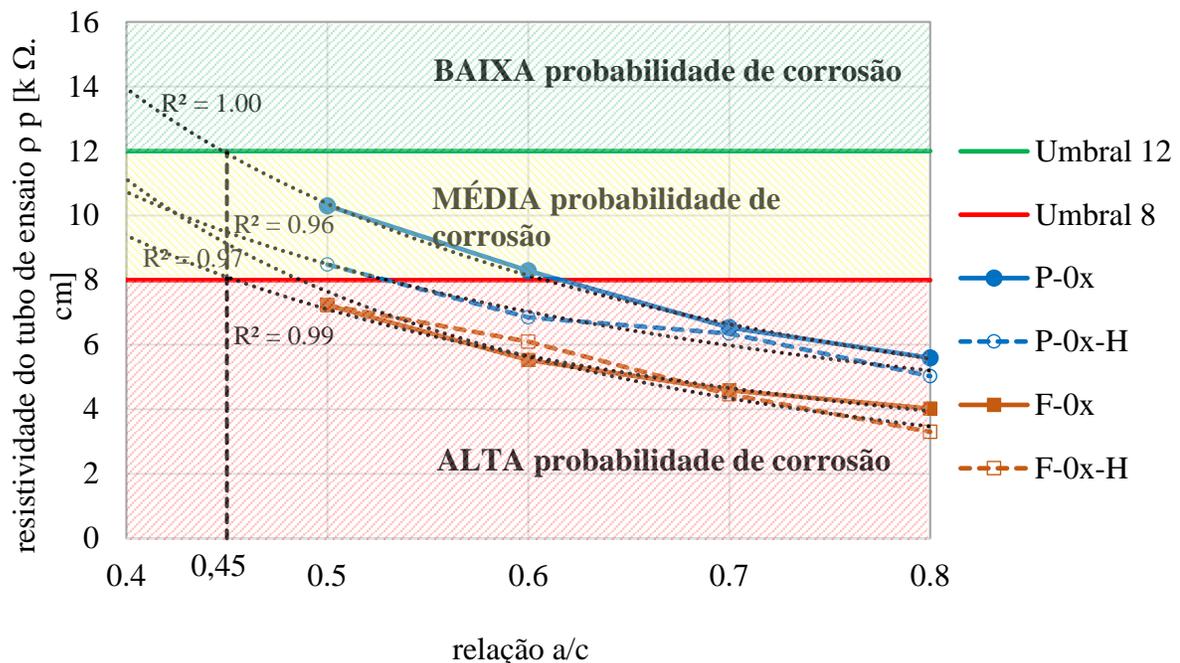


Figura 5: Limiaries de resistividade (Smith et al., 2004).

Particularmente para o caso da pasta P-0x, o referido limite inferido para a relação a/c está na ordem dos valores máximos indicados pela Regulamentação Argentina de Estruturas de Concreto (CIRSOC 201, 2005) em sua Tabela 2.5, ambos para o concreto armado protendido, sendo este um dos requisitos de durabilidade a ter em conta para as condições de exposição mais severas e altamente propício ao desenvolvimento de corrosão na armadura. A Tabela 4, que acaba por ser uma adaptação da referida Tabela 2.5, apresenta as diferentes relações a/c máximas em função do tipo de concreto e da classe de exposição ambiental. De referir que as classes de exposição definidas como A 1, A2 e A3 correspondem ao processo de corrosão por carbonatação; CL, M1, M2 e M3 ao processo de corrosão por cloretos; C1 e C2 para ataque por congelamento-descongelamento; e Q1, Q2 e Q3 a um ataque químico.

Tabela 4: Relação a/c máxima para durabilidade. Adaptado da Tabela 2.5 do CIRSOC 201 (2005).

Relação a/c máxima	Tipos de exposição de estruturas									
	A1	A2	A3 e M1	CL e M2	M3	C1	C2	1° trimestre	2° trimestre	3° trimestre
concreto simples	---	---	---	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Concreto armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Concreto protendido	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40

A obtenção de baixas relações a/c no projeto do concreto permitiria uma matriz cimentícia menos permeável à solução porosa e, conseqüentemente, maior dificuldade na movimentação de elétrons na microestrutura do concreto. Esta situação foi observada nos valores de resistividade obtidos, onde esta aumentou quando a relação a/c diminuiu. Por sua vez, Van Noort et al. (2016), que avaliaram, entre outros efeitos na resistividade, o da relação a/c, observaram que o teor efetivo de água de uma mistura de concreto fresco controla a resistividade do concreto endurecido, portanto uma diminuição na relação a/c. O conteúdo constante de cimento resultará em um aumento na resistividade.

Particularmente para o caso da pasta P-0x, a limitação à relação a/c máxima inferida pela extrapolação dos resultados experimentais, corresponde ao valor limite indicado pela regulamentação argentina como um dos requisitos de durabilidade contra um mecanismo de corrosão a ser tidos em conta no concreto armado e/ou protendido.

Por outro lado, a reação pozolânica levaria a uma diminuição na concentração de Ca(OH)_2 , e com isso, a uma menor carga iônica na solução dos poros, resultando nas pastas feitas com cimento pozolânico que apresentavam as maiores resistividades. Por outro lado, a referida atividade pozolânica permitiria um refinamento dos poros, restringindo a sua conectividade e aumentando a resistência ao fluxo de corrente elétrica. Resultados semelhantes foram obtidos por Medeiros-Junior e Lima (2016) ao avaliarem a resistividade em concretos fabricados com quatro tipos de cimentos disponíveis comercialmente no Brasil, incluindo cimento fillerizado e pozolânico.

Quanto ao uso do aditivo hidrorrepelente, seu efeito nulo ou contraproducente em alguns casos poderia ser devido à presença de sódio e cálcio em sua composição química, o que estaria contribuindo para uma maior carga iônica na solução dos poros. O efeito dos hidrofugantes na resistividade não é relatado na revisão do estado da técnica considerada na presente investigação.

5. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado e na interpretação dos resultados obtidos, apresentam-se as seguintes conclusões:

- Para as relações a/c utilizadas foi possível estabelecer que quanto maior a relação a/c menor a resistividade.
- Projetar um concreto durável contra um mecanismo de degradação que envolva a corrosão do aço implicaria no uso de relações a/c pelo menos não superiores a 0,45.
- Em relação aos tipos de cimentos utilizados, as pastas confeccionadas com CPP tiveram melhor desempenho que aquelas confeccionadas com CPF.
- Em geral, o uso do aditivo impermeabilizante de massa teve efeito nulo a levemente contraproducente nos valores de resistividade elétrica medidos no estado saturado.

- Por fim, a avaliação da resistividade elétrica revela-se uma metodologia de ensaio simples e expedita, permitindo a avaliação de uma propriedade de extrema importância para a interpretação da durabilidade do concreto armado e/ou protendido.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Centro Regional de Desenvolvimento Tecnológico para Construção, Sismologia e Engenharia Sísmica (CeReDeTeC) da Universidade Tecnológica Nacional, Regional de Mendoza.

7. REFERÊNCIAS

- Andrade, C., & D'andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 1(2), 93-101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639585001>
- Andrade, C. (2018), *Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity*. Revista ALCONPAT, 8(3), 264-279. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1985). *NBR 9204: Concreto endurecido - Determinacao da resistividade eletrica-volumetrica*. Rio de Janeiro, Brazil.
- Asociación Española de Normalización. (2008). *UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas*. Madrid, España.
- Broomfield, J., & Millard, S. (2002), *Measuring concrete resistivity to assess corrosion rates*. Concrete, 36(2).
- Canin+ (2012), *“Operating instructions, corrosion analyzing instrument”*, PROCEQ, Suiz
- Cavalier, P. G., Vassie, P. R., & TRRL. (1981), *Investigation and repair of reinforcement corrosion in a bridge deck*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 70(3), 461-480. <https://doi.org/10.1680/jicep.1981.1784>
- Dal Molin D. (1988), *“Fissuras en estructuras de concreto armado: Análisis das manifestacoes típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul”*, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- D'Andrea, R. (2010), *“Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica”*, Doctoral Thesis, Caminos. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.3704>.
- Di Maio A., Sota J., Traversa L. (1999), *“Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años”*, III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad, La Habana, Cuba.
- DURAR (2008), *“Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado”*, CYTED, Córdoba, Argentina.
- Hope, B. B., Ip, A. K., & Manning, D. G. (1985), *Corrosion and electrical impedance in concrete*. Cement and concrete research, 15(3), 525-534. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90127-9)
- Hornbostel, K., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—A literature review*. Cement and concrete composites, 39, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). *IRAM 1534: Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*. Buenos Aires, Argentina, IRAM.

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000). *IRAM 50000: Cemento para uso general*. Buenos Aires, Argentina, IRAM
- Irassar, E. (2001), “*Durabilidad del hormigón estructural*”, XIV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón y Seminario de Durabilidad del Hormigón Estructural, Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
- Koch, G. H., Brongers, M. P., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (2002), *Corrosion cost and preventive strategies in the United States* (No. FHWA-RD-01-156, R315-01). United States. Federal Highway Administration.
https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40697/dot_40697_DS1.pdf
- Medeiros-Junior, R. A., & Lima, M. G. (2016), *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. *Construction and Building Materials*, 107, 11-16.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- Morris W., Moreno E., Sagüés A. (1996), *Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe*, *Cement and Concrete Research*, 26, 1179-1787.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00175-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00175-5)
- Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland O., Gulikers J., Weider, R., Raupach M. (2000), *Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete*, RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion*, *Materials and Structure*, Vol 33, 603-611. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)
- Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (2005). *CIRSOC 201*. INTI-CIRSOC.
- RILEM TC-154-EMC. (2000), *Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete*, *Materials and Structures*, Vol. 33, 603-611. <https://www.rilem.net/groupe/154-emc-electrochemical-techniques-for-measuring-metallic-corrosion-in-concrete-154>
- Smith, K. M., Schokker, A. J., & Tikalsky, P. J. (2004), *Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations*. *Materials Journal*, 101(5), 385-390. <https://doi.org/10.14359/13424>
- Van Noort, R., Hunger, M., & Spiesz, P. (2016), *Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative test method*. *Construction and Building Materials*, 115, 746-759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.054>
- Wallbank, E. J. (1989). *The performance of concrete in bridges. A survey of 200 highway bridges*. <https://worldcat.org/es/title/59085774>