

Influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto e na cinética de corrosão da armadura

L. C. Chiaradia^{1*} , F. C. R. Almeida¹ , M. T. P. Aguiar¹ , E. J. P. Figueiredo² 

* Autor de Contato: engenheirolcc@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.709>

Recebido: 07/11/2023 | Correções recebidas: 28/11/2023 | Aceito: 07/12/2023 | Publicado: 01/01/2023

RESUMO

O trabalho avaliou a influência da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica e na cinética de corrosão em estruturas de concreto armado sujeitos a cloretos. Os concretos foram caracterizados fisicamente e mecanicamente aos 28 e 90 dias. Após 204 dias, as amostras foram submetidas a ciclos de ida e volta de temperatura partindo dos 55°C até -5°C. Os resultados indicaram que a cinética de corrosão e a resistividade elétrica variaram com a alteração da temperatura. Em temperaturas mais elevadas, os traços contaminados com Cl⁻ demonstraram uma alta probabilidade de corrosão e uma diminuição dos valores de resistividade elétrica. Porém, na temperatura negativa a probabilidade de corrosão foi insignificante e os valores de resistividade elétrica os mais elevados.

Palavras-chave: a concreto armado; durabilidade; corrosão; resistividade elétrica; temperatura.

Citar como: Chiaradia, L. C., Almeida, F. C. R., Aguiar, M. T. P., Figueiredo, E. J. P. (2024), "Influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto e na cinética de corrosão da armadura", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 1 – 12, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.709>

¹ Departamento de Materiais de Construção, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-Mg, Brasil.

² Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Figueiredo, E. J. P contribuiu com a ideia original e orientação do trabalho e correções, os autores Aguiar, M. T. P. e Almeida, F. C. R contribuíram com a co-orientação do trabalho auxiliando no desenvolvimento, tratamento de dados e escrita, o autor Chiaradia, L. C. contribuiu com o desenvolvimento da metodologia, experimentação, coleta de dados, tratamento de dados, redação do trabalho e apresentação final dos resultados.

Licença Creative Commons

Copyright (2024) 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 terceiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2024.

Influence of temperature on the electrical resistivity of concrete and kinect corrosion of reinforcement

ABSTRACT

The work evaluated the influence of temperature on the concrete electrical resistivity measurements and corrosion kinetics in reinforced concrete structures subjected to chlorides. The concretes were mechanically characterized at 28 and 90 days. After 204 days, the specimens were subjected to temperature cycles ranging from 55 °C to -5 °C. The results indicated that the corrosion kinetics and electrical resistivity varied with the temperature changes. At higher temperatures, dosages contaminated with Cl⁻ showed a high probability of corrosion and a decrease in electrical resistivity values, however, at negative temperature, the probability of corrosion was insignificant and the electrical resistivity values were the highest.

Keywords: reinforcement concrete; durability; corrosion; electrical resistivity; temperature.

Influencia de la variación de temperatura en la resistividad eléctrica del hormigón y en la cinética de corrosión de la armadura en hormigón armado

RESUMEN

El trabajo evaluó la influencia de la variación de temperatura em las medidas de resistividad eléctrica y cinética de corrosión em estructuras de hormigón armado sometidas a cloruros. Los hormigones se caracterizaron física y mecánicamente a los 28 y 90 días. Después de 204 días, las muestras se sometieron a ciclos de temperatura de ida y vuelta de 55°C hasta -5°C. Los resultados indicaron que la cinética de corrosión y la resistividad eléctrica variaron com los cambios de temperatura. A temperaturas más altas, las trazas contaminadas con Cl⁻ mostraron una alta probabilidad de corrosión y una disminución em los valores de resistividad eléctrica, sin embargo, a temperatura negativa la probabilidad de corrosión fue insignificante y los valores de resistividad eléctrica fueron los más altos.

Palavras-chave: hormigón armado; durabilidade; corrosión; resistividad eléctrica; temperatura.

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

As estruturas de concreto armado estão expostas a diversas condições ambientais, como variação de umidade, variação de temperatura e contato com elementos agressivos (Andrade *et al.*, 1988; Yousuf *et al.*, 2017). Tais fatores podem provocar a corrosão da armadura, que é um dos principais problemas das construções de concreto armado. Ela prejudica a durabilidade das estruturas e pode gerar reparos dispendiosos. Em alguns casos, pode ser necessário a substituição completa ou parcial das armaduras e/ou reforços estruturais a fim de se estender a durabilidade e prolongar a vida útil do concreto armado (Helene, 1993; Laurentino *et al.*, 2021). Isto ocorre pois os produtos oriundos da corrosão são expansivos, geram fissuras no concreto, diminuem a aderência entre a armadura e o concreto, além de causar uma perda de seção na armadura prejudicando a capacidade portante a estrutura (Gjørsv, 2015; Chauhan e Sharma, 2019).

Na avaliação da durabilidade, no que tange a corrosão das armaduras, deve-se levar em consideração a caracterização do concreto e do ambiente onde ficará exposto. A escolha correta dos materiais e definição compatível dos métodos construtivos a serem utilizados, assim como a manutenção ao longo de sua utilização também influencia o desempenho da estrutura no decorrer de sua vida útil (Figueiredo e Meira, 2013).

Os íons cloretos possuem um papel importante no processo de despassivação da película protetora da armadura de aço. A corrosão induzida por cloretos é uma das causas mais comuns e preocupantes de degradação das estruturas de concreto armado, pois são do tipo pite, formadas em áreas localizadas e profundas (Torres, 2011). Nestes pontos onde os cloretos juntamente com a água e o oxigênio entram em contato com o aço formam-se as zonas anódicas, ocorre a movimentação de íons que ocasionam a redução da barra e conseqüentemente a diminuição de sua seção e perda de sua resistência (Figueiredo, 2005).

Diferentes ensaios analisam o estado de corrosão das armaduras e as condições de mobilidades de íons no interior do concreto. Ensaio não destrutivo para determinação da resistividade elétrica e avaliação da corrosão são muito utilizados para inspeção e monitoramento de estruturas, por serem rápidos e de fácil execução. Com estas técnicas é possível obter informações com relação às condições internas do concreto e ao processo corrosivo da armadura (Wosniack *et al.*, 2021).

Contudo, os resultados obtidos através de ensaios de monitoramento podem sofrer alterações devido a variação da temperatura do concreto. Esse parâmetro influencia diretamente na mobilidade iônica e, conseqüentemente na cinética de corrosão. Compreender como a estrutura se comporta frente a ação de agentes agressivos em diferentes temperaturas contribui para o entendimento e interpretação dos resultados dos ensaios realizados em diversas condições climáticas (Chauhan e Sharma, 2019). Raphael e Shalon (1971) em seu estudo demonstrou que a cada 20°C acréscimos na temperatura o processo corrosivo duplica Já Tuutti (1982), investigou os efeitos das baixas temperaturas nas estruturas de concreto e concluiu que a velocidade de corrosão do aço é reduzida 10 vezes a cada diminuição na ordem de 20 °C (em temperaturas abaixo de 0°C); Alhozaimy *et al.* (2014), concluíram que o aumento de temperatura acarretou alterações no filme passivador da armadura, desestabilizando as fases do óxido de tal forma a potencializar o processo corrosivo

Noort, (2016); Mendes, (2018) e Medeiros e Júnior, (2019), concluíram que a relação a/c influencia de maneira inversamente proporcional os valores da resistividade elétrica nos concretos, sendo que quanto menor a relação a/c maior a resistividade do concreto.

Neste contexto, nessa pesquisa se analisa o efeito da relação água/cimento e variação de temperatura na resistividade elétrica e cinética de corrosão de armaduras em concretos contaminados e não contaminados com cloretos.

2. MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais.

Utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) devido ao baixo teor de adições (90-100% de clínquer + sulfato de cálcio, em massa).

Como agregados, foram utilizados areia quartzosa (miúdo) e brita gnaisse (graúdo), conforme caracterização apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física dos agregados.

Propriedade	Areia quartzosa	Brita Gnaisse
Massa unitária	1,301 kg/dm ³	1,388 kg/dm ³
Massa específica	2,604 kg/dm ³	2,646 kg/dm ³
Absorção	0,60 %	0,50 %
Módulo de finura	2,068	5,603
Diâmetro máximo	1,2 mm	12,55 mm
Coefficiente de vazios	50,04 %	47,52 %

Como armadura foi utilizado barras de aço CA50, de 10 mm de diâmetro nominal. A escolha do diâmetro foi devido a sua ampla utilização comercial no mercado da construção civil. Antes de sua utilização as barras foram cortadas na dimensão pré-estipulada e submetidas ao processo de limpeza de acordo com a norma G-1/03 (ASTM, 2017).

Foram utilizados quatro traços básicos que diferem na relação a/c e na contaminação com cloretos. Nos concretos contaminados foram adicionados na água de amassamento 1,65% de cloreto de sódio em relação a massa de cimento, a fim de alcançar 1% de cloretos na composição do concreto, devido a composição atômica do cloro no composto NaCl.

Os traços são apresentados na tabela 2. Para se alcançar a trabalhabilidade nos concretos de relação a/c 0,45 foi utilizado um aditivo superplastificante de segunda geração (Sika® Viscocrete®), com pH = 4,5 ± 1,0 e isento de íons cloretos.

Tabela 2. Traços dos concretos (em massa)

Identificação	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	NaCl
0,60 ref.	1	2	2,5	0,60	-	-
0,60 Cl⁻	1	2	2,5	0,60	-	0,0165
0,45 ref.	1	2	2,5	0,45	0,003	-
0,45 Cl⁻	1	2	2,5	0,45	0,003	0,0165

Todos os traços confeccionados alcançaram medidas 105±5mm nos ensaios realizados de teste de abatimento de tronco de cone (slump test), apresentando assim consistência e trabalhabilidade similares.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento para a caracterização dos concretos análise da resistividade elétrica quando submetidos aos ciclos de temperatura e corpos de prova prismáticos de 20 cm de comprimento, 20 cm de largura e 7 cm de altura, com uma camada de cobrimento de 30 mm em duas faces do corpo de prova, para a exposição aos ciclos de temperatura para avaliação do potencial de corrosão e velocidade de corrosão.

Os corpos cilíndricos foram desmoldados após 24h da moldagem e os prismáticos após 48h conforme indicado pela norma NBR 5738 (ABNT,2015). Após a desmoldagem os corpos de prova foram identificados e colocados para a cura em câmara úmida com temperatura de 24°C ±5°C e

umidade 95% \pm 5%. Os corpos permaneceram nestas condições até as etapas de caracterização física e mecânica que se deu aos 28 e 90 dias de idade e até a exposição aos ciclos de temperatura que aconteceu a partir dos 204 dias de idade.

2.2 Programa Experimental.

A caracterização física e mecânica dos concretos se deu em corpos de prova cilíndricos pelos ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739, 2018), módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada (ASTM C215, 2019), absorção de água e índice de vazios (ABNT NBR 9778, 2009) nas idades de 28 e 90 dias. Paralelamente, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida e monitorados até apresentarem estado ativo de corrosão da armadura em amostras contaminadas (período de 204 dias).

Em seguida as amostras foram submetidas à exposição dos ciclos de temperatura para análise da resistividade elétrica superficial (AASHTO T358,2015), potencial de corrosão (ASTM C876, 2015) e velocidade de corrosão (pelo método de polarização linear com intervalo de varredura de \pm 15mV em relação ao potencial de circuito aberto). Para os ensaios de potencial de corrosão foi utilizado um eletrodo de referência de Cobre/Sulfato de Cobre, e para o ensaio de polarização linear foi utilizado eletrodo de referência de Calomelano saturado e contra eletrodo de chapa de inox nas dimensões da maior face do corpo de prova prismático.

Os ciclos de temperatura se deram pela variação da temperatura, onde os corpos de prova foram submetidos a um ciclo de ida e volta partindo da temperatura de 55°C, até -5°C em uma câmara climática com controle de temperatura e umidade. As temperaturas de estabilização para realização dos ensaios foram: 55°C, 40°C, 22°C, 10°C, 5°C e -5°C.

Para aferição da temperatura superficial e interna dos corpos de prova, foram utilizados um termômetro infravermelho de superfície e termopares inseridos no interior do concreto durante a moldagem, na mesma profundidade das barras de aço. O tempo de exposição das amostras às temperaturas foi o necessário para que se obtivesse uma estabilização da temperatura na superfície e no interior da amostra. Foi admitido uma variação de \pm 2°C para cada faixa de temperatura definida no estudo. A umidade foi fixada em 80%, de maneira que se tivesse uma alta umidade interna nos poros do concreto, porém sem a saturação deles, permitindo a penetração de oxigênio. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados foram analisados estatisticamente por meio do método da análise de variância (ANOVA) e pelo teste par a par (Teste Tukey), quando necessário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos concretos.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados médios das propriedades analisadas nos ensaios de caracterização dos concretos nas duas idades analisadas.

Através da análise estatística foi possível verificar que não houve uma evolução significativa nos valores de absorção de água no traço 0,60 contaminado nas diferentes idades. Os valores das amostras com relação a/c 0,45 contaminados e não contaminados podem ser consideradas estatisticamente equivalentes ao serem comparadas na mesma idade.

Os resultados de índice de vazios para as duas idades dos traços analisados, somente apresentaram uma variação relevante estatisticamente para o traço de relação a/c 0,45 contaminado.

Nos resultados de resistência à compressão, somente o traço 0,45 contaminado não apresentou uma evolução dos resultados significativa estatisticamente ao se comparar os resultados nas duas idades.

Tabela 3. Caracterização dos concretos no estado endurecido

Traço	0,60 ref.		0,60 Cl ⁻		0,45 ref.		0,45 Cl ⁻	
Idade	28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Absorção de água (%)	7,76	7,41	6,82	6,72	4,81	4,55	4,92	4,55
Índice de vazios (%)	16,47	15,98	14,59	14,36	10,69	10,15	10,92	10,14
Resistência à compressão (MPa)	33,00	39,00	35,00	40,00	57,00	66,00	49,00	54,00
Módulo de elasticidade (GPa)	36,00	35,00	36,00	35,00	36,00	36,00	37,00	37,00

Ao se comparar os resultados dos traços com relação a/c 0,60, foi possível constatar por meio do teste Tukey que não há diferença estatística entre os resultados para os traços contaminados e os não contaminados na mesma idade.

Os módulos de elasticidade não apresentaram variação entre os traços e idades analisadas, o que pode ser explicado devido ao método adotado.

3.2 Ciclos de temperatura.

O ciclo de variação de temperatura se iniciou aos 204 dias de idade, quando se observou indícios de atividade corrosiva nos corpos de prova contaminados com cloretos. Na Figura 1 são apresentados os valores de potencial de corrosão dos corpos de prova com e sem a contaminação de cloretos, assim como as faixas de corrosão da armadura segundo a norma C876-15 (ASTM, 2015).

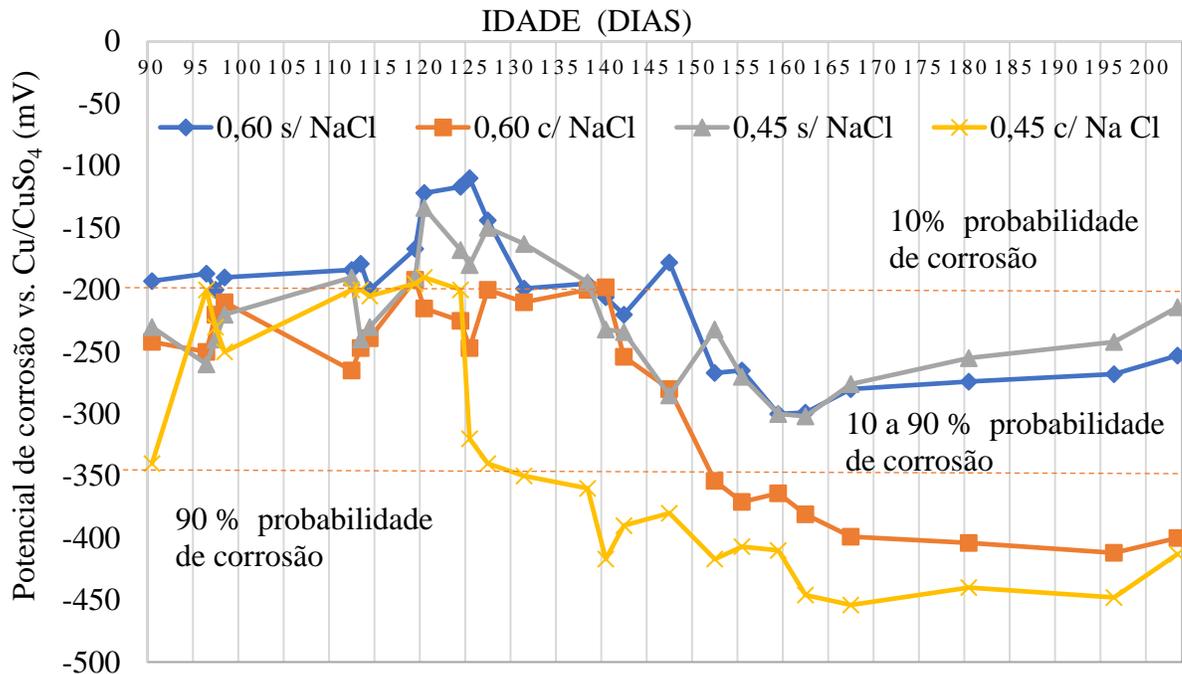


Figura 1. Potencial de corrosão durante a fase de monitoramento

Após constatado o princípio do processo corrosivo nos corpos de prova armados contaminados por cloretos, deu-se início a etapa de exposição aos corpos de prova. A figura 2 apresenta os valores de potencial de corrosão aferidos para os traços não contaminados com Cl⁻ em função da variação de temperatura do concreto.

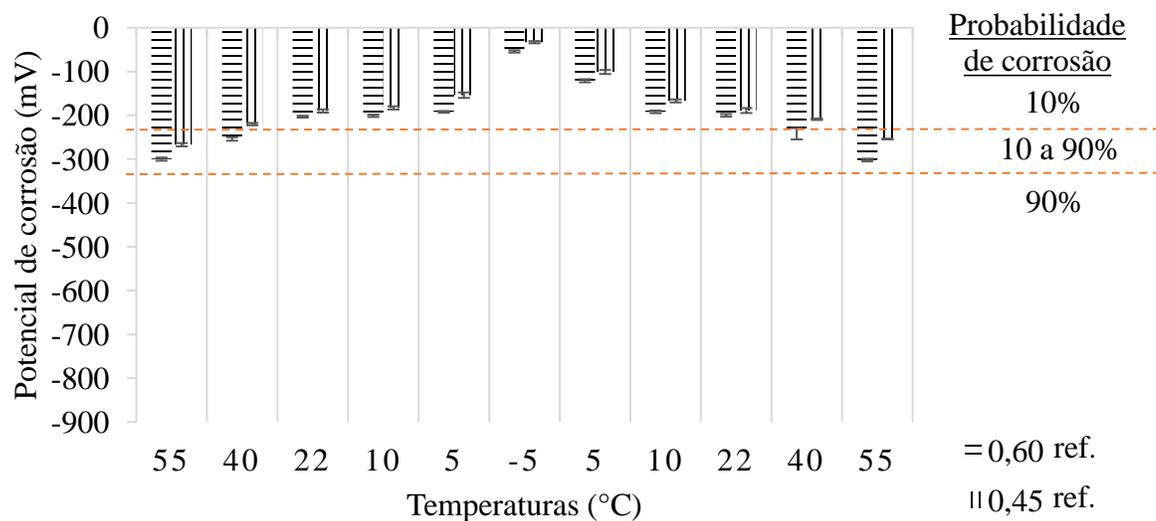


Figura 2. Potencial de corrosão (eletrodo Cu/CuSO₄) em diferentes temperaturas em traços não contaminados por cloretos (ref.).

Para as duas relações a/c nas amostras não contaminadas, foi possível perceber que com o aumento da temperatura os valores de potencial de corrosão obtidos migraram de uma probabilidade de 10% de corrosão para a zona da incerteza (10 a 90%), sobretudo na temperatura mais elevada. Percebe-se que por todo o ciclo nenhum dos traços não contaminados atingiram a zona de alta probabilidade de corrosão. O traço com relação a/c 0,60 apresentou valores mais eletronegativos comparados ao traço de relação a/c 0,45.

A figura 3 apresenta os valores de potencial de corrosão dos traços contaminados com Cl⁻ em função da variação de temperatura do concreto.

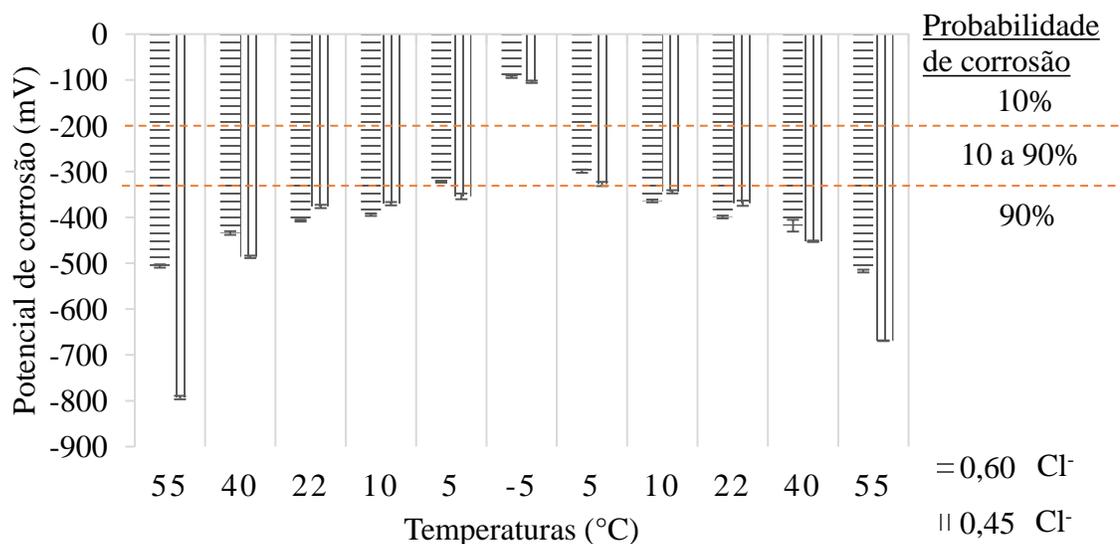


Figura 3. Potencial de corrosão (eletrodo Cu/CuSO₄) em diferentes temperaturas em traços contaminados por cloretos (Cl⁻).

Através da análise dos resultados pode se inferir que leituras realizadas abaixo da temperatura de 10°C geraram valores que se localizam na zona da incerteza para os traços contaminados. E na temperatura negativa os resultados indicaram uma probabilidade de corrosão de 10% mesmo estando as armaduras despassivadas. Por outro lado, em temperaturas acima de 22°C existiu uma tendência de se observar resultados mais eletronegativos, especialmente à temperatura mais

elevada (55°C). Nos traços contaminados com cloretos não foi observado a tendência do traço com menor relação a/c permanecer com valores menos eletronegativos, ocorreu uma variação entre eles ao longo do ciclo.

Os resultados de velocidade de corrosão em função da variação da temperatura para as amostras não contaminadas são apresentados na Figuras, assim como as faixas de análise propostas por Andrade *et.al.*, (1997).

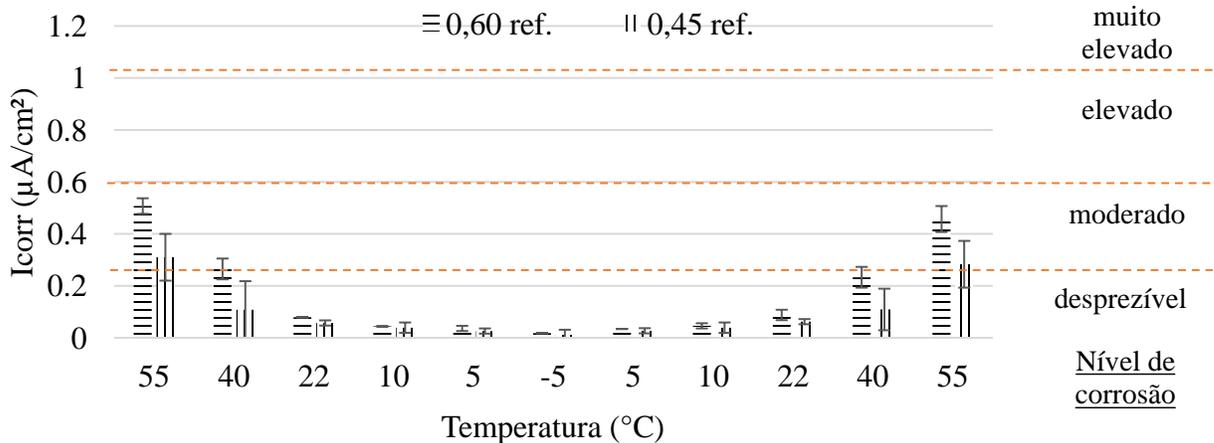


Figura 4. Velocidade de corrosão em diferentes temperaturas em traços não contaminados por cloretos (ref.).

Os concretos não contaminados em temperaturas de 22°C e inferiores apresentaram níveis de corrosão desprezíveis. Na temperatura mais elevada o traço de relação a/c 0,60 apresentou valores médios na região limítrofe entre níveis de corrosão moderado e elevado.

A figura 5 apresenta os resultados de velocidade de corrosão em função da variação da temperatura para as amostras contaminadas com cloretos.

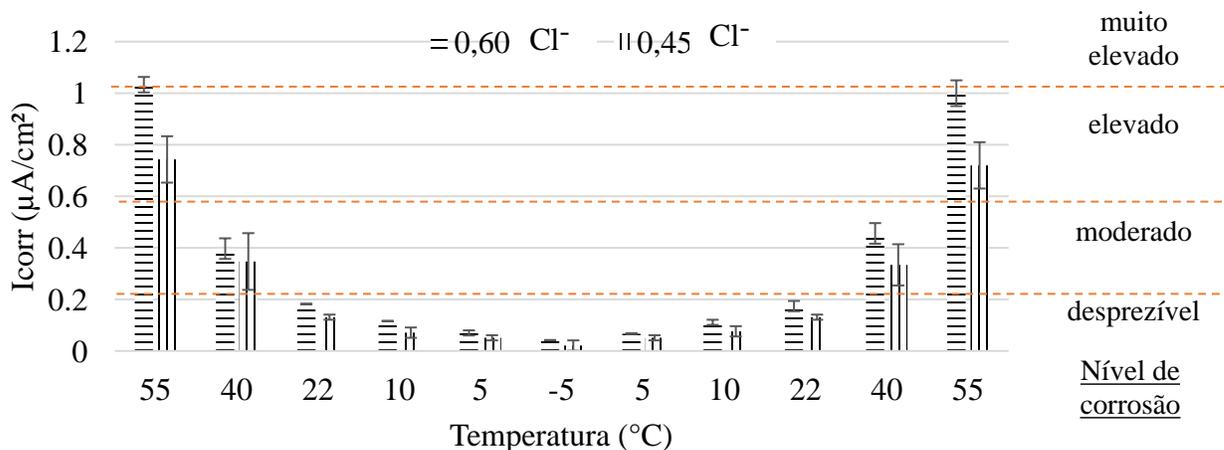


Figura 5. Velocidade de corrosão em diferentes temperaturas em traços contaminados por cloretos (Cl⁻).

Ao serem expostos à mais alta temperatura do ciclo (55°C), o concreto de relação a/c 0,60 contaminado atingiu um nível de corrosão muito elevado, enquanto o traço a/c 0,45 contaminado apresentou um nível de corrosão elevado. Nas temperaturas abaixo de 10°C, os concretos contaminados apresentaram níveis de corrosão desprezíveis mesmo estando a armadura despassivada.

Percebeu-se que, tanto para os traços contaminados e não contaminados a maior variação dos resultados ocorreu nas temperaturas mais elevadas. Isto se dá, de acordo com Østvik (2004), ao fato de que em temperaturas mais elevadas a probabilidade de duas moléculas colidirem é maior. Essa maior taxa de colisão gera um aumento na energia cinética afetando a energia de ativação das reações químicas.

A variação da temperatura gerou uma influência diretamente proporcional à velocidade de corrosão, sendo que à medida que a temperatura era elevada a velocidade de corrosão também aumentava.

Os traços de relação a/c 0,45 apresentaram valores inferiores de velocidade de corrosão ao longo de todo o ciclo de exposição comparativamente aos traços com relação a/c 0,60.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial para os corpos de prova submetidos ao ciclo de temperatura para os traços não contaminados são apresentados na figura 6, assim como as faixas de indicação de risco de corrosão para concretos contaminados com cloretos, sugeridas por Bungey e Millard (2001).

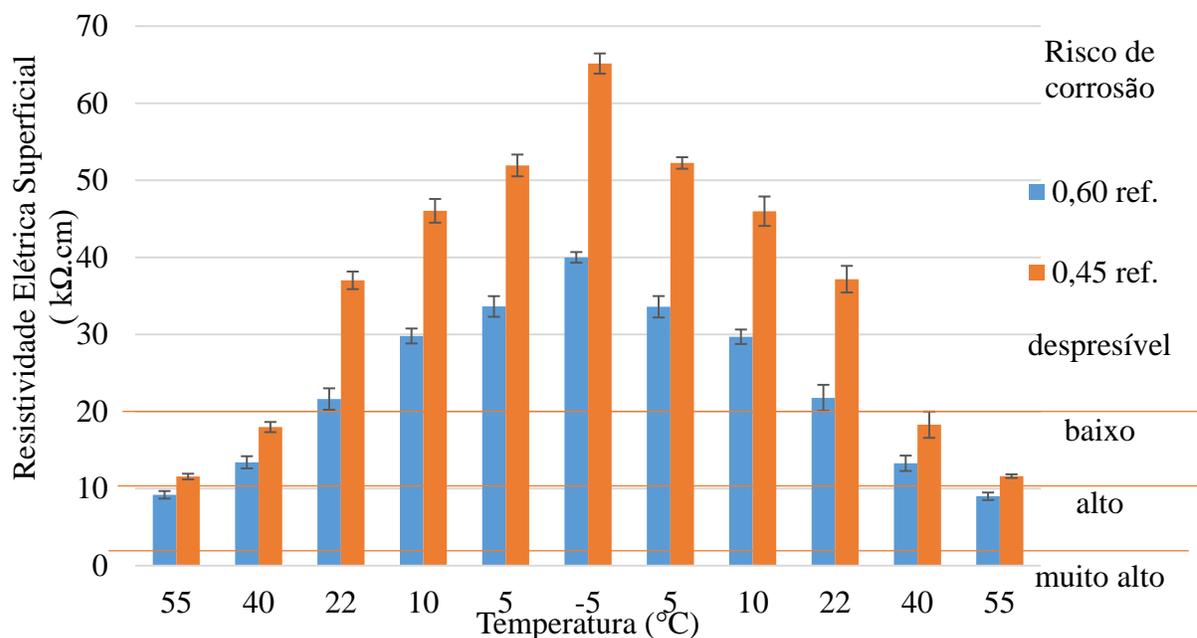


Figura 6. Resistividade elétrica superficial em diferentes temperaturas em traços não contaminados por cloretos (ref.).

Os concretos não contaminados apresentaram uma variação na escala de análise para risco de corrosão. Nas temperaturas de 22°C e inferiores, os traços permaneceram na faixa de risco desprezível para as duas relações a/c. Sendo que, na temperatura de 40°C o traço com relação a/c 0,45 esteve bem próximo da zona limítrofe entre desprezível e baixo risco de corrosão. Já o traço com relação a/c 0,60 à temperatura de 40°C se localizou na região de baixo risco de corrosão e na temperatura mais elevada na zona limítrofe entre baixo e alto risco de corrosão.

A Figura 7 apresenta os resultados de resistividade elétrica superficial em função da variação de temperatura para os traços contaminados por cloretos.

Os concretos contaminados apresentaram um comportamento similar aos não contaminados, seguindo a mesma tendência de variação de faixas ao longo da exposição às diferentes temperaturas.

Foi possível constatar que a variação da temperatura influenciou a resistividade elétrica de maneira inversamente proporcional, ou seja, à medida que a temperatura se elevou a resistividade elétrica dos concretos diminuiu.

Foi também percebido a influência da relação a/c nos resultados, sendo que os maiores valores de resistividade elétrica ocorreram no traço de menor relação a/c para todas as temperaturas analisadas.

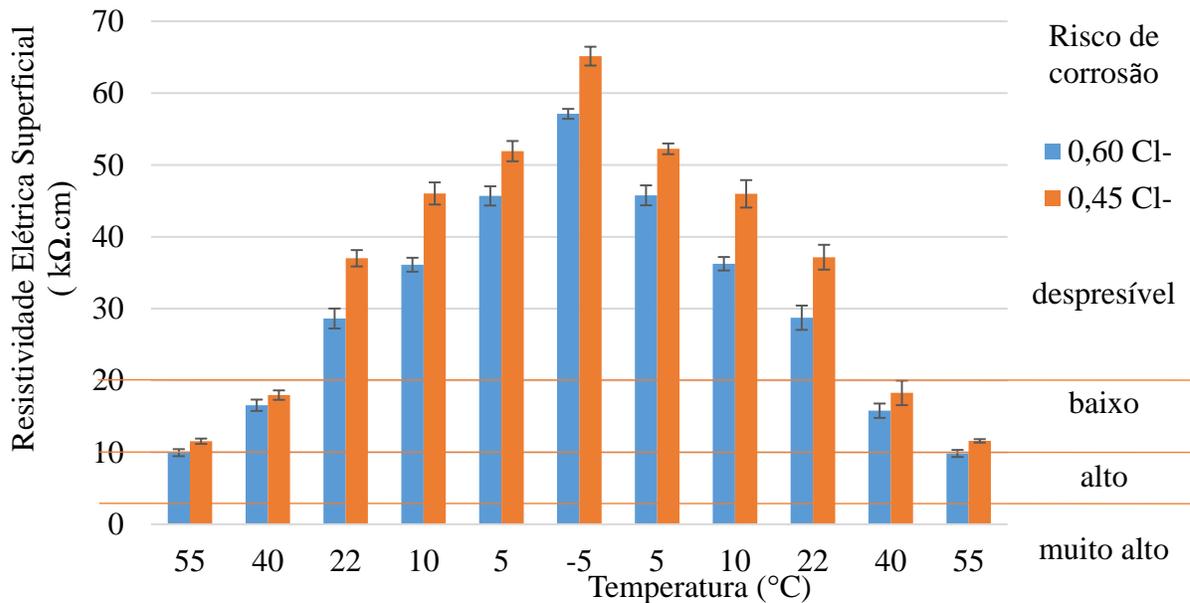


Figura 7. Resistividade elétrica superficial em diferentes temperaturas em traços não contaminados por cloreto (Cl⁻).

4. CONCLUSÕES

Os concretos com menor relação a/c apresentaram maior resistência à compressão, menor absorção de água, menor índice de vazios em comparação aos concretos com maior relação a/c, independentemente de estarem ou não contaminados por cloretos.

Com os resultados alcançados pelo programa experimental é possível afirmar com 95% de significância que existe influência da variação da temperatura sobre o potencial de corrosão, velocidade de corrosão e resistividade elétrica. Temperaturas mais elevadas resultaram em valores de potencial de corrosão mais eletronegativos e maior velocidade de corrosão devido à diminuição da resistividade elétrica, principalmente nos concretos contaminados com cloretos.

Na temperatura de 22°C, as amostras contaminadas apresentaram uma probabilidade de 90% de corrosão para o potencial de corrosão, enquanto, na temperatura negativa a probabilidade de corrosão foi de 10%. Já os concretos não contaminados resultaram em baixa probabilidade de corrosão para medições abaixo de 22°C. Até a temperatura de 55°C, nenhuma das amostras não contaminadas apresentaram probabilidade acima de 90%. Nas baixas temperaturas as medidas do potencial de corrosão indicam baixa probabilidade de corrosão, mesmo estando as armaduras despassivadas. A altas temperaturas o potencial de corrosão indica a incerteza de corrosão mesmo estando as armaduras passivadas.

Não foi possível constatar a influência da relação a/c nos resultados do potencial de corrosão através do programa experimental.

Foi percebido uma maior atividade corrosiva em temperaturas acima de 10°C para os corpos contaminados por cloretos. Os resultados de velocidade de corrosão dos quatro traços apresentaram sua maior variação entre si nas temperaturas mais elevadas (entre 40°C e 55°C). Para os valores medidos na temperatura negativa (-5°C), através da análise de variância foi possível considerar os valores estatisticamente equivalentes.

Todos os traços analisados sofreram variação de faixa analítica à medida que a temperatura se

alterava, apresentando uma tendência de aumento do risco de corrosão nas temperaturas mais elevadas.

Em relação à aplicação dos métodos utilizados, vale destacar que eles atuam de maneira complementar uns aos outros para uma análise das condições da estrutura. E devido a sensibilidade dos ensaios, é importante observar as condições ambientais e climáticas para não se obter valores ou interpretações errôneas durante atividades de monitoramento e inspeção.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Laboratórios de Corrosão (LabCor) do Departamento de Engenharia Química, Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica do Departamento de Materiais de Construção (DEMC) e ao Laboratório de Engenharia de Estruturas (LAEES), todos pertencentes à Universidade Federal de Minas Gerais. Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alhozaimy, A., Hussain, R., Al-Negheimish, A., Al-Zaid, R., Singh, D. (2014), *Effect of simulated concrete pore solution chemistry, chloride ions, and temperature on passive layer formed on steel reinforcement*. ACI Materials Journal. American Concrete Institute. v. 111, n. 4, p. 411-421.

<https://doi.org/10.14359/51686829>

American Association of State Highway and Transportation Officials (2015). *T 358 – 15. Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington.

Al-Khaja, A. W. (1997), *Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes*. Construction and Buildings Materials, v. 11, n. 1, p. 9-13. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00004-4)

American Society for Testing and Materials (2015), *ASTM C 876. Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete*. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials (2017), *ASTM G1-03. Practice for Preparing, Cleaning and evaluating corrosion test specimens*. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials (2019), *ASTM C215. Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens*. Philadelphia.

Andrade, C. Feliu, S. (1988), *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*. Madrid: CSIC/IETcc. 122 p.

Andrade, C.; Carruyo, A. R.; Dias, J.; Helene, P. R. L.; Rincon, I. T. (1997), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión em estruturas de hormigón armado*. DURAR (Red Temática XV.B – Durabilidad de la armadura – del programa ibero-americano de ciência y tecnologia para el desarrollo) Rio de Janeiro: CYTED. 208p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018), *NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2005), *NBR 9778 Versão corrigida 2: 2009. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018), *NBR 5739. Concreto ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2015), *NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.

- Bungey, J.H.; Millard, S. G. (1996), *Testing of concrete in structures*. 3 ed. S.l: Chapman & Hall, 226p.
- Chauhan, A.; Sharma, U. K. (2019), *Influence of temperature and relativity humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete*. Structures. v. 19, p 296-308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.016>
- Figueiredo, E. J. P.; Meira, G. (2013), *Corrosión de armadura de estructuras de hormigón*. Boletín Técnico 06. ALCONPAT International. México. 32p.
- Figueiredo, E. J. P. (2005), *Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol. 2. Cap. 27. São Paulo: IBRACON, p. 829-855.
- Gjørsv, O. E. (2015), *Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade*. São Paulo: Oficina de textos. p.238.
- Helene, P. R. L. (1993), *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 231 p. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), 1993.
- Melo, G. F.; Laurentino, J. V. A.; Santos, L. O. (2021), *Estudo comparativo das eficiências de agentes inibidores comerciais de corrosão em estruturas marítima de concreto armado*. Engineering Sciences, v.9. n.2. p.66-80.
- Medeiros-Junior, R. A. de, Munhoz, G. da S., Medeiros, M. H. F. de. (2019). *Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana*. Revista ALCONPAT, 9(2), 152 - 166. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>
- Mendes, S.E.; Oliveira, R.L.; Cremonez, C.; Pereira, E.; Pereira, E.; Medeiros-Junior, R.A. (2018), *Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model*. Construction and Building Matererials. 192 p. 610–620.
- Michel, A.; Sørensen, H.E.; Geiker, M.R. (2021), *5 years of in situ reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element*. Construction and Building Materials. v. 285. 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122923>
- Noort, R.; Hunger, M.; Spiesz, P. (2016), *Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as alternative test method*. Construction and. Building. Materials. 115, 746–759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.054>
- Østvik, J. M. (2005), *Thermal Aspects of corrosion of steel in concrete*, PhD Thesis. Departament of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology – NTNU, Trondheim.
- Raphael, M.; Shalon, R. (1971), *A study of the influence of climate on corrosion and reinforced concrete*. In: RILEM Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Climates, Proceedings. p. 77-96.
- Torres, A. S. (2011), *Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise*. Porto Alegre. 170p.
- Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Sweden: CBI. 468 p.
- Wolyneç, S. (2002), *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*. EDUSP, São Paulo.
- Wosniack, L. M.; Real, L. V.; Silva, M. D.; Macioski, G.; Hoppe Filho, J.; Medeiros, M. H. F. (2021), *Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set.ANTAC.
- Yousuf, F.; Wei, X.; Tao, J. (2017), *Evaluation of the influence of a superplasticizer on the hydration of varying composition cements by the electrical resistivity measurent method*. Construction and Building Materials. P.25-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.138>