

Diagnóstico da durabilidade e capacidade mecânica de uma viga portuária em concreto armado através de ensaios não destrutivos, semi destrutivos, destrutivos e laboratoriais

Francisco Luiz Campos Lopes¹, Laura Viana de Melo¹, Sofia Lage Gonçalves Sana¹, Leonardo Braga Passos¹, Igor Portella Garcia de Carvalho¹, Rodrigo Carvalho Santos¹, João Hugo Ferreira Jabbur Braga¹

¹ PI Engenharia / estruturas@piengenharia.com.br

Resumo

Estruturas portuárias de concreto armado, localizadas em ambientes marítimos, estão constantemente submetidas a uma alta agressividade ambiental, no tocante a ataques por íons cloreto e sulfatos, provenientes da água marinha. Para estes locais, deve-se haver projeto e manutenção compatíveis com as condições do meio, de modo que a segurança e durabilidade das estruturas seja viável e garantido. No entanto, diversas estruturas no Brasil não detêm de controle tecnológico adequado, desde sua fase de implementação às manutenções preventivas necessárias, o que corrobora no surgimento e intensificação de manifestações patológicas nas estruturas, em especial a corrosão de armaduras com deslocamento de concreto. O presente trabalho objetivou o estudo da durabilidade de uma viga de concreto armado constituinte de um píer no litoral brasileiro, a partir da realização de ensaios para caracterização de sua vida útil e capacidade mecânica, contemplando o seu diagnóstico. Foram realizados ensaios não destrutivos, semi-destrutivos, destrutivos e laboratoriais, para completa análise do elemento. Os ensaios realizados permitiram o diagnóstico da vida útil da peça, avaliando em paralelo seus parâmetros de durabilidade.

Palavras-chave

Durabilidade do concreto armado; Estruturas portuárias; Diagnóstico estrutural; Ensaios não destrutivos.

Introdução

O litoral brasileiro possui extensão de milhares de quilômetros, sendo relevante para o setor de transportes no país, em que estruturas portuárias promovem o fluxo de recebimento e saída de bens. As estruturas de concreto armado nos ambientes marítimos estão submetidas a agressividade ambiental e, por isso, têm potencial de ocorrência de manifestações patológicas oriundas das condições do meio, em especial a corrosão eletroquímica devido a íons cloreto.

Estima-se, de acordo com IPEN (2002), Dotto (2006) e por Ribeiro (2014), que o prejuízo anual de um país industrializado devido à corrosão varia de 3,5% a 5,0% do seu PIB. Segundo Andrade e Helene (2011), no início das construções em concreto, entre o século XX e a década de 80, a durabilidade era um critério subjetivo, sendo baseado majoritariamente somente pela resistência à compressão e experiência profissional, entretanto diante dos parâmetros jurídicos de vida útil enunciados na ABNT NBR 15575:2015, se fazem necessários outros estudos para diagnóstico da vida útil da estrutura de forma técnica e embasada.

Diante do exposto o presente trabalho objetivou o diagnóstico através da avaliação da vida útil e durabilidade de uma viga de concreto armado exposta ao ambiente portuário, por meio de ensaios não destrutivos, semi-destrutivos, destrutivos e laboratoriais, obtendo também os valores de capacidade mecânica do elemento.

Os ensaios em campo realizados nesse elemento foram os de detecção magnética de armaduras, profundidade de penetração de cloretos, profundidade de carbonatação do concreto, resistividade superficial do concreto e potencial de corrosão de armaduras. Além disso, foram realizados ensaios de laboratório, sendo eles de resistência à compressão axial, resistividade superficial e volumétrica em testemunhos de concreto, absorção de água, índice de vazios e massa específica e absorção capilar de água.

Metodologia

A viga circular portuária, objeto deste estudo, tratou-se de um elemento de concreto armado com idade aproximada de 50 anos e comprimento de 105 metros, estando localizada em Vitória/ES. Para o estudo amostral do elemento, foram analisadas 3 faces: norte, sul e inferior. Cabe ressaltar que com níveis das marés, a face inferior ficava suscetível à ciclos de molhagem e secagem, sendo assim destacada como área mais crítica.

Ao longo dessas regiões de análises foram determinadas janelas de inspeção onde se executaram-se os ensaios de campo, conforme verifica-se na Figura 1, sendo estes: resistividade superficial do concreto, avaliação da frente de carbonatação, avaliação da penetração de cloretos e potencial de corrosão das armaduras do concreto. Uma vez que a face norte da viga recebia diretamente a névoa salina, considerou-se essa condição mais desfavorável quando em comparação com a face sul e com menos influência de marés quando comparada com a face inferior.

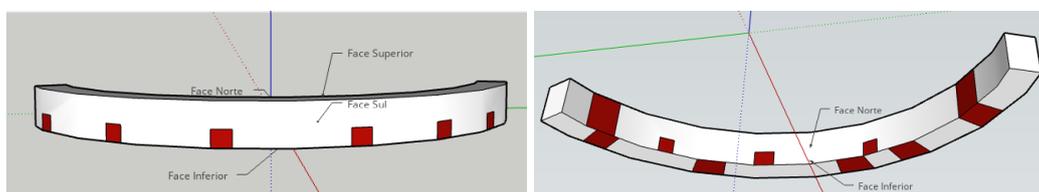


Figura 1 – Croqui em CAD 3D das regiões de ensaios.

Em cada região de análise da face da viga, foi realizado inicialmente a detecção magnética de armaduras (Figura 2), identificando as suas respectivas posições no concreto. Foram realizadas aberturas localizadas nas regiões de armaduras, para avaliação da contaminação do concreto por agentes agressivos, sendo estes o dióxido de carbono e os íons cloreto.



Figura 2 – Realização do ensaio de detecção magnética de armaduras.

A frente de carbonatação foi avaliada com a utilização do reagente fenolftaleína sob uma abertura no elemento de concreto. A região carbonatada mantém-se incolor sob a aspersão do produto e a não carbonatada desenvolve coloração rosada. Conforme explicitado por Metha (1994) a carbonatação do concreto promove a redução do seu pH de 12 para 10~9 onde, de acordo com o gráfico estabelecido por Pourbaix (1974), a armadura de aço sofre a despassivação, ficando suscetível à corrosão.

Para determinação da profundidade de ocorrência dos íons cloreto, foi utilizado o método de Mohr, intitulado “colorimétrico visual”, que verifica a presença de íons cloreto com a aplicação do Nitrato de Prata (AgNO_3) em concentração de 0,1 mol/L em superfície escarificada ou testemunho de concreto, assim como utilizado por VIEIRA (2015). Segundo Safehian et al. (2013), a zona de variação de maré geralmente é a mais agressiva quanto à penetração de cloretos, seguida pela zona de respingos, portanto, é necessário analisar pontos de exposições diferentes.

Quando em contato com íons cloreto, o nitrato de prata aspergido apresenta coloração incolor ou branca, indicando presença de cloretos livres no concreto (MEDEIROS 2018), diferente de sua coloração escura e amarronzada nos pontos livres de cloreto.



Figura 3 – Ensaio de avaliação da frente de carbonatação e profundidade de penetração de cloretos no concreto com aspersão de fenolftaleína e AgNO_3 , respectivamente.

Para realização do ensaio de resistividade superficial do concreto em campo realiza-se a saturação da área de ensaio enquanto realizam-se as leituras, até que estas se estabilizem, indicando a saturação da área. Conforme citam Lopez e Gonzalez (1993) a saturação da estrutura porosa do concreto influencia de modo inverso a resistividade do concreto uma vez que facilita o trânsito iônico ao longo do material. As leituras foram realizadas fora da área de influência de armaduras, uma vez que, conforme cita Lencioni (2010), a leitura resultante do ensaio de resistividade superficial pode ser um falso valor baixo dependendo da proximidade do eletrodo com a barra de armação.



Figura 4 – Realização do ensaio de resistividade superficial do concreto.

Após saturação da peça, foi realizado o ensaio de potencial de corrosão com o eletrodo de referência de sulfato de cobre, avaliando os gradientes de potenciais ao longo da peça de concreto. A medição do campo do potencial elétrico na superfície do concreto objetiva a obtenção da configuração da ocorrência da corrosão da superfície do aço.

Baseado nos resultados preliminares dos ensaios de campo, foram demarcados pontos para extração de testemunhos de concreto para que se realizassem ensaios laboratoriais de avaliação mecânica, física e química.

Os pontos de extração foram definidos mediante a dois objetivos: identificar os teores de cloreto ao longo do revestimento das armaduras e caracterizar a durabilidade e resistência mecânica do concreto de composição da peça. Os testemunhos de concreto, foram preparados para realização do ensaio de resistividade superficial e volumétrica nos laboratórios da PI Engenharia em Belo Horizonte-MG.

A realização do ensaio é feita em laboratório, com corpos de prova extraídos in loco. Para o ensaio de resistividade superficial e volumétrica nos testemunhos, baseado na ABNT NBR 9204:2012 realizou-se a seguinte metodologia: (i) aferição das dimensões, diâmetro e altura, dos testemunhos cilíndricos de concreto com utilização de paquímetro digital; (ii) aferição da massa dos testemunhos cilíndricos de concreto à umidade ambiente, com utilização de balança digital de precisão de 1g; (iii) medição da resistividade elétrica volumétrica e superficial dos testemunhos cilíndricos de concreto à umidade ambiente; (iv) saturação dos testemunhos cilíndricos de concreto à temperatura ambiente; (v) aferição da massa e medição da resistividade elétrica volumétrica dos testemunhos cilíndricos de concreto com intervalos de tempo de saturação até as 48 horas.



Figura 5 – Realização do ensaio de resistividade volumétrica dos testemunhos de concreto.

Após a realização do ensaio de determinação da resistividade superficial e volumétrica nos testemunhos, foram realizados os ensaios de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica conforme ABNT NBR 9778:2005; determinação da absorção de água por capilaridade, conforme ABNT NBR 9779:2012; determinação da penetração de água sob pressão, conforme ABNT NBR 10787:2011 e determinação da resistência a compressão axial, conforme ABNT NBR 5739:2018, no laboratório da Consultare Labcon em Belo Horizonte-MG.



Figura 6 – Realização dos ensaios de determinação da penetração de água sob pressão, determinação da absorção de água por capilaridade e determinação da resistência a compressão axial, respectivamente.

Para avaliação dos teores de íons cloreto livres e sulfatos ao longo do cobrimento de concreto, realizou-se a extração do material pulverulento em diferentes profundidades do testemunho. O ensaio de determinação do teor de cloretos é realizado a partir da titulação pelo método colorimétrico de Mohr. Já para determinação do teor de sulfatos solúveis, seguiu-se com o procedimento descrito na ASTM C 114:2018, referente à determinação do teor do tri óxido de enxofre (SO₃).

Resultados e Discussões

Os resultados apresentados na Tabela 1, dos pontos ensaiados para avaliação da frente de carbonatação no concreto, demonstram que o concreto não apresenta risco de despassivação de suas armaduras devido à redução de seu pH.

Tabela 1 – Resultados da Profundidade Média de Penetração de Cloretos e Carbonatação

Região de análise	Quantidade de pontos	Média do cobrimento das armaduras (mm)	Média da profundidade de penetração de cloretos (mm)	Média da frente de carbonatação (mm)
Inferior	7	59,9±1,0	24,6±25,0	1,5±3,5
Norte	9	60,2±8,3	0,0	0,0
Sul	6	52,7±7,7	9,3±20,9	0,1±0,2

A análise da Tabela 1 permite inferir que a frente de carbonatação possui configuração diferente entre os lados da viga. A ocorrência das médias de profundidade, apesar de oscilantes e com desvios padrões significativos, demonstram que a armadura não possui riscos, uma vez que nos valores máximos alcançados para a identificação da carbonatação ainda não há alcance da armadura. O mesmo é válido para a profundidade de penetração de cloretos, em que o seu valor máximo é inferior ao cobrimento da armadura. Dessa forma, os resultados da profundidade de carbonatação e de cloretos demonstram que não houve contaminação do concreto nas áreas de ensaio.

O mapeamento dos potenciais de corrosão nas regiões inferior (LI) e norte (LN) da viga revelou pontos de alta de probabilidade de cinética do processo corrosivo. A figura 9 apresenta os valores médios para cada janela de ensaio realizada nas regiões da viga. Verifica-se que a região inferior possui potenciais mais eletronegativos que a região norte, em especial a janela de ensaio VO_LI_PCA2 que apresentou uma região com 90% dos resultados com o potencial mais eletronegativo que -350mV, indicando uma alta probabilidade da cinética do processo corrosivo nessa área.

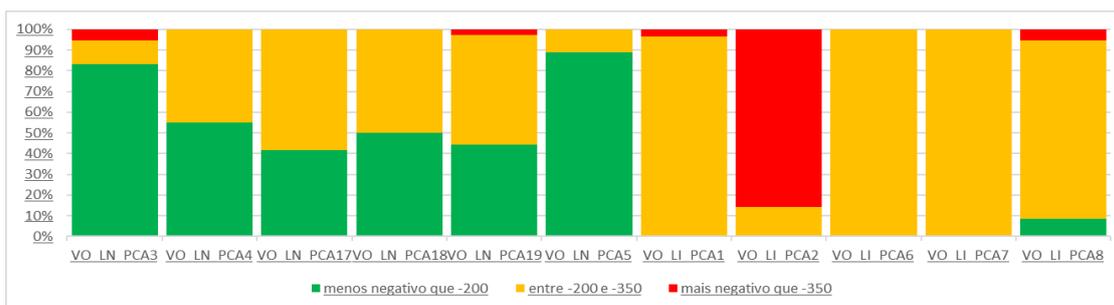


Figura 7 – Gráfico da análise da média dos potenciais de corrosão obtido nas janelas de ensaio em cada região de análise da viga

A tabela 2 apresenta os resultados para o ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto realizado em campo, verifica-se que a região inferior da viga apresenta uma probabilidade moderada de instalação do processo corrosivo, apesar de indicar uma baixa permissividade a íons cloreto, já a face norte apresentou uma permissividade de cloretos muito baixa, corroborando com uma probabilidade baixa de instalação da corrosão.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial realizada em campo

Região de análise	Quantidade de pontos	Média da resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	Permissividade à penetração do íon cloreto do concreto (AASHTO 2015)	Probabilidade de instalação do processo corrosivo (Balestra et. al. 2019)	Taxa de corrosão (Langford e Broomfield, 1987)
Inferior	8	45,45±13,27	Baixa	Moderada	Baixa
Norte	3	59,23±0,56	Muito baixa	Baixa	Baixa

A tabela 3 por sua vez, apresenta os resultados do ensaio de resistividade volumétrica e superficial realizados em laboratório, nos testemunhos de concreto saturados. Segundo Abreu (1998), no concreto há duas regiões características que possuem valores de resistividade elétrica distintos, uma região mais superficial sujeita a ciclos de molhagem e secagem, onde se mede a resistividade elétrica superficial do concreto e outra região mais interna, onde a umidade é mais estável, em que se mede a resistividade elétrica volumétrica.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial e volumétrica após 48 horas de saturação realizados em laboratório

	Média	Permissividade à penetração do íon cloreto do concreto (AASHTO 2015)	Probabilidade de instalação do processo corrosivo (Balestra et. al. 2019)	Taxa de corrosão (Langford e Broomfield, 1987)
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	30,31±3,99	Baixa	Moderada	Baixa
Resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm)	10,94±1,38	-	-	-

Costa e Azzi (2017) demonstraram que o valor da resistividade superficial é cerca de 50% superior à resistividade volumétrica, isto pode ser explicado pela face de contato dos eletrodos no concreto, onde a resistividade volumétrica analisa uma área de capilares interconectados muito superior ao método de Wenner de 4 pontos da resistividade superficial.

O gráfico da figura 10 apresenta o comportamento da resistividade superficial e volumétrica ao longo do tempo de saturação dos testemunhos de concreto da face norte. Verifica-se o mesmo comportamento para as resistividades, sendo inversamente proporcional para com a massa de água absorvida pelo corpo. Observa-se também que os pontos coletados obedecem a uma equação exponencial. A análise do gráfico sugere que o ensaio de resistividade superficial considerou as regiões de poros internas e centrais ao testemunho de concreto, uma vez que sua curva obteve o mesmo comportamento da curva de saturação.

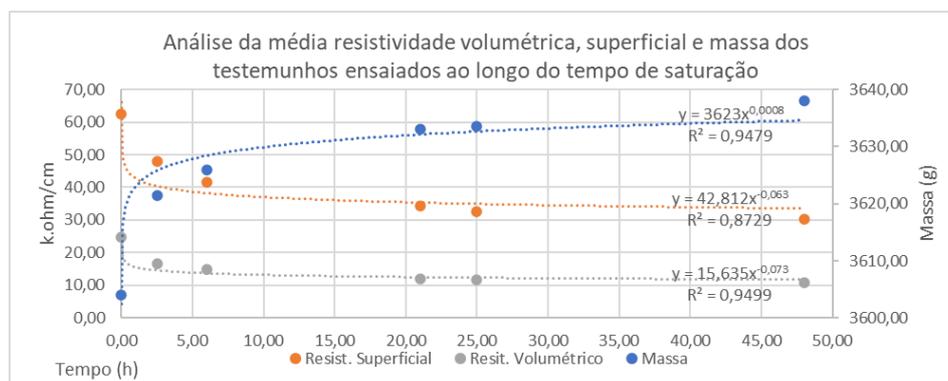


Figura 8 – Gráfico da análise da média resistividade volumétrica, superficial e massa dos testemunhos ensaiados ao longo do tempo de saturação em laboratório

Os resultados dos ensaios de determinação da absorção de água (AbsAg), índice de vazios (IndVz) e massa específica, determinação da absorção de água por capilaridade (AbsCap), determinação da penetração de água sob pressão (PenAg) e determinação da resistência a compressão axial (ResComp) são apresentados na tabela 4. Apenas se realizou tais ensaios em testemunhos extraídos da região norte da viga objetivando a análise de um concreto menos contaminado por íons cloretos livres, que por serem hidrófilos, podem influenciar os resultados dos ensaios que envolvam absorção de água.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de AbsCap, PenAg e ResComp

	AbsAg	IndVz	AbsCap	PenAg	ResComp
Valor Médio	6,08%	13,28%	0,08 mg/(mm ² /√min)	1,01*10 ⁻¹¹	53,47 MPa
Desvio padrão	0,82	1,59	0,02	1,65*10 ⁻¹²	7,88
Coeficiente de variação	13,54%	11,96%	27,05%	16%	15%
Classificação	Concreto normal (Helene, 1993)	Concreto normal (Helene, 1993)	Qualidade elevada (Browne, 1991 <i>apud</i> Azevedo, 2002)	Classe média Hooton e Konecky (1990)	-

Conforme as análises de classificação realizadas a partir dos resultados dos ensaios, verifica-se que o concreto de composição da viga pode ser considerado de classe normal, sendo apenas classificado como de maior qualidade pelo ensaio de absorção capilar, entretanto esse ensaio apresentou um coeficiente de variação superior aos demais, que indica uma maior dispersão dos seus dados, a análise da média do coeficiente de absorção capilar menos o seu desvio padrão o classificaria como sendo um concreto de qualidade média, de acordo com Browne (1991) *apud* Azevedo (2002), corroborando com os demais ensaios.

A resistência a compressão obtida corrobora com a análise de sua durabilidade, uma vez que uma alta resistência (superior a 50 MPa) indica um concreto de maior compactidade, dificultando assim a penetração de agentes agressivos.

O gráfico da figura 11 apresenta os resultados para os teores de íons cloretos livres e sulfatos solúveis por massa de cimento, ao longo do cobrimento de testemunhos extraídos da face norte da viga. Para avaliação dos limites de teores em relação à massa de cimento do concreto, realizou-se a reconstituição de traço do testemunho.

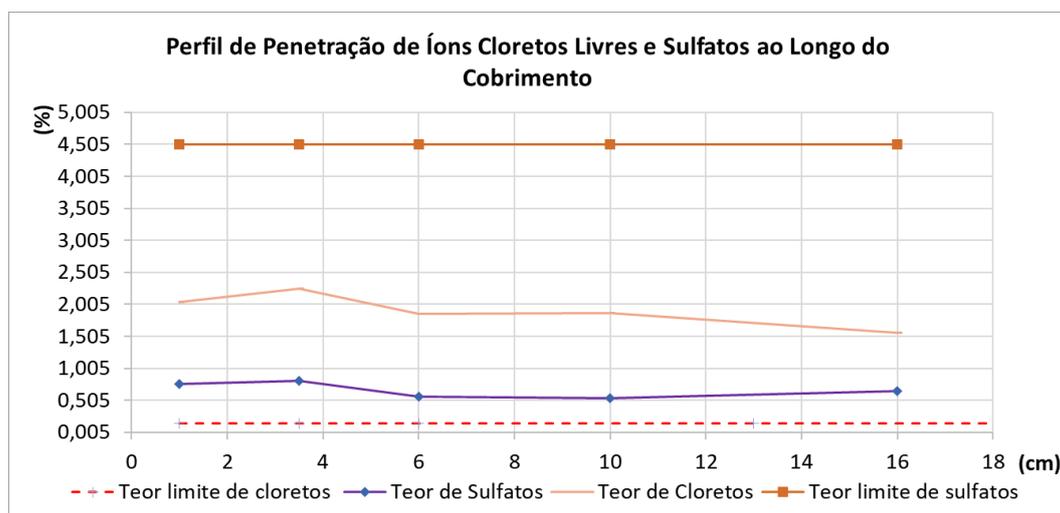


Figura 9 – Gráfico do perfil de penetração de íons cloretos e sulfatos ao longo do cobrimento de concreto

Verifica-se que a contaminação por íons sulfato não atingiu o limite estabelecido pela ABNT NBR 12655:2022 (4,5% por massa de cimento), entretanto observa-se que os teores de cloreto ao longo de todo o cobrimento apresentam-se acima do permitido pela referida norma (0,15% por massa de cimento).

A indicação da contaminação por íons cloreto, acima do permitido em norma ao longo do cobrimento de concreto corrobora com o ensaio de potencial de corrosão e resistividade realizados, uma vez que se verificou a possibilidade da cinética do processo corrosivo nestes ensaios.

Conclusão

Conforme as análises dos resultados dos ensaios realizados, estima-se que a estrutura se apresente no conceito de sua vida útil residual, que corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções (Helene, 1997), com propriedades parcialmente mantidas para a classe de agressividade de acordo com as Normas Brasileiras, atendendo aos parâmetros de projeto da época de sua concepção.

Os ensaios laboratoriais revelaram um concreto de qualidade média e comportamento normal para com absorção e permeabilidade a água, com uma resistência à compressão média que superou os 50 MPa, indicando um concreto de boa qualidade.

Os ensaios de resistividade superficial, resistividade volumétrica e potencial de corrosão demonstraram alta probabilidade de corrosão na face inferior devido a condição altamente agressiva, com probabilidade de expansão para as faces laterais visto que, na face lateral norte

da viga obtiveram-se resultados que indicaram um risco moderado e baixo para com a instalação do processo corrosivo.

Cabe salientar que os ensaios foram realizados de maneira localizada e demonstram pontualmente o estado de durabilidade do elemento estrutural. Entretanto, os resultados dos ensaios apresentaram variações baixas, indicando uma homogeneidade do concreto em estudo, permitindo assim uma avaliação estatística mais ampla da peça estrutural.

Referências Bibliográficas

ABNT 15575. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.

ABNT NBR 10787:2011. Concreto - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da penetração de água por pressão.

ABNT NBR 12655:2022 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.

ABNT NBR 5739:2019. Cimento Portland – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos.

ABNT NBR 9204:2012. Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrico-volumétrica – Método de ensaio.

ABNT NBR 9778:2005. Concreto - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

ABNT NBR 9779:2012. Concreto - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.

ABREU, A. G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Porto Alegre. 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ANDRADE C., D'ANDRÉA R., La resistividade eletrifica como parâmetro de controle dele formigona y de só durabilidade, Revista ALCONPAT, V. 1, Núm. 2, 2011.

ASTM C 114:2018 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes – Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2002

Browne, R. D., 1991, Field investigations: site & laboratory tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures, CEEC, Lisboa;

COSTA, J; AZZI, S. Comparação Da Resistividade Elétrica Superficial E Volumétrica Do Concreto Em Cimento Portland Cp Iv. Revista Construindo, Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., p. 36-46

DOTTO, J. M. R. Corrosão do aço induzida por íons cloreto – Uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem 84 pozolana. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006.

Efficient Pourbaix diagrams of many-element compounds. Patel, A., Norskov, J; Kristin, A.; Montoya, J.2019.

GJØRV O. E., Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017

- HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. Anais. Porto Alegre: UFRGS, 1997
- INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). Área de materiais desenvolve estudos contra a corrosão. Notícias - Jornal Órbita. Jul. 2002. <http://www.ipen.br/sitio?idc=896>.
- LENCIONI, J. W. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. CIPAN, Córdoba, Argentina 2010.
- LOPEZ, W.; GONZALEZ, J.A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. Cement and Concrete Research, v. 23, p. 368–376, 1993.
- MEDEIROS, M.; RÉUS, G.; PONTES, C. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. 3º Simpósio Paranaense de Patologias nas Construções, 2018
- Medeiros, M; Andrade, J., Helene, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. IBRACON, 2011.
- METHA, P.K. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. PINI 1994.
- RIBEIRO, Daniel Verás. Corrosão em Estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014
- SAFEHIAN, M. et al. Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition. Construction and Building Materials, Vol. 48, 2013, 287- 294 p.
- VIEIRA G.L, DIETRICH Y.P., SCOTÁ N.D. Avaliação Da Penetração De Cloretos Através De Método Colorimétrico Por Aspersão De Nitrato De Prata Em Concretos Com Adição De Resíduo De Rochas Ornamentais. Congreso Latino-Americano De Patologia De Construção, 2015.