

Ensaio Não Destrutivo em Viadutos em Concreto Armado: Um Estudo de Caso na Ferrovia Recife/Gravatá-PE

Non-Destructive Testing on Reinforced Concrete Viaducts: A Case Study on the Recife/Gravatá-PE Railway

Ensayos No Destructivos en Viaductos de Hormigón Armado: Un Estudio de Caso en la Ferrovia Recife/Gravatá-PE

Adegilson José Bento

Mestre, UPE, Brasil.
Professor Mestre, UNIFACOL, Brasil.
adegilsonjose19@gmail.com

Eliaana Cristina Barreto Monteiro

Professora Doutora, UPE, Unicap, Brasil.
eliana@poli.br

RESUMO

Os ensaios não destrutivos no concreto representam uma abordagem eficaz para avaliar suas propriedades sem comprometer a integridade estrutural, oferecendo uma visão precisa e abrangente sobre sua qualidade e condição. Este estudo de caso focou na aplicação de ensaios não destrutivos, incluindo a avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012), a determinação da profundidade de carbonatação segundo o RILEM CPC-18 (1988) e a medição da profundidade de cloretos conforme a UNI 7928 (1978), para analisar as características dos concretos nos viadutos ferroviários em Gravatá-PE, integrantes do trecho tombado da estrada ferroviária, Linha Tronco Centro de Pernambuco – LTCPE. Embora não tenham sido identificados cloretos livres, os viadutos 3, 5 e 6 apresentaram carbonatação acentuada, possivelmente relacionada às características geográficas do local. Os ensaios tecnológicos não destrutivos mostraram-se fundamentais para avaliar a qualidade do concreto, possibilitando decisões informadas sobre manutenção e reparo. A utilização das normas NBR 7584, RILEM CPC-18 e UNI 7928 como referências para os ensaios tecnológicos evidenciou sua eficácia. Destaca-se a importância da manutenção periódica para preservar monumentos da engenharia, sendo uma solução abrangente para mitigar a deterioração de estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios tecnológicos. Ensaios não destrutivos Obra de arte especial. OAE. Viadutos.

SUMMARY

Non-destructive tests on concrete represent an effective approach to assess its properties without compromising structural integrity, providing a precise and comprehensive insight into its quality and condition. This case study focused on the application of non-destructive tests, including the assessment of surface hardness using the rebound hammer as per NBR 7584 (ABNT, 2012), determination of carbonation depth following RILEM CPC-18 (1988), and measurement of chloride depth according to UNI 7928 (1978), to analyze the characteristics of concrete in the railway viaducts in Gravatá-PE, part of the designated stretch of the railway line, Linha Tronco Centro de Pernambuco – LTCPE. Although no free chlorides were identified, viaducts 3, 5, and 6 exhibited pronounced carbonation, possibly related to the geographical features of the location. Non-destructive technological tests proved crucial in evaluating concrete quality, enabling informed decisions on maintenance and repair. The use of standards NBR 7584, RILEM CPC-18, and UNI 7928 as references for technological tests demonstrated their effectiveness. Emphasizing the importance of periodic maintenance to preserve engineering landmarks emerges as a comprehensive solution to mitigate structure deterioration.

KEYWORDS: Technical Tests. Non-destructive Tests. Special Artistic Work. SAW. Viaducts.

RESUMEN

Las pruebas no destructivas en el concreto representan un enfoque eficaz para evaluar sus propiedades sin comprometer la integridad estructural, ofreciendo una visión precisa y completa de su calidad y estado. Este estudio de caso se centró en la aplicación de pruebas no destructivas, incluida la evaluación de la dureza superficial mediante el esclerómetro de reflexión según la norma NBR 7584 (ABNT, 2012), la determinación de la profundidad de carbonatación según el RILEM CPC-18 (1988) y la medición de la profundidad de cloruros según la UNI 7928 (1978), para analizar las características del concreto en los viaductos ferroviarios en Gravatá-PE, parte del tramo designado de la línea ferroviaria, Linha Tronco Centro de Pernambuco – LTCPE. Aunque no se identificaron cloruros libres, los viaductos 3, 5 y 6 presentaron una carbonatación pronunciada, posiblemente relacionada con las características geográficas del lugar. Las pruebas tecnológicas no destructivas resultaron fundamentales para evaluar la calidad del concreto, permitiendo decisiones informadas sobre mantenimiento y reparación. El uso de normas NBR 7584, RILEM CPC-18 y UNI 7928 como referencias para las pruebas tecnológicas evidenció su eficacia. Se destaca la importancia del mantenimiento periódico para preservar monumentos de la ingeniería, siendo una solución integral para mitigar la deterioración de las estructuras.

PALABRAS CLAVE: Ensayos Tecnológicos. Ensayos No Destructivos. Obra de Arte Especial. OAE. Viaductos.

1 INTRODUÇÃO

Para a NBR 9452, patologia trata-se do “estudo técnico e especializado do fator (ou conjunto de fatores) que gera determinada anomalia, bem como alterações trazidas ao elemento em análise que são as Obras de Arte Especiais (OAE’s)” (ABNT, 2023). Sendo assim uma forma abrangente de tratar e classificar os problemas que acarretam uma estrutura de engenharia.

As OAE’s são obras que passaram por processo de envelhecimento natural e podem apresentar danos que reduzem ainda mais sua capacidade de atender aos requisitos de utilização, ou seja, funcionalidade, segurança estrutural e durabilidade. A perda gradual ou abrupta da capacidade resistente, ou funcional da estrutura, ou de seus elementos pode comprometer as condições de serviço, ou até provocar sua ruína.

É fundamental observar que a maioria dos processos de deterioração desenvolve-se gradualmente e tem manifestações visíveis ou detectáveis por ensaios específicos. Assim, pode-se identificar, diagnosticar e solucionar os problemas antes que atinjam proporções graves ou que resultem em custos financeiros e sociais elevados de recuperação.

O presente trabalho pretende realizar um estudo de caso através de ensaios não destrutivos para a avaliação das características dos concretos que compõem os viadutos ferroviários do trecho situado no município de Gravatá-PE, que fazem parte da Estrada de Ferro Central de Pernambuco (Linha Tronco Centro).

2 DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Para Vieira (2016, p. 05) as “manifestações patológicas às quais as edificações estão expostas podem ocorrer em qualquer fase, considerando que em cada fase haverá um responsável”. Para Ferreira e Lobão (2018) é possível dividir a origem dos problemas patológicos da seguinte forma: Congênitos, Construtivos, Adquiridos e/ou Acidentais.

Quanto aos Mecanismos de deterioração relativos ao concreto, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2024), a deterioração das armaduras corresponde ao processo de despassivação das mesmas e pode ocorrer por meio de dois processos distintos:

Corrosão causada por cloretos: os íons cloretos podem ter origem externa, quando a estrutura está inserida em ambientes marinhos, industriais, ou até mesmo devido ao uso de ácido muriático no tratamento das superfícies, ou interna, quando estão presentes nas peças de concreto devido à contaminação durante o processo de produção ou ao uso de acelerador de pega à base de cloretos. A porcentagem de cloretos estabelecida pela NBR 12655 (ABNT, 2022) para estruturas de concreto é de 0,4% em relação à massa de cimento. Identificar a porcentagem de cloretos na estrutura serve de parâmetro para determinar se as peças atendem aos quesitos de durabilidades estabelecidos por normas, e também para determinar a terapia que será aplicada na recuperação quando necessária. A melhor forma de evitar que a estrutura se deteriore pela ação dos íons cloreto é evitar que estes adentrem a estrutura, podendo ser feito pelo uso de cimentos compostos, e também por um controle adequado do cobrimento e da fissuração do concreto.

Corrosão causada por carbonatação: a carbonatação é um processo físico-químico caracterizado pela formação de sais de carbonato pela reação de neutralização do hidróxido de cálcio (CH) pelo gás carbônico (CO₂). A redução do pH alcalino (12-14) da pasta de cimento para

valores inferiores a 9 configura a carbonatação. Por difusão, o gás carbônico penetra no concreto e se desloca através da fase aquosa do poro da matriz, se dissolvendo na solução aquosa. Ao penetrar no concreto o gás carbônico reage com os minerais do cimento hidratado, principalmente com o hidróxido de cálcio, e forma o carbonato de cálcio. A redução deste composto alcalino do concreto resulta na carbonatação. Como o CH é a reserva alcalina responsável por manter o pH da pasta de cimento elevado (valores superiores a 12,5), caso seja consumido na reação de carbonatação, tem-se um efeito de redução do pH do concreto para valores inferiores a 8,3, e essa camada de concreto perde a capacidade de proteger quimicamente as barras de aço dos elementos estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A determinação é um procedimento simples que consiste na aspersão dos reagentes fenolftaleína ou timolftaleína em uma superfície recém-fraturada de concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011). Quando em contato com o concreto esses reagentes se combinam com o hidróxido de cálcio livre e adquirem coloração típica, enquanto as partes carbonatadas permanecem incolores. Para minimizar os efeitos da carbonatação, a NBR 6118 (ABNT, 2024) indica a utilização de concretos de baixa porosidade, cobrimentos adequados e um controle mais rigoroso da fissuração das peças.

Em síntese, a aplicação de métodos de inspeção e ensaios tecnológicos no concreto armado, aliada às normas pertinentes, é essencial para uma gestão eficaz da durabilidade estrutural. A aplicação dessas técnicas serve como parâmetro, permitindo ações corretivas e preventivas fundamentadas, contribuindo para a sustentabilidade e longevidade das estruturas de concreto armado.

3 INSPEÇÃO EM OBRAS DE CONCRETO ARMADO

Dentre os principais desafios enfrentados, a identificação de corrosão por penetração de cloretos e carbonatação destaca-se como um ponto crucial na manutenção da integridade dessas estruturas. A utilização de métodos de inspeção e ensaios tecnológicos torna-se imprescindível para uma avaliação precisa, permitindo a detecção precoce desses fenômenos.

Existem alguns métodos eficazes para avaliar a resistência do concreto à penetração de cloretos, que estão diretamente relacionados à corrosão das armaduras. Normas como a UNI 7928 - *Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro* (UNI, 1978), ASTM C1202 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM, 2022) e BS 1881-124 - *Testing concrete. Methods for analysis of hardened concrete* (BSI, 2007). A comparação entre essas normas destaca a diversidade de abordagens e métodos adotados por diferentes instituições normalizadoras para avaliar a resistência do concreto à penetração de cloretos. Essa diversidade reflete as especificidades regionais, tecnológicas e normativas de cada país ou organização.

A carbonatação, outro agente de deterioração do concreto, pode ser identificada por métodos como RILEM CPC-18 – *Measurement of hardened concrete carbonation depth* (RILEM, 1988), e ISO 1920 - *Testing of concrete - Part 16: Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method* (ISO, 2016), métodos para determinar a profundidade de carbonatação usando fenolftaleína.

A avaliação da dureza superficial de concreto endurecido pelo método do esclerômetro de reflexão, é um indicativo importante da resistência e qualidade do material.

Esse método está regulamentado no Brasil através da norma NBR 7584 Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio (ABNT, 2012), outras normas internacionais relevantes como ASTM C805 - *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete* (ASTM, 2010), e EN 12504-2 - *Testing concrete in structures - Part 2: Determination of rebound number* (CEN, 2021), também estabelecem métodos de identificação da dureza superficial do concreto, proporcionando diretrizes globais para a avaliação consistente e padronizada desse importante atributo do material.

O uso individual ou a combinação de tais métodos tem se revelado eficaz na avaliação integrada da deterioração do concreto armado. Para Schneider *et al.* (2015), garantir que sejam adotadas práticas corretas de inspeção, é essencial para estas revelarem o estado real da estrutura, reduzindo incertezas relacionadas à aplicação de modelos estatísticos.

4 MÉTODO DE INSPEÇÃO

O trecho de estudo trata-se de um segmento tombado da LTCPE, localizado no município de Gravatá, onde será verificado o estado de conservação dos 6 viadutos em concreto armado que compõem o trecho. A previamente foram realizadas inspeções para caracterizar as estruturas, sendo realizadas entre os meses de abril de 2021 a julho de 2021.

4.1 Ensaios tecnológicos

Os ensaios tecnológicos não destrutivos de Esclerometria, Profundidade de Carbonatação e Presença de Cloretos Livres são métodos que não causam danos à estrutura avaliada. Essa característica não destrutiva permite uma análise cuidadosa das propriedades do concreto sem comprometer a integridade da estrutura, sendo uma abordagem eficaz e segura para determinar a qualidade do concreto.

4.1.1 Esclerometria

O esclerômetro selecionado para a realização dos ensaios foi o esclerômetro analógico - Martelo de teste de concreto, Modelo HT225A (Quadro 1). A escolha é fundamentada pelo fato de ser uma tecnologia acessível, amplamente comercializada no mercado brasileiro. A bigorna adotada foi uma especial de aço, dotada de guia de aço, com massa aproximada de 16 kg e dureza Brinell de 5000 MPa.

Quadro 1 - Especificações Técnicas do Esclerômetro analógico: Martelo de teste de concreto.

| Martelo para Teste de Concreto | Modelo HT225A |
|--|---|
| Peso Total | 1 kg |
| Pedra Esmeril | 1 unidade |
| Dimensões | 60 x 280 mm |
| Energia de Impacto | 2,207J (0.225 kgfm) |
| Teste de espessura | < 70 cm |
| Padrões | ISO/DIS 8045, EN 12504-2, ENV 206, DIN 1048 parte 2, ASTM C 805, ASTM D 5873, NFP 18-417, B 15-225, JGJ/T 23-2001, JIG 817-1993 |
| Valor médio do martelo de teste de concreto na bigorna de aço | 80±2 |

Para realização do ensaio foram adotados os critérios estabelecidos na NBR 7584 (ABNT, 2012). Para avaliar a dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão e correlaciona-la com a resistência foram realizadas malhas de amostragem na superestrutura (laje), mesoestrutura (pilares) e infraestrutura (sapata), consideradas zonas críticas, para possibilitar a identificação de áreas com perda de resistência em comparação aos resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão.

Com a obtenção dos valores e atendendo os requisitos que a NBR 7584 (ABNT, 2012) estabelece, analisou-se o ábaco esclerométrico disposto no esclerômetro e obtiveram-se os valores da resistência mecânica equivalente em N/mm². A relação entre N/mm² e Megapascal (MPa), sendo a unidade comumente utilizada de 1:1.

4.1.2 Profundidade de carbonatação e Presença de cloretos livres

Para aferir a profundidade de carbonatação adotou-se a recomendação RILEM CPC-18 – *Measurement of hardened concrete carbonation depth* (1988) e para determinar a presença de cloretos utilizou-se a recomendação do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata com base na norma italiana UNI 7928 (1978) *Determinazione della penetrabilità dello tone cloruro*, publicada pela instituição normalizadora, *Unificazione Nazionale Italiana* – UNI (Quadro 2).

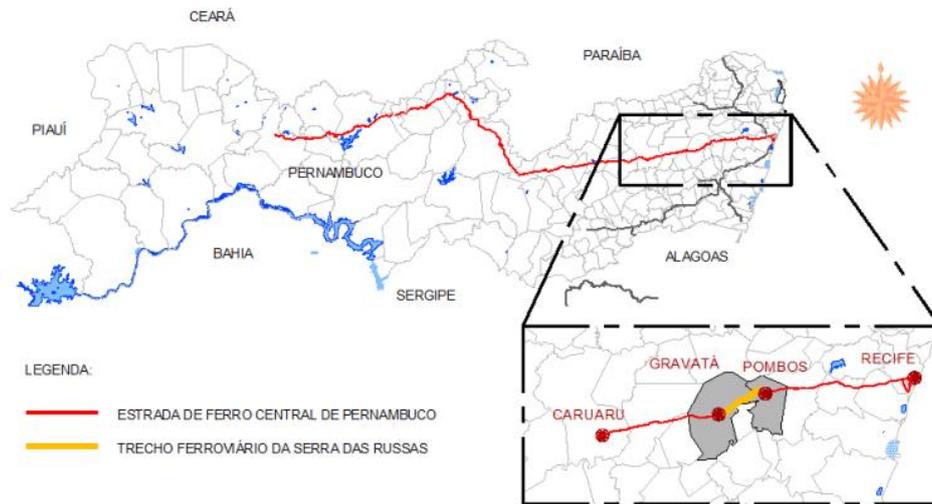
Quadro 2 - Procedimentos dos ensaios de Profundidade de carbonatação e Presença de cloretos livres.

| Profundidade de carbonatação | |
|------------------------------|---|
| SOLUÇÃO | A solução ácido/base, obtida através da utilização das proporções de 70% de álcool etílico, 29% de água destilada e 1% de fenolftaleína. O que resultou no indicador de pH com a seguinte fórmula: $C_{20}H_{14}O_4$. A fenolftaleína utilizada neste trabalho foi industrializada pela empresa ISOFAR Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. |
| PROCEDIMENTO | As regiões avaliadas com a solução de fenolftaleína tiveram a superfície recém-rompida para realização do teste, a profundidade dos furos ou cavidades foi superior a mínimo de 1 cm ao recobrimento. Os pontos selecionados foram os mais críticos possíveis da estrutura. Após a aspersão de fenolftaleína para tratar a superfície, se a fração com indicador químico adquirisse coloração vermelha carmim em toda sua extensão, a solução alcalina teria sido eficaz para aumentar o pH da frente de carbonatação. Com isso, realizou-se a avaliação visual nas regiões de forma quantitativa. Os registros da profundidade de carbonatação auxiliaram nas discussões a respeito da eficiência da técnica de aspersão da solução de nitrato de prata, pois se sabe que por efeito da carbonatação há uma decomposição do Sal de Friedel, liberando os cloretos que se encontravam combinados, além da sobreposição da identificação dos sais de cloreto de prata e carbonato de prata com aplicação do método colorimétrico, alvo do presente estudo. |
| Presença de cloretos livres | |
| SOLUÇÃO | A solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) na concentração de 0,1 mol/L, ou seja, 17 g de $AgNO_3$ para 1 litro de água destilada. O $AgNO_3$ utilizado neste trabalho foi industrializado pela empresa ISOFAR Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. |
| PROCEDIMENTO | As regiões avaliadas com a solução de nitrato de prata também tiveram sua superfície rompida no instante em que foi realizado o teste. Assim, em seguida, foi aspergido a solução de nitrato de prata, para que os cloretos livres presentes no concreto reagissem com íons de prata, da solução de nitrato de prata, na presença de luz, formando um precipitado branco, o cloreto de prata ($AgCl$). A aplicação de nitrato de prata foi repetida para aumentar o contraste de cores entre as áreas com e sem cloretos. Realizou-se, então, avaliação visual nas amostras. Na região sem cloretos, ou com cloretos combinados, há a formação de um precipitado marrom, o óxido de prata, devido à reação entre os íons de prata e as hidroxilas presentes nos poros do material cimentício (KIM et al., 2013). |

4.2 Delimitação do Campo de estudo

O estudo aborda as Obras de Arte de Engenharia (OAE's), especialmente os viadutos, no trecho ferroviário da Serra das Russas, com 17 km de extensão, construído entre 1886 e 1894, inicialmente com 21 túneis e 9 viadutos. Ao longo do tempo, houve alterações, transformando 7 túneis em céu aberto e aterrando 3 viadutos, resultando em 14 túneis e 6 viadutos. As estruturas metálicas originais dos viadutos, feitas em peças pré-moldadas de ferro pudlado, foram substituídas por concreto entre 1945 e 1947 pela Great Western. Em 1986, o trecho ferroviário (Figura 1), foi tombado pelo Decreto Estadual nº 11.238, destacando-se como marco da engenharia em Pernambuco (PERNAMBUCO, 1986). O Quadro 3 apresenta as principais diferenças nas estruturas.

Figura 1 – Linha Tronco Centro Recife/Caruaru.



Fonte: Santos (2013).

Quadro 3 – Relação de Obras de Arte Especiais.

| Viaduto 1 | Viaduto 2 | Viaduto 3 |
|-----------|-----------|-----------|
| | | |
| Viaduto 4 | Viaduto 5 | Viaduto 6 |
| | | |

O trecho de transposição da Serra das Russas em Gravatá, localizado na LTCPE, é o campo de estudo deste trabalho. Este trecho ganhou importância histórica em Pernambuco, resultando em seu tombamento como marco da engenharia do século XIX, devido à construção de túneis, viadutos e outras obras de arte de engenharia (OAE's) que compõem a Estrada de Ferro Recife/Gravatá. O tombamento foi realizado pelo Decreto Estadual n.º 11.238, de 1986, por iniciativa da Fundação do Patrimônio Histórico e Artístico de Pernambuco – FUNDARPE (PERNAMBUCO, 1986). O trecho em questão, situado entre os quilômetros 51,54 (Pombos) e o 76,04 (Gravatá), abrange uma extensão total de aproximadamente 25 km.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

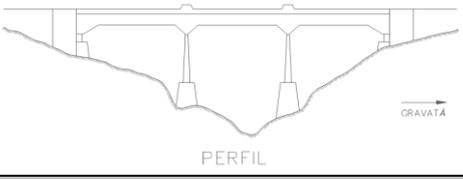
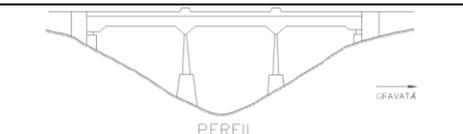
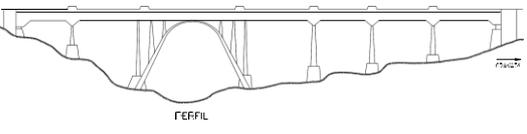
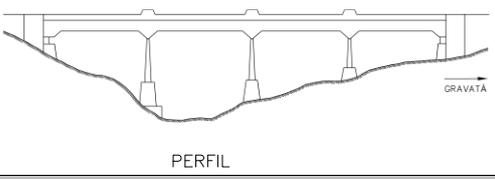
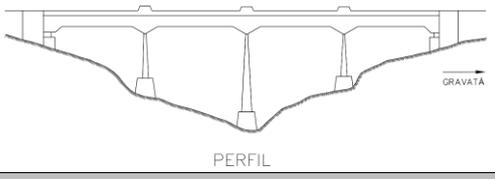
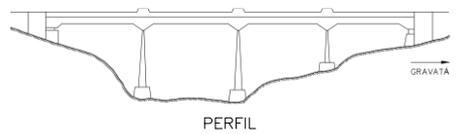
As informações constantes neste item foram levantadas pela previa inspeção visual de campo. Os dados levantados atendem às recomendações da NBR 9452 (ABNT, 2019) para uma vistoria inicial cadastral. Não foi localizado o projeto original nem os registros de vistorias anteriores, apenas foram encontrados no IPHAN (2009) o croqui da estrutura e suas dimensões por escrito.

5.1.1 Características Construtivas

Os Viadutos apresentam diferenças nas estruturas (Quadro 4), e dentre as características construtivas comuns estão:

| | |
|---|--|
| Alinhamento: | <ul style="list-style-type: none">• Alinhamento horizontal: estrutura de eixo reto;• Declividade longitudinal: 0%;• Sobrelevação transversal: 0%;• Ângulo de transposição do obstáculo: travessia perpendicular ao eixo do vale, não há esconsidade. |
| Material e execução: | <ul style="list-style-type: none">• Estruturas de encontro, super, meso e infraestrutura: de concreto armado moldado “in loco” com forma de madeira bruta, com exceção da infraestrutura em alvenaria de pedras. |
| Superestrutura: | <ul style="list-style-type: none">• Sistema estrutural longitudinal: viga contínua;• Sistema estrutural transversal: laje sobre duas vigas;• Laje: monolítica;• Vigas longarinas: seção transversal constante nos vãos, apresentando aumento de altura nos apoios intermediários;• Vigas transversinas de apoio: solidárias à laje, com altura igual à das vigas longarinas;• Vigas transversinas de vão: não solidárias à laje, com altura inferior à das vigas longarinas e espessura inferior às vigas transversinas de apoio. |
| Mesoestrutura: | <ul style="list-style-type: none">• Pilares: apoio nos encontros e dois apoios intermediários. Pilares com linha de apoio sob o eixo das vigas longarinas;• Aparelhos de apoio sobre os encontros (extremos): articulação fixa tipo Freyssinet;• Aparelhos de apoio sobre os pilares (intermediários): articulação fixa tipo Freyssinet. |
| Infraestrutura: | <ul style="list-style-type: none">• Blocos: um bloco em alvenaria de pedras por linha de apoio (um sob cada pórtico). Dois blocos em cada extremo (um para apoios extremos da superestrutura e um para sustentação dos muros de arrimo e muros de ala dos encontros). |
| Extremos: | <ul style="list-style-type: none">• Estruturas de encontro: muro de arrimo, muros de ala e apoio da superestrutura;• Taludes laterais: declividade variável de 1:3 a 1:5, com vegetação natural, sem proteção superficial. |
| Drenagem do tabuleiro e dos encontros: | <ul style="list-style-type: none">• Tabuleiro: buzinetes curtos de PVC no fundo da laje;• Encontros: não há dispositivos de condução de águas pluviais ou de proteção superficial dos taludes contra erosão. |
| Juntas de dilatação do tabuleiro: | <ul style="list-style-type: none">• Juntas entre o tabuleiro e as estruturas de encontro sem vedação. |

Quadro 4 - Principais diferenças nas estruturas dos viadutos. (continua)

| Viaduto 1 | | |
|---|--------------------------------------|--|
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 3 (20,25/ 20,25/22,00 m) |
|  | Altura máxima | 22,00 m |
| | Pilares | Pilares de estrutura reticulada constituído por um pórtico de duas colunas |
| | Elementos acessórios | Existem 4 refúgios (dois em cada lateral). |
| Viaduto 2 | | |
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 3 (20,25/ 20,25/ 22,00 m) |
|  | Altura máxima | 21,50 m |
| | Pilares | Pilar-parede enrijecido |
| | Elementos acessórios | Existem 4 refúgios (dois em cada lateral). |
| Viaduto 3 | | |
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 7 (20,25/ 23,00/ 40,00/ 23,00/ 20,25/ 22,00/ 23,00 m) |
|  | Altura máxima | 40,00 m |
| | Pilares | Pilares de estrutura reticulada constituído por um pórtico de duas colunas |
| | Elementos acessórios | Existem 12 refúgios (seis em cada lateral). |
| Viaduto 4 | | |
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 4 (22,00/ 22,00 / 20,25/ 20,25 m) |
|  | Altura máxima | 23,00 m |
| | Pilares | Pilares de estrutura reticulada constituído por um pórtico de duas colunas |
| | Elementos acessórios | Existem 6 refúgios (três em cada lateral) |
| Viaduto 5 | | |
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 4 (22,10/ 22,10/ 20,25/ 20,25 m) |
|  | Altura máxima | 31,00 m |
| | Pilares | Pilares de estrutura reticulada constituído por um pórtico de duas colunas |
| | Elementos acessórios | Existem 6 refúgios (três em cada lateral) |
| Viaduto 6 | | |
| Croqui | Número e comprimento dos vãos | 4 (22,00/ 20,70/ 20,25/ 20,25 m) |
|  | Altura máxima | 24,00 m |
| | Pilares | Pilares de estrutura reticulada constituído por um pórtico de duas colunas |
| | Elementos acessórios | Existem 6 refúgios (três em cada lateral) |

5.1.2 Quadro Patológico

Na vistoria, foram identificados os problemas existentes e os possíveis mecanismos de deterioração, suas causas e extensão. Verificou-se que as principais anomalias são a acumulação de água e/ou sedimentos, manchas e eflorescências, infiltração de água no interior concreto, sendo a origem congênita ou construtiva, causas pela drenagem deficiente ou ausência de órgãos de drenagem pela concepção incorreta do sistema de drenagem e a falta de manutenção. Foi possível identificar ainda deterioração do concreto, corrosão de armaduras, com aparecimento de manchas de corrosão, fissuras e exposição de armaduras, causados pela carbonatação de origem relacionada a erros de projeto (recobrimento insuficiente) e/ou por erros de execução (cofragem, betonagem e descofragem), drenagem insuficiente e pela falta de manutenção.

5.1.3 Ensaios tecnológicos

- Esclerometria

A Tabela 1 apresenta os valores de índice esclerométrico (I.E.) obtidos no ensaio de esclerometria dos viadutos.

Tabela 1 – Valores de reflexão obtidos.

| Elemento Pontos | Viaduto 1 | | | | Viaduto 2 | | | | Viaduto3 | | | | |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------|-------------------|
| | Longarina1 (L1p1) | Longarina1 (L1p2) | Longarina2 (L2p1) | Longarina2 (L2p2) | Longarina1 (L1p1) | Longarina1 (L1p2) | Longarina2 (L2p1) | Longarina2 (L2p2) | Longarina1 (L1p1) | Longarina2 (L1p1) | PII1 (P1) 0º | PII10 (P10) 0º | Bloc10 (P10) +90º |
| 1 | 31 | 35 | 42* | 32* | 36* | 42 | 40 | 42 | 45* | 45 | 52 | 48 | 37 |
| 2 | 37* | 39* | 36 | 33* | 40* | 34* | 40 | 50* | 40 | 44 | 48 | 49 | 33 |
| 3 | 41* | 37 | 37 | 38 | 32 | 49* | 46* | 41 | 42 | 49 | 42* | 43 | 43* |
| 4 | 31 | 36 | 39 | 34 | 26* | 40 | 30* | 43 | 38 | 50 | 48 | 44 | 30* |
| 5 | 28* | 34 | 30* | 42* | 32 | 39 | 40 | 39 | 41 | 46 | 58* | 44 | 45* |
| 6 | 31 | 39* | 32* | 32* | 34 | 38 | 30* | 41 | 40 | 54* | 51 | 48 | 39 |
| 7 | 22* | 31* | 30* | 42* | 34 | 38 | 36 | 36* | 38 | 48 | 62* | 46 | 36 |
| 8 | 30 | 29* | 32* | 40 | 34 | 39 | 38 | 42 | 36* | 42 | 46 | 42 | 36 |
| 9 | 30 | 39* | 36 | 39 | 32 | 46* | 43* | 44 | 43 | 51 | 40* | 36* | 36 |
| 10 | 34 | 34 | 38 | 36 | 37* | 44 | 32* | 45 | 41 | 44 | 54* | 36* | 32 |
| 11 | 30 | 35 | 34 | 33* | 32 | 40 | 42* | 42 | 42 | 46 | 44 | 48 | 37 |
| 12 | 33 | 30* | 35 | 38 | 25* | 40 | 31* | 42 | 41 | 48 | 38* | 46 | 33 |
| 13 | 30 | 30* | 48* | 30* | 36* | 38 | 44* | 41 | 38 | 37* | 46 | 52* | 32 |
| 14 | 31 | 34 | 42* | 40 | 32 | 34* | 45* | 44 | 44 | 51 | 48 | 44 | 33 |
| 15 | 28* | 38 | 42* | 34 | 26* | 40 | 40 | 40 | 38 | 51 | 48 | 42 | 30* |
| 16 | 31 | 44* | 34 | 45* | 30 | 39 | 28* | 44 | 36* | 38* | 36* | 46 | 36 |
| Média | 31,13 | 35,25 | 36,69 | 36,75 | 32,38 | 40,00 | 37,81 | 42,25 | 40,19 | 46,50 | 47,56 | 44,63 | 35,50 |
| Desvio Padrão | 3,97 | 3,93 | 4,82 | 4,24 | 4,00 | 3,74 | 5,71 | 2,93 | 2,60 | 4,60 | 6,72 | 4,18 | 4,09 |
| Lim. Inferior | 28,01 | 31,73 | 33,02 | 33,08 | 29,14 | 36,00 | 34,03 | 38,03 | 36,17 | 41,85 | 42,81 | 40,16 | 31,95 |
| Lim. Superior | 34,24 | 38,78 | 40,36 | 40,43 | 35,61 | 44,00 | 41,59 | 46,48 | 44,21 | 51,15 | 52,32 | 49,09 | 39,05 |
| Nova Média (I.E.) | 31,09 | 35,38 | 36,13 | 37,38 | 32,44 | 39,75 | 33,43 | 39,33 | 40,46 | 47,31 | 47,89 | 45,38 | 35,00 |
| Resistência Mpa ≅ | 31,0 | 38,8 | 40,2 | 42,7 | 33,3 | 47,6 | 35,1 | 46,8 | 49,2 | 60 | 59,7 | 53,6 | 38,2 |

| Elemento Pontos | Viaduto 4 | | | | Viaduto 5 | | | | Viaduto 6 | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Longarina1 (L1p1) | Longarina1 (L1p2) | Longarina2 (L2p1) | Longarina2 (L2p2) | Longarina1 (L1p1) | Longarina1 (L1p2) | Longarina2 (L2p1) | Longarina2 (L2p2) | Longarina1 (L1p1) | Longarina1 (L1p2) | Longarina2 (L2p1) | Longarina2 (L2p2) |
| 1 | 39* | 42* | 36 | 34 | 29 | 30 | 39* | 40 | 30 | 44* | 26* | 36 |
| 2 | 30* | 28* | 35 | 36 | 31 | 36* | 30 | 35 | 34* | 35 | 25* | 38* |
| 3 | 36 | 34 | 35 | 32 | 25* | 36* | 30 | 39 | 28 | 36 | 31 | 33 |
| 4 | 24* | 37* | 32 | 30 | 35* | 34 | 32 | 39 | 29 | 38* | 34* | 38* |
| 5 | 38 | 25* | 40* | 39* | 32 | 32 | 38* | 45* | 34* | 32 | 26* | 34 |
| 6 | 38 | 35 | 36 | 21* | 30 | 34 | 27* | 40 | 33 | 37 | 30 | 38* |
| 7 | 32 | 32 | 26* | 34 | 31 | 30 | 30 | 44* | 30 | 38* | 24 | 32 |
| 8 | 38 | 30 | 33 | 24* | 28 | 34 | 31 | 42 | 33 | 32 | 31 | 34 |
| 9 | 36 | 42* | 32 | 35 | 37* | 28* | 30 | 44* | 32 | 28* | 28 | 34 |
| 10 | 42* | 33 | 32 | 31 | 30 | 36* | 35 | 39 | 35* | 37 | 28 | 35 |
| 11 | 30* | 30 | 30 | 42* | 31 | 29 | 36* | 32* | 33 | 28* | 28 | 36 |
| 12 | 36 | 38* | 30 | 34 | 26* | 29 | 29* | 32* | 32 | 28* | 27 | 33 |
| 13 | 38 | 27* | 27* | 35 | 24* | 30 | 35 | 40 | 25* | 32 | 33* | 29* |
| 14 | 36 | 35 | 40* | 34 | 31 | 30 | 31 | 32* | 29 | 38* | 28 | 35 |
| 15 | 30* | 30 | 26* | 30 | 34* | 34 | 29* | 42 | 32 | 34 | 38* | 30* |
| 16 | 38 | 30 | 37* | 34 | 36* | 31 | 36* | 36 | 23* | 32 | 28 | 36 |
| Média | 35,06 | 33,00 | 32,94 | 32,81 | 30,63 | 32,06 | 32,38 | 38,81 | 30,75 | 34,31 | 29,06 | 34,44 |
| Desvio Padrão | 4,46 | 4,83 | 4,29 | 4,91 | 3,62 | 2,68 | 3,48 | 4,17 | 3,23 | 4,28 | 3,53 | 2,57 |
| Lim. Inferior | 31,56 | 29,70 | 29,64 | 29,53 | 27,56 | 28,86 | 29,14 | 34,93 | 27,68 | 30,88 | 26,16 | 30,99 |
| Lim. Superior | 38,57 | 36,30 | 36,23 | 36,09 | 33,69 | 35,27 | 35,61 | 42,69 | 33,83 | 37,74 | 31,97 | 37,88 |
| Nova Média (I.E.) | 36,60 | 32,11 | 33,10 | 33,25 | 30,33 | 31,42 | 31,56 | 39,20 | 31,00 | 34,11 | 28,78 | 34,36 |
| Resistência Mpa \cong | 41,2 | 32,7 | 34,6 | 34,8 | 29,6 | 31,5 | 31,8 | 46,5 | 30,9 | 36,3 | 27,2 | 36,9 |

Obteve-se os valores de índice esclerométrico médio efetivo (I.E.) entre 28,78 nas longarinas do V6 até 47,31 para as longarinas do V3 que através do uso do ábaco esclerométrico do aparelho foi possível correlacionar esses valores, que demonstram médias de resistência equivalente entre 27,2 MPa e 60 MPa.

Foram verificados bons resultados de resistências, justificados principalmente pela idade das construções, já que o concreto continua ganhando resistência ao longo do tempo através do processo contínuo de hidratação de seus compostos. Mesmo assim, esses resultados não indicam uma boa homogeneidade do concreto, pois pode ser observada uma variação em torno de 6% e 15% para cada ponto ensaiado, mas a diferença entre a resistência chega a ser de 23% entres pontos ensaiados, podendo estar ligada a variabilidade natural de concreto lançado em obra, uma vez que as construções geralmente são concretadas em etapas.

- Carbonatação e Presença de cloretos

A profundidade carbonatada do concreto foi avaliada depois na região recém-rompida sendo a frente de carbonatação registrada para determinado ponto. Foi observada a coloração vermelho carmim em todas as regiões tratadas do V1, V2 e V4, na superestrutura do V3, há indicativo de carbonatação com frente máxima de 1,00 centímetro, sendo o cobrimento nas áreas ensaiadas em média de 1,50 centímetros, no V5 de 0,50 centímetro, sendo o cobrimento nas áreas ensaiadas entre 0,30 de 0,60 centímetros e no V6 não foi possível medir uma frente bem definida, encontrando valores de 0 até 0,80 centímetro, sendo o cobrimento nas áreas

ensaiadas entre 0 e 0,70 centímetros, medindo no mesmo sentido, vale destacar que o cobrimento não é uniforme em todos os lados. Nas longarinas foi identificado como frente máxima de 1,3 centímetro, sendo o cobrimento médio nas áreas ensaiadas de 1,5 centímetros do V5 e foi identificado como frente máxima de 0,4 centímetro, sendo o cobrimento médio nas áreas ensaiadas de 0,4 centímetros, medindo no mesmo sentido no V6, já com relação à presença de cloretos, não foi identificado precipitados na coloração branca, apenas precipitado marrom, indicativo de cloretos combinados, correspondente as estruturas (Figura 2).

Os registros de profundidade de carbonatação podem influencia na correção dos dados obtidos em outros ensaios, como o de esclerometria e ainda auxilia nas discussões a respeito da eficiência da técnica de aspersão da solução de nitrato de prata, visto que, os resultados da resistência superficial pelo I.E., com a introdução do CO₂ para o interior do concreto, ocorre a formação de carbonato de cálcio nos poros, o que densifica a superfície do concreto, interferindo na reflexão do esclerômetro e como efeito da carbonatação há uma decomposição do Sal de Friedel, liberando os cloretos que se encontravam combinados, introduzir a incerteza quanto à mudança de cor neste método colorimétrico, além da sobreposição da identificação dos sais de cloreto de prata e carbonato de prata. (FRANÇA, 2011; SOUSA e GOMES, 2018).

Figura 2 – Ensaio de carbonatação e presença de cloretos: Refúgio V1 (A); Refúgio V6 (B); Longarina (V2); Longarina (V4).



Embora estudos como o de Medeiros *et al.* (2013) e Medeiros Junior *et al.* (2015), não tenham feito o uso do método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata, por se mostrar ineficiente quanto ao fato de as estruturas estudadas apresentarem certo avanço da frente de carbonatação associada, ou não, à contaminação por cloretos. Pode-se observar

também que, em alguns casos nenhuma frente de carbonatação chegou até as armaduras, e apesar da velocidade de difusão do CO_2 diminuir com o tempo em função da densificação dos poros, com a transformação do Ca(OH)_2 em CaCO_3 , se torna interessante acompanhar nos próximos anos a evolução desse processo de carbonatação.

Com os resultados dos ensaios obtidos é possível dizer que a Esclerometria, ao medir a dureza superficial do concreto por meio da resistência ao impacto, fornece dados preliminares sobre a resistência global da estrutura. A Profundidade de Carbonatação é crucial para entender a extensão da penetração do dióxido de carbono na matriz do concreto, sendo um indicador direto da durabilidade do material. Já a Avaliação da Presença de Cloretos Livres é essencial para identificar a potencial corrosão das armaduras, pois a presença excessiva de cloretos pode comprometer a integridade do concreto.

A presença de concreto deteriorado com armaduras expostas, em alguns casos não tem como provável causa a qualidade do concreto, a carbonatação ou a presença de contaminação por cloretos, sendo provável a identificação de erros de projeto (recobrimento insuficiente) e/ou por erros de execução (cofragem, betonagem e descofragem).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Identificou-se que entre as principais anomalias observadas estão a deterioração do concreto, a corrosão de armaduras com o surgimento de manchas corrosivas, fissuras e exposição de armaduras. Esses problemas são atribuídos à carbonatação, relacionada a falhas no projeto (recobrimento insuficiente) e/ou a erros na execução (cofragem, betonagem e descofragem), à drenagem inadequada e à falta de manutenção.

Nos viadutos analisados, não foram encontrados indícios de ação de cloretos livres. No entanto, os viadutos 3, 5 e 6 exibem uma carbonatação acentuada, possivelmente associada às características planialtimétricas da região e à sua proximidade com a BR 232, onde centenas de veículos emitem CO_2 diariamente, agravando as manifestações patológicas.

Os ensaios tecnológicos não destrutivos, como avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, da profundidade de carbonatação e da profundidade de cloretos, surgem como ferramentas valiosas para determinar a qualidade do concreto. Esses métodos proporcionam uma avaliação precisa e abrangente das propriedades do concreto sem causar danos à estrutura.

Assim, ao empregar esses ensaios não destrutivos, é possível obter informações cruciais sobre a qualidade e condição do concreto, contribuindo para decisões informadas sobre manutenção, reparo ou substituição de estruturas de concreto.

É crucial determinar se, na condição atual, as estruturas apresentam algum risco à população e embasar prognósticos para garantir a integridade das OAEs (Obras de Arte Especiais) e facilitar a reativação do trecho, impulsionando o turismo na região.

A maioria dos problemas identificados pode ser corrigida inicialmente por meio de manutenções corretivas, como reparo das áreas afetadas e melhoria do sistema de drenagem, preenchimento ou selagem de fissuras, instalação de sistemas de drenagem eficientes e outros trabalhos de reparação. Além disso, é importante realizar um estudo de estabilidade da estrutura.

Como conclusão, destaca-se que a utilização das normas NBR 7584 (ABNT, 2012), RILEM CPC-18 (1988) e UNI 7928 (1978) como orientadoras para a realização de ensaios tecnológicos é uma abordagem eficaz, proporcionando resultados satisfatórios e sistemática na execução da atividade.

Em última análise, compreende-se que, embora a deterioração de grandes monumentos da engenharia, como pontes e viadutos, seja um problema global, a solução reside na manutenção e conservação dessas estruturas, por meio de um entendimento real de suas condições por meio de inspeções periódicas e usos de ensaios tecnológicos no diagnóstico das mesmas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho desenvolvido na Universidade de Pernambuco contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil - (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, PA, USA, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM C805-02**: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. West Conshohocken, PA, USA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto . Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7584**: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - procedimentos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BSI. **BS 1881-124**: Testing concrete. Methods for analysis of hardened concrete. London, England, 2007.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. E. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. p.1984

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. **EN 12504-2**: Testing concrete in structures - Part 2: Determination of rebound number. 2021.

FERREIRA, J. B.; LOBÃO, V. W. N. Manifestações patológicas na construção civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT**, Aracaju, v. 5, n. 1, p. 71-80, 2018.

FRANÇA, C. B. **Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL - IPHAN. **Inventário do Patrimônio Ferroviário de Pernambuco**. Recife: IPHAN, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 1920**: Testing of concrete - Part 16: Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. 2016.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; BRITO, P. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions. **Ocean Engineering**, v. 103, p. 78-87, 2015.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G. C.; HELENE, Paulo. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. **Construction & Building Materials**, v. 44, p. 452-457, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PERNAMBUCO. Decreto nº 11.238, de 11 de março de 1986. Homologa Resolução do Conselho Estadual de Cultura, de tombamento do trecho ferroviário compreendido entre Recife e Gravatá, neste Estado. **Diário Oficial**, Recife, 11 de março de 1986.

RILEM RECOMMENDATIONS. **CPC 18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1988.

SANTOS, A. R. S. **O sentido da paisagem**: a relação entre a ferrovia e a Serra das Russas em Pernambuco. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano) – Centro de Artes e Comunicação, da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCHNEIDER, R. et al. Assessing and updating the reliability of concrete bridges subjected to spatial deterioration – principles and software implementation. **Structural Concrete**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 356-365, 2015.

SOUSA, P. A.; GOMES, T. Estudo dos efeitos da carbonatação na vida útil de pontes de concreto armado. **Engineering Sciences**, v.6, n.2, p.1- 11, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2018.002.0001>

UNIFICAZIONE NAZIONALE ITALIANA – UNI. **UNI 7928:1978**. Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro. 1978.

UNIFICAZIONE NAZIONALE ITALIANA – UNI. **UNI 7928:1978**. Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro. 1978

VIEIRA, M. A. **Patologias construtivas**: conceito, origens e métodos de tratamento. Uberlândia, Brasil, 2016.