XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022
Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Obra de arte especiais: ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado de diferentes idades

Special works of art: non-destructive tests in reinforced concrete structures of different ages

Silvia Roberta Souza
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | roberta.souzar@hotmail.com
Abner Araujo Fajardo
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | Fajardo.aabner@gmail.com
Maria Teresa Barbosa
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | teresa.barbosa@ufjf.br
Ubirajara Domingos de Castro
Pontifícia Católica de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | castrobiracastro@yahoo.com
White José dos Santos
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | white.santos@demc.ufmg.br

Resumo
Caracterizou-se os concretos de três pontes de idades diferentes (94, 62 e 4 anos) no estado de Minas Gerais, com foco na durabilidade e manutenção. Levantou-se a documentação e os elementos construtivos, analisou-se visualmente e por ensaios não destrutivos (pacometria, carbonatação e esclerometria) os concretos das três pontes. Identificou-se as condições de deterioração, as características ambientais em que estão inseridas (o efeito da idade e da agressividade) em correlação com a carbonatação e esclerometria do concreto. Constatou-se o comprometimento da durabilidade, ocasionada pelo elevado grau de carbonatação, insuficiência de espessura de cobrimento das armaduras e deficiência nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Concreto, esclerometria, carbonatação, durabilidade, pontes.

Abstract
The concrete of three bridges of different ages (94, 62 and 4 years) in the state of Minas Gerais was characterized, focusing on durability and maintenance. Documentation and construction elements were collected, and the concrete of the three bridges was visually and by non-destructive tests (pacometry, carbonation and sclerometry) analyzed. It was identified the deterioration conditions, the environmental characteristics in which they are inserted (the effect

Como citar:
SOUZA, R. S.; FAJARDO, A. A.; BARBOSA, M. T. *et al*. Obra de arte especiais: ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado de diferentes idades. Template para a conferência ENTAC2022. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-12.

of age and aggressiveness) in correlation with the carbonation and sclerometry of the concrete. Durability was compromised, caused by the high degree of carbonation, insufficient thickness of reinforcement cover and deficiency in mechanical properties.
Keywords: Concrete, hardness index, carbonation, durability, bridges.

INTRODUÇÃO

Os estudos demonstram que a durabilidade do concreto, em obras de artes especiais (OAEs), que possuem uma vida útil superior a 100 anos, tendem a apresentar graves deteriorações nas suas estruturas [1 - 4]. A classe de agressividade ambiental, considerada atualmente no projeto de estruturas de concreto armado é um fator preponderante e que influencia o seu desempenho durante a vida útil uma vez que a concentrações de dióxido de carbono, incidência de sais por meio da ação de íons cloreto (maré) ou mesmo as contaminadas por resíduos provenientes de efluentes sanitários e ou industriais [5] comprometem a durabilidade.

O estado de Minas Gerais contém cerca 15% do total de OAEs no Brasil, assim sendo, 940 OAEs [7]. Destaca-se que há diversas lacunas quanto à durabilidade das estruturas de concreto armado submetidas a condições adversas de agressividade por longos períodos [2-4; 7-9]. Vários estudiosos [2-4; 7-9] apresentam que estas estruturas de concreto são submetidas a vários processos de deterioração e a vários ambientes de agressividade durante sua vida útil. Ressaltam ainda [10-11] como fatores preponderantes a durabilidade destas OAEs são as escolhas corretas dos materiais e dos processos construtivos. Tem-se ainda, a demanda por serviços de manutenções preventivas e corretivas nas estruturas de OAEs [6]. A falta ou a definição inadequada de uma destas atividades são os principais motivos para ocasionar acidentes em pontes e viadutos [6].

Diante deste contexto, o objeto desta pesquisa é efetuar um estudo da profundidade de carbonatação e de índice esclerométrico no concreto empregado na confecção de três pontes localizadas no estado de Minas Gerais e com idades iguais a: 94, 62 e 4 anos, que atenderam os preceitos da normalização brasileira em diferentes períodos, a saber: 1940, 1960 e 2014 [12]. No presente estudo, identificou-se as características ambientais (exigências da atual norma brasileira NBR 6118 [12]), identificou-se as anomalias e, em seguida, empregou-se procedimentos experimentais não-destrutivos a fim de se avaliar o efeito da idade nas propriedades físicas dos concretos. Finalmente, cabe esclarecer que os objetos de estudo foram selecionados em função da disponibilidade de acesso aos dados necessários para execução do estudo proposto.

LOCAIS DE ESTUDO: Ponte rodoviária (OAE)

As OAEs estudadas estão localizadas no estado de Minas Gerais. Foram selecionadas a partir das 940 [7] OAEs, dando envase nos anos de construção (idades diferentes), projetos existentes e facilidade de acesso aos elementos construtivos. Apresenta-se a seguir as características das OAEs estudadas:

I) **OAE-A**: Ponte sobre o Rio das Velhas (vide **Erro! Fonte de referência não encontrada.**-A), localizada sobre o Rio das Velhas, Rodovia Municipal trecho da cidade

de Rio Acima, com idade igual a 94 anos, sua construção ocorreu no período 1923 - 1928**Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Principais características: pista de rolamento única; 104,00 x 5,00 m (comprimento x largura), estrutura em concreto armado revestida com pavimento asfáltico; superestrutura fragmentada em vãos de dimensão igual a 16,00 m – 16,00 m – 20,00 m – 20,00 m – 16,00 m – 16,00 m, bem como há duas longarinas principais com altura de 1,20 m, ligadas por transversinas espaçadas de 2,00 m nos vãos extremos e 2,00 m nos vãos intermediários; mesoestrutura é constituída de encontros de concreto ciclópico nos extremos da ponte e nos apoios intermediários é composta por pilares de seção retangular constante de 0,60 m x 0,60 m, contraventados por uma viga (0,60 x 0,60 m) em sua extremidade inferior e outra viga (0,60 x 0,60 m) na extremidade superior; infraestrutura formada por blocos retangulares apoiados em estacas de madeira e, finalmente, a inclusão, após sua construção (em data não informada) de passarela metálica com largura de 1,20 m para uso de pedestre.

II) **OAE-B**: Ponte Baronesa localizada sobre o Ribeirão Lajes construída, aproximadamente, em 1960, ou seja, possui 62 anos, na cidade de Santa Luzia- MG (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) possui 40,50 m x 8,05 m, sendo que 7,05, em concreto armado revestida com pavimento asfáltico e o restante é destinado a passarela para pedestre. A superestrutura é composta por vãos 11, 475 m, 15,550 m, 11,475 m, respectivamente, e balanço direito/ esquerdo igual a 1,00 m. A mesoestrutura é constituída de encontros nos extremos da ponte parede frontal de encontro de concreto armado, parede lateral de encontro de gabião e nos apoios intermediários é composta por pilares de seção retangular constante; Viga T ou I principal de concreto armado; Viga T ou I secundária de concreto armado, transversina de concreto armado ligada à laje (Laje superior de concreto armado). A infraestrutura é formada por bloco de concreto armado - fundação direta.

III) **OAE-C:** Ponte Belo Vale, localizada sobre o Rio Paraopeba e inaugurada em 2018 (Figura 1), possui 11,218 m x 8,50 m, largura útil pista (m) igual a 7.30, sendo construída em concreto armado revestida com pavimento asfáltico; possui passeio/calçada para pedestres em concreto pré-fabricado com largura de 1,40 m. A mesoestrutura é constituída de encontros nos extremos da ponte e nos apoios intermediários é composta por pilares de seção retangular constante; vigas pré-moldadas; transversina de concreto armado ligada à laje painel maciço. A infraestrutura é formada por blocos retangulares de coroamento. Os blocos são apoiados em estacas raiz.

Figura 1: Obras de artes especiais (OAEs) estudadas.



PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo adotou a sequência executiva: levantamento da documentação (projetos, sistema construtivo, histórico dos serviços de manutenção); identificação dos elementos construtivos – vistoria em campo identificando: projetado x executado; análise visual das manifestações patológicas e, ensaios não destrutivos, a saber:

a) Pacometria (o equipamento da Bosch wallscanner D-test 150, empegado para delimitar as armaduras);
b) Carbonatação (aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína 1% Solução Alcoólica 1000ml e para a medição da profundidade de carbonatação, paquímetro de precisão 0,01 mm), Imagens de microscópio digital (aproximação de 1000 vezes) e câmera fotográfica (Nikon Coopix P600 com zoom de 60x extensível até 120x);
c) Esclerometria (equipamento PROCEQ modelo Silver schmidt Type SH01-003-0374, seguindo a norma [13]).

As análises das manifestações patológicas foram realizadas nas três obras de arte. Utilizou-se inspeção visual detalhada que procurou classificar as condições das estruturas de acordo com definições do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da normalização pertinente (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A partir destas foram possíveis calcular a vida útil de cada OAE.

Salienta-se que [14 - 15] apresentam uma proposta de estimativa da vida útil das estruturas de concreto considerando as características do projeto, agressividade ambiental e materiais empregados, através da equação (1). A Tabela 1, apresenta os indicadores e os termos de uso. Os serviços de reparação e conservação relacionados e as condições de contorno que resultem de erros na qualidade do projeto e/ou na escolha do material, bem como das condições ambientais.

$$LC_{ESTIMADA} = LC_R . A . B . C \qquad (1)$$

Onde: $LC_{ESTIMADA}$ o ciclo de vida estimado da ponte;
LC_R é o ciclo de vida mínimo, que normalmente é prescrito na normatização, ou seja, 50 anos em relação à [16]

Tabela 1: Indicadores para as características de qualidade e ambiente (adaptado de [14 - 15]

Indicadores		Termos de uso		
		RUIM	COMUM	BOM
A	PROJETO: detalhes da edificação	0.8	1.0	1.2
B	MATERIAIS DE REVESTIMENTO: impermeabilização	0.8	1.0	1.2
C	AMBIENTAL: agentes agressivos (incluindo CO_2)	0.8	1.0	1.2

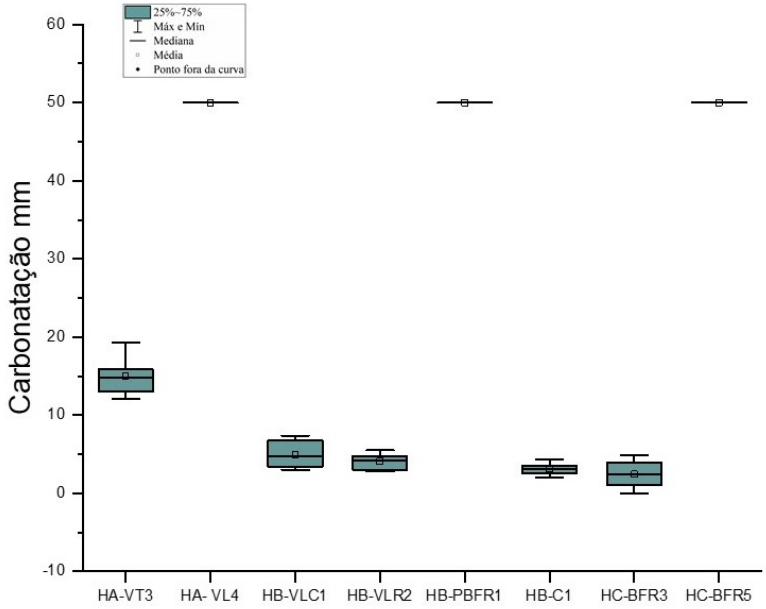
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre entre compostos hidratados do concreto e o CO_2, diminuindo a alcalinidade do concreto e deixando a armaduras mais vulneráveis à corrosão [19]. Sabe-se que vários fatores podem influenciar no

processo de carbonatação do concreto, incluídos as condições ambientais, umidade relativa, concentração de CO_2 e temperatura [20 21, 22; 23; 24]. Logo, deve-se analisar os resultados da carbonatação (Figura 2) comparando-os com os fatores influenciadores nas OAE A, B e C.

Figura 2: Resultados de carbonatação da OAE-A, OAE-B e OAE-C



Fonte: Os autores

Sendo assim, a viga de transição (VT3) localizada na OAE-A (Figura 2) apresentou reduzida profundidade carbonatada (19,34mm). A viga não se encontra próximo do rio, entretanto demonstrou algumas fissuras e trincas (Figura 3), o que pode ter facilitado o processo, mesmo que de forma lenta [25]. Um outro fator que pode ter influenciado para que o ingresso da carbonatação seja baixa, é a porosidade e o fator a/c [26] que tende ser menor nos elementos da superestrutura. Tem-se ainda, a quantidade baixa de veículos, uma estimativa de 4.738 [27] e da população local, 10.420 habitantes [28]. Em contrapartida a viga lateral VL4 (Figura 2) apresentaram valores de 50,00 mm (ou seja, toda a espessura avaliada está carbonatada); outro ponto importante, é que a VL4 não estava próxima do rio (Figura 3).

Evidencia-se na viga VLC1 localizada na OAE-B (Figura 3) uma profundidade de carbonatação igual a 7,39 mm. Esta viga não se encontra perto do rio e não manifestou trincas e fissuras. Já a que se localiza (VLR2) próximo ao rio possui uma profundidade igual a 5,53mm. Diante disto, e comparando com os valores da cortina C1 (4,34mm) que também não está próxima do rio, tem-se que estes resultados foram influenciados pela porosidade, tipo e quantidade de cimento (geralmente maior nos elementos de superestrutura) e as poucas fissuras e trincas presentes (Figura 4). O pilar do bloco de fundação no rio - PBFR1 (em função das chuvas tem períodos que fica submerso) e apresentaram toda região de teste carbonatada, atingindo valor máximo de penetração (50,00mm). Na região, onde se localiza essa OAE, constata-se uma população igual a 89.943 habitantes [29] e o número de veículos na cidade de Santa Luzia estimado em 220.444 [30].

Figura 3: Viga lateral, (a esquerda) foto da lupa (VL4), (a direita) foto normal do pilar.



Fonte: Os autores

Figura 4: Viga de ligação do rio (VLR2), (c) foto da lupa, (d) foto normal.



Fonte: Os autores

A OAE-C, recém-construída, possui uma profundidade de carbonatação baixa, na ordem de 5,56mm em decorrência da baixa porosidade dos atuais concretos [21 - 31]. Entretanto, o bloco de fundação, que fica submerso no rio (BFR5) em determinadas épocas do ano, apresentou a sua região avaliada toda carbonatada (50,00mm). Um ponto a ser destacado, é que em ambos os blocos não foram detectadas fissuras e trincas. Entretanto, foram utilizados os mesmos fatores de a/c 0,60. Como tinham contato direto com a água do rio e não apresentaram fissuras e trincas, os motivos que podem ter influenciado estariam associados a possível alteração nos processos de execução, gerando uma região mais permeável. Cabe mencionar que a OAE-C é recente (4 anos de idade), a população estimada na região é igual a 7.719 habitantes [32] e o número de veículos na cidade de Belo Vale está estimado em 4.216 [33].

No estudo efetuado, verifica-se (Tabela 2) que OAE-A, por ser mais antiga, apresenta com elevado índice de carbonatação ocasionando, inclusive desplacamento de concreto e comprometendo toda estrutura. OAE-B se localizada dentro de um perímetro urbano, possui intenso tráfego - apresenta vários pontos carbonatados, principalmente próximos ao afluente. Essas OEAs receberem elevadas concentrações de CO_2 comprometendo o desempenho e a durabilidades. Para a OAE-C, localizada em ambiente rural e de pouco tráfego, esperava-se uma incidência da anomalia menos significativa. Entretanto, para a região da estrutura temporariamente submersa, já se identifica carbonatação devido à grande contaminação do curso de água.

Tabela 2: Locais ensaiados e grau de carbonatação

OAEs	A	B	C
Pilar	xx	xx	x
Viga	xxx	x	x
Viga de fundação	xxx	xx	xx
Blocos de fundação	xxx	xxx	xx

Legenda: x – pouco xx – médio - xxx todo comprometido

Índice Esclerometrico

Nos projetos das devidas OAEs, disponibilizados pelo DNIT, constatou-se que as obras A e B não dispunham de informações sobre resistências do concreto empregado na confecção das estruturas, trem Tipo ou a relação água/cimento, tendo somente especificações das armaduras e local de utilização. O concreto utilizado na época seguia as especificações das normas [34 – 35], o fator a/c dependia das condições peculiares de cada obra e da resistência que era pretendida. Na OAE-C, que já foi concebida com as especificações da norma [12], foram preconizados no projeto as resistências ilustradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo um concreto de regularização de f_{ck}>9MPa, cargas móveis conforme o trem Tipo TB45 [36], módulo de elasticidade transversal do aparelho de apoio igual 1,0 MPa, com uma carga admissível de 15,0 MPa. Ao definirem os pontos foram realizados ensaios de pacometria para localização das armaduras, para que não houvesse influência destas nos resultados de esclerometria.

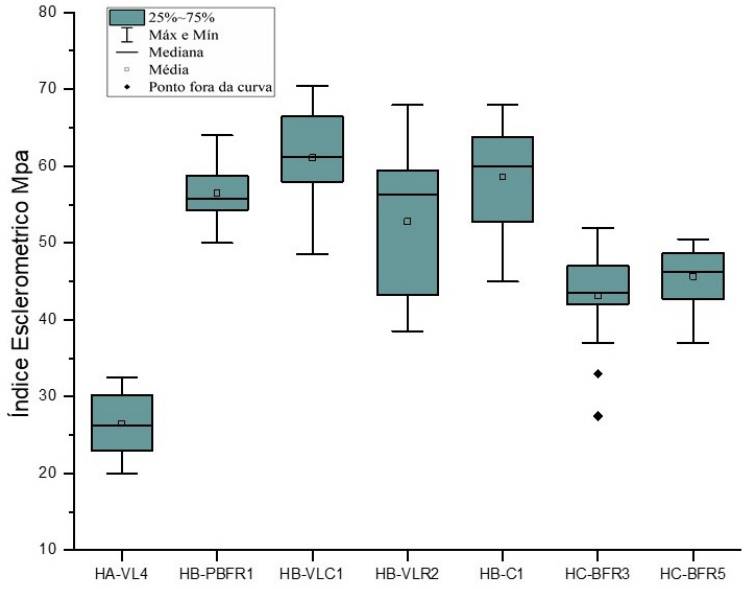
Tabela 3: Classe de Resistencia do Concreto

Legislação	Resistência	Relação a/c
[34]	12,5 MPa	-
[35]	13,5 MPa	-
[12]	Infraestrutura $f_{ck} \geq 25$ MPa	0,60
	Mesoestrutura $f_{ck} \geq 25$ MPa	0,55
	Superestrutura $f_{ck} \geq 35$	0,45

A variação de resistência à compressão do concreto pode ser devido a diversos fatores, como: porosidade, umidade, carbonatação, temperatura elevada, sendo o resultado do ensaio fortemente dependente da densidade dos agregados e da adsorção de água [37 - 38]. Sendo assim, no que se refere ao índice esclerométrico foi possível constatar para OAE-A (Figura 5) na VL4 um valor menor do que encontrados da obra OAE-B PBFR1, VLC1, C1 E VLR2. Constatou-se que os elementos estruturais posicionados no rio, como o da viga da obra OAE-A, apresentaram uma resistência superficial média de 26,5 MPa devendo-se considerar a influência do intemperismo, da umidade e da carbonatação, que tendem influenciar nos resultados da dureza superficial [39 – 40]. Portanto o pilar do bloco de fundação no rio - PBFR1 (em função das chuvas tem períodos que fica submerso) apresentaram toda região de teste carbonatada, atingindo valor máximo de penetração (50,00mm). Isto propícia a uma maior inserção de carbonatação [41], similar as vigas que estão próximo ao rio e estão sujeitos ao mesmo tipo de dano ou deterioração. Na OAE-C, os blocos de fundação BFR3 E BFR5

apresentaram uma média de 43,1 MPa e 45,7 MPa. Apesar de BFR3 apresentar uma carbonatação baixa teve um índice esclerométrico parecido com BFR5. Isto pode ter ocorrido devido se encontram próximos do rio, onde ocorrem períodos de secagens e cheias, nos quais podem ter hidratado e aumentado a resistência superficial do concreto.

Figura 5: Resultados de Índice esclerometrico da OAE - A, OAE – B, OAE - C



Legenda: BF = bloco de fundação, PR = Pilar no rio, V= Viga, C = cortina, VL = Viga de ligação, BFR = Bloco de fundação no rio
Fonte: Os autores

Analisando os dados da carbonatação e esclerometria das três pontes, observa-se que a profundidade da carbonatação interfere na dureza do concreto, ou seja, a dureza tende a aumentar para maiores profundidades de carbonatação [42]. Destaca-se que [43] menciona que uma superfície carbonatada possui índices esclerométricos maiores do que os correspondentes às camadas internas do elemento estrutural. Na Infraestrutura e Mesoestrutura constatou-se resistências estimadas maiores que previstas nos projetos (f_{ck} ≥ 25 MPa) destacando o feito da carbonatação. Observa-se ainda que a porosidade e a presença de umidade impactaram aumentando a resistência a compressão do concreto [44 – 45].

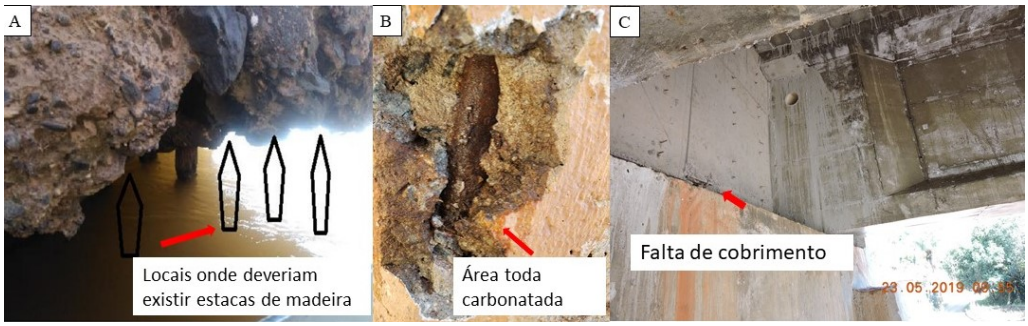
Estimativa de vida útil

Para OAE-A (Figura 6) identificou-se exposição (ou a falta) das estacas de madeira, redução da seção destes elementos construtivos o que leva a redução da capacidade de carga destes apoios. Consequente, tem-se o risco de rompimento brusco, comprometendo toda a estrutura.

Em todas as OAEs (A, B e C) identificou-se (Figura 6) contato com a água contaminada de esgoto fluvial (blocos de fundação e pilares) nos períodos chuvosos. Observou-se ainda, nas OAE-A e OAE-B (Figura 6), brocas e vazios de concretagem que

comprometem a capacidade de carga e a alteração na densidade do elemento estrutural. Na OAE-C o principal problema detectado foi a falta de cobrimento adequado as armaduras devido a erros de construção. Tem-se com isto a redução da durabilidade e da integralidade do elemento estrutural como um todo [12, 17 – 18].

Figura 6: Ausência de estacas de madeira na obra HA (a esquerda), presença de carbonatação no pilar da obra HB (no centro), a falta de cobrimento e vazios de concretagem na obra HC (a direita)



Fonte: Os autores

As manifestações patológicas ocorrem em todas as OAEs, inclusive na mais recente. Para o cálculo de vida estimado das pontes (Tabela 4), adotou-se o valor de 50 anos, sendo o mínimo estabelecido pela norma brasileira [16].

Tabela 4: O ciclo de vida estimado das pontes

	Indicadores	OAE - A	OAE - B	OAE - C
A	Projeto	0,80	1,00	1,00
B	Materiais de revestimento	0,80	0,80	0,95
C	Ambiental	0,80	0,80	1,00
	$LC_{ESTIMADA} = 50\,.A.B.C$ (Anos)	**25.6**	**32,0**	**47,5**

A OAE-A apresentou a menor estimativa de ciclo de vida, 25,6 anos, em decorrência das manifestações patológicas observadas, agressividade ambiental e falhas de projetos. Por outro lado, a obra OAE-C apresentou a maior estimativa, de 47,5 anos, devendo-se inclusive considerar que mesma já foi concebida na atual normalização brasileira, onde prevê-se o emprego o controle de qualidade dos materiais empregados na sua confecção e uma análise mais criteriosa nos processos de projeto. A pequena redução na OAE-C se deu em função da falta de comprimento de armadura.

CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos das três OEAs, pode-se concluir que a dureza superficial do concreto, apresentou-se maior para os elementos estruturais, que exibiram maior índice de carbonatação. No entanto, a exposição temporária ao rio devido aos agentes agressivos (elevada contaminação por esgotos domésticos e industriais) e variações de umidade (seco *versus* molhadas) também foram fundamentais. A cura submersa, fez aumentar a resistência mecânica, todavia

aumentando também a migração dos agentes agressivos que geraram deterioração por causa da presença de matéria orgânica nas águas.

Diante do exposto, evidencia-se a importância do projeto atender as prescrições normativas e demais literaturas técnicas bem como, adotar cautela na etapa de execução, mão de obra qualificada, avaliar adequadamente a agressividade ambiental e o emprego de materiais adequados. Vale destacar, também, que os programas de serviços de manutenções preventivas e corretivas, são essenciais para preservar a durabilidade das OEAs.

AGRADECIMENTOS

A equipe de pesquisa agradece às Universidades Federais de Minas Gerais e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela infraestrutura e às agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio concedido a este estudo.

REFERÊNCIAS

[1] VAYAS, Loannis; ARISTIDIS, Lliopoulos. **Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes**. New York, 2014.

[2] ALEXANDER, Mark; BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Durability of Concrete: Design and Construction**. 1 ed. New York, 2017. 345p.

[3] AZENHA, Miguel; GABRIJEL, Ivan; SCHLICKE, Dirk; KANSTAD, Terje; JENSEN, Ole Mejlhede. Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures. **International Rilem Conference on Materials**. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. v. 1, p. 22-24, Agosto, 2016.

[4] DYER, Thomas. **Concrete Durability**.1. ed. New York: Ed Crc Pres 2014.447p. ENGEPLUS. Disponível em <http://www.engeplus.com.br/noticia/transito/2019/duplicacao-da-br-101-tem-48-pontes-em-operacao> acesso em: 01/12/2019.

[5] GIRALDO, John Mario García; GIRALDO, Jaime Ospina; GOMES, Edir Amparo Graciano. La infraestructura de puentes em las vias secundarias del departamento de antioquia. **EIA**. v.11, n. 22, p. 119-131, Dezembro, 2014.

[6] INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO IBRACON - IBRACON. Seminários sobre riscos e acidentes estruturais em obras de engenharia civil. Casos de colapsos estruturais em pontes, viadutos e passarelas. p. 42. Recife, 12 de novembro de 2015.

[7] SINAENCO - SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DE ARQUITETURA E ENGENHARIA CONSULTIVA - Infraestrutura de Minas Gerais: Prazo de validade vencido, p. 25, 2016.

[8] FOWLER, Dale E. The findings of an empirical study of the application of criminal law in non-terrorist disasters and tragedies 2017. **Futures.** v. 102, p. 134-145, Setembro 2018.

[9] MOON, J. Hyuck. **Cracks Everywhere: How the Seongsu Bridge Collapse Changed Seoul's Urban Personality**.51 f. May 18, 2011.

[10] BARBOSA, Maria Teresa; POLISSENI, Antônio Eduardo; HIPPERT, Maria Aparecida; SANTOS, White José dos Santos. Patologias de Edifícios Históricos Tombados Estudo de Caso – Cine Teatro Central. **Vitruvius**, Janeiro 2011.

[11] TANG, S.W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure Review. **Article Cement and Concrete Research**. v. 78, p. 143-154, Dezembro, 2015.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

[14] BARBOSA, M T; ROSSE, V.; LAURINDO, N. Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades. **J. Building Engineering**. 2021. 102555.

[15] PHILLIPSON, M. C., EMMANUEL, R., BAKER, P. H. The durability of building materials under a changing climate. **WIREs, Clim Change**. 2016. 590-599. DOI: 10.1002/wcc.398.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

[17] VÖLKER, Christoph et al. Multi sensor data fusion approach for automatic honeycomb detection in concrete**. Ndt & e International**, [s.l.], v. 71, p. 54-60, abr. 2015.

[18] HELLEBOIS, Armande et al. 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 44, p. 149-160, Julho. 2013.

[19] BROOMFIELD, John P. **Corrosion of Steel in Concrete. Understanding, Investigation and Repair**. Second ed. New York, USA. 2007, p. 294.

[20] FELIX, E, F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121050, Janeiro. 2021.

[21] WITKOWSKI, H.; KONIORCZYK, M. The influence of pozzolanic additives on the carbonation rate and Life Cycle Inventory of concrete. **Construction And Building Materials**, v. 254, p. 119301-9, Setembro. 2020.

[22] CASCUDO, O.; PIRES, P.; CARASEK, H. *et al*. Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation. **Cement And Concrete Composites**, v. 115, p. 103858-13, Janeiro. 2021

[23] RAMACHANDRAN, D.; UTHAMAN, S.; VISHWAKARMA, V. Studies of carbonation process in nanoparticles modified fly ash concrete. **Construction And Building Materials**, v. 252, p. 119127-10, Agosto. 2020.

[24] WANG, X-H.; VAL, D, V.; ZHENG, L. *et al*. Carbonation of loaded RC elements made of different concrete types: accelerated testing and future predictions. **Construction And Building Materials**, v. 243, p. 118259-14, May. 2020.

[25] SHI, J.; WU, M.; MING, J. Degradation effect of carbonation on electrochemical behavior of 2304 duplex stainless steel in simulated concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 177, p. 109006-18, Dezembro. 2020.

[26] MAGALHÃES, A. G.; SILVA, F. J.; REZENDE, M. A. P. *et al*. The Influence of the Water/Cement Ratio in the Open Porosity and in the Carbonation Front Advancing in Cementitious Matrix Composites. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 864, p. 313–317, Abril. 2017.

[27] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: frota de veículos. 2018a. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/rio-acima/pesquisa/22/28120> acesso em: 15 de January de 2021.

[28] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: população. 2020a. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/rio-acima.html> acesso em: 15 de January de 2021.

[29] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: população. 2020b. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/santa-luzia.html> 15 de January de 2021.

[30] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: frota de veículos. 2018b. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/santa-luzia/pesquisa/22/28120> acesso em: 15 de January de 2021.

[31] CHEN, G.; LV, Y.; ZHANG, Y. et al. Carbonation depth predictions in concrete structures under changing climate condition in China. **Engineering Failure Analysis**, v. 119, p. 104990, Outubro. 2021.

[32] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: população. 2020c. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-vale.html> acesso em: 15 de January de 2021.

[33] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e esta-dos: frota de veículos. 2018c. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-vale/pesquisa/22/28120> acesso em: 15 de January de 2021.

[34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB1 1940**: Cálculo e execução de concreto armado. Rio de Janeiro, 1940.

[35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB1 1960**: Cálculo e execução de obras de concreto armado, Cargas móveis em pontes rodoviárias, Barras de aço torcidas a frio para concreto armado. Rio de Janeiro, 1960.

[36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.

[37] SINGH, N. SINGH, S.P. Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques. **Construction And Building Materials**, v. 181, p. 73-84, Agosto. 2018.

[38] POORARBABI, A. GHASEMI, M. MOGHADDAM, M. Concrete compressive strength prediction using non-destructive tests through response surface methodology**. Ain Shams Engineering Journal**. v. 11, p. 939-949.Dezembro. 2020.

[39] ŠAVIJA, Branko; LUKOVIC´, Mladena. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**.v.117, p. 285-301, 2016.

[40] SZILÁGYI, K.; BOROSNYÓI, A.; ZSIGOVICS, I. Rebound surface hardness of concrete: Introduction of an empirical constitutive model. **Construction and Building Materials**, vol. 25, no. 5, p. 2480–2487, Dezembro. 2011.

[41] ANN, K.Y.; PACK, S.-W.; HWANG, J.-P. *et al*. Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 24, n. 8, p. 1494-1501, Agosto. 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.023.

[42] KUMAVAT, H.R. CHANDAK, N.R. PATIL, I.T. Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. **Case Studies in Construction Materials**. v.14, p. e00491. June. 2021.

[44] KAZEMI, M. MADANDOUST, R. BRITO, J. Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing. **Construction and Building Material**. v. 224. p. 630-638. Novembro. 2019.

[45] KOVLER, K. WANG, F. MURAVIN, B. Testing of concrete by rebound method: leeb versus Schmidt hammers. **Materials and Structures**. v.51, p. 138. Outubro. 2018.

[43] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 228 - 1R**, In place methods for determination of strength of concrete, Detroit, p. 26, 1989.