



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MAYCON HANDERSON DE OLIVEIRA BESSA

**TECNOLOGIA BIM NA CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
CONSTRUÇÕES EXISTENTES: ESTUDO DE CASO**

RUSSAS

2022

MAYCON HANDERSON DE OLIVEIRA BESSA

TECNOLOGIA BIM NA CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
CONSTRUÇÕES EXISTENTES: ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus Russas,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes
Teixeira Mesquita.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B465t Bessa, Maycon Handerson de Oliveira.
Tecnologia BIM na caracterização e monitoramento de construções existentes : estudo de caso / Maycon Handerson de Oliveira Bessa. – 2022.
70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. BIM. 2. Gestão da manutenção. 3. Inspeção técnica. 4. Pontes. I. Título.

CDD 620

MAYCON HANDERSON DE OLIVEIRA BESSA

TECNOLOGIA BIM NA CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
CONSTRUÇÕES EXISTENTES: ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes
Teixeira Mesquita.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Israel Nilton Lopes Sousa
Laboratório de Reabilitação e Durabilidade
das Construções (LAREB/UFC)

Profa. Dra. Mylene de Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a minha mãe Maria Ivaldene, meu pai José Helder, minha irmã Layane e minha namorada Gabriela. O caminho não foi fácil, mas necessário para os aprendizados da vida. Obrigado por tudo, sempre.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder paciência, iluminação e perseverança durante todo o curso de graduação, onde tive a felicidade de crescer pessoalmente e profissionalmente.

Aos meus pais, Ivaldene e Helder, por tudo que fizeram por mim e por terem me dado educação e exemplos de caráter, dignidade e honestidade. Obrigado também pelo companheirismo, que com muito amor e sacrifício compartilharam comigo anos inesquecíveis estando sempre presentes na minha vida.

A toda minha família por todo apoio e incentivo.

Aos meus colegas de graduação, por serem amigos que fiz ao longo do curso, onde sempre nos ajudamos e apoiamos nas horas difíceis, por serem a companhia nas noites em claro de estudos e experiências de vida adquiridas junto. Os verdadeiros saberão.

A todos os meus professores da graduação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas por todos os aprendizados compartilhados.

Ao professor orientador Dr. Esequiel Mesquita, pela amizade e por todos ensinamentos e contribuições essenciais para este trabalho e para a minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB) por toda experiência proporcionada para o meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os colegas do LAREB - UFC, pelo coleguismo, troca de informações e experiências ao longo da graduação.

A minha namorada Gabriela, pelo apoio, incentivo e paciência durante toda esta jornada.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta pelas tarefas desenvolvidas durante o curso e neste trabalho.

RESUMO

Com o avanço da implementação da tecnologia BIM (Building Information Modeling) na construção civil, surgem novas possibilidades e formas de projetar, devido às demandas geradas pelos usuários. Portanto, desde a fase de concepção e elaboração do projeto, podem ser inseridas informações que levam o modelo a alcançar os objetivos de uso e operação estabelecidos ainda nessa fase. A integração do BIM nas inspeções e gestão da manutenção ainda são pouco exploradas comparado com a aplicação nos processos de planejamento, projeto e construção. Neste contexto, com a necessidade de utilizar um sistema inteligente de informações e até mesmo com alertas de avisos de vistorias, de manutenção e de operação, esse trabalho busca desenvolver um método de armazenamento dos dados da inspeção técnica diretamente no modelo virtual 3D para uma futura manutenção da OEA por meio de um estudo de caso. Para tal, foi utilizada a ponte Governador Newton Bello, localizada sobre o Rio Anil na cidade de São Luís – MA. Para modelagem foi adotado o software BIM Autodesk Revit® versão 2021 e inicialmente realizou-se a criação de famílias de peças (vigas, pilares e tabuleiro) separadamente e alocadas em um modelo geral 3D, em seguida foi realizada a inspeção técnica e ensaios necessários para a avaliação da ponte e selecionados os principais resultados e por fim consistiu na implementação de todos os dados coletados na inspeção no modelo BIM. Baseado nos resultados obtidos, este trabalho pode contribuir para aplicação do Building Information Modeling (BIM) na caracterização e monitoramento de construções com ênfase nas manifestações patológicas e ensaios em elementos de construção. O Revit possibilitou a integração dos modelos 3D com outros tipos de informações da OAEs, além de possibilitar a adição dos dados relacionados às análises, ensaios e recuperação de elementos construtivos danificados.

Palavras-chave: BIM; gestão da manutenção; inspeção técnica; pontes.

ABSTRACT

With the advancement of the implementation of BIM (Building Information Modeling) technology in construction, new possibilities and ways to design have emerged, due to the demands generated by users. Therefore, from the project's conception and elaboration phase, information can be inserted that leads the model to achieve the objectives of use and operation established still in this phase. The integration of BIM in inspections and maintenance management is still little explored compared to its application in planning, design, and construction processes. In this context, with the need to use an intelligent information system and even with alerts for warnings of inspections, maintenance and operation, this work seeks to develop a method for storing technical inspection data directly on the 3D virtual model for future OAS maintenance through a case study. The Governador Newton Bello bridge, located over the Anil River in the city of São Luís, MA, was used for this purpose. For modeling, the BIM software Autodesk Revit® version 2021 was adopted, and initially the creation of families of parts (beams, columns, and deck) was performed separately and allocated in a general 3D model, then the technical inspection and tests required for the evaluation of the bridge were performed and the main results were selected. Based on the results obtained, this work can contribute to the application of Building Information Modeling (BIM) in the characterization and monitoring of buildings with an emphasis on pathological manifestations and tests on building elements. Revit enabled the integration of 3D models with other types of OAEs information, besides allowing the addition of data related to analysis, testing, and recovery of damaged building elements.

Keywords: BIM; maintenance management; building inspection; bridges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de ponte em viga	15
Figura 2 - Diferentes tipos de pontes.....	16
Figura 3 - Principais elementos das pontes	16
Figura 4 - Mecanismo de carbonatação do concreto	19
Figura 5 - Equipamento localizador de barras de aço (Pacômetro).....	20
Figura 6 - Equipamento extrator de testemunhos	21
Figura 7 - Esquema de medição do potencial de corrosão	22
Figura 8 - Mecanismo de funcionamento do esclerômetro	23
Figura 9 - Bigorna de aço	24
Figura 10 - Modelo de Divisão da área Ensaída. Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012).....	25
Figura 11 - Principais benefícios da integração de dados BIM para inspeção técnica.....	30
Figura 12 - Parte do projeto disponibilizado pela SPG Brasil.....	33
Figura 13 - Modelo 3D da Ponte Governador Newton Bello.....	33
Figura 14 - Mapeamento dos danos vão 15 ao 12°	34
Figura 15 - Mapeamento dos danos vão 10 ao 6°	35
Figura 16 - Mapeamento dos danos: vão 5° ao 2°.....	35
Figura 17 - Mapeamento dos danos Viga de transição VT3	36
Figura 18 - Viga de transição VT5	37
Figura 19 - Ensaio de profundidade de carbonatação V106.....	38
Figura 20 - Ensaio de profundidade de carbonatação V107.....	38
Figura 21 - Ensaio de profundidade de carbonatação V111	39
Figura 22 - Ensaio de profundidade de carbonatação V110-2	39
Figura 23 - Realização do ensaio de pacometria em viga	42
Figura 24 - Extração dos corpos de prova sendo realizada	43
Figura 25 - CP's retificados para ensaio de resistência à compressão	43
Figura 26 - Locação da região de extração de testemunhos em planta baixa entre o primeiro e segundo vão	44
Figura 27 - Locação da região de extração de testemunhos em planta baixa entre o terceiro e quarto vão	44
Figura 28 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT13 em vista transversal.....	44
Figura 29 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT14 em vista transversal.....	45
Figura 30 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT15 em vista transversal.....	45
Figura 31 - Escala de cor utilizada, potencial em mV	47
Figura 32 - Painéis com os ensaios do potencial de corrosão e suas posições na ponte	48
Figura 33 - Painel VT3 contendo os resultados do potencial de corrosão	48
Figura 34 - Painel VT4 contendo os resultados do potencial de corrosão	49
Figura 35 - Painel VT5 contendo os resultados do potencial de corrosão	49
Figura 36 - Painel VT6 contendo os resultados do potencial de corrosão	50
Figura 37 - Painel VT13 contendo os resultados do potencial de corrosão	50
Figura 38 - Painel VT14 contendo os resultados do potencial de corrosão	51
Figura 39 - Realização do ensaio de esclerometria no vão central da ponte	51

Figura 40 - Localização dos ensaios de esclerometria no primeiro e segundo vão.....	52
Figura 41 - Localização ensaios de esclerometria terceiro e quarto vão	52
Figura 42 - Localização ensaios de esclerometria décimo primeiro e décimo segundo vão....	52
Figura 43 - Localização ensaios de esclerometria décimo primeiro e décimo segundo vão....	53
Figura 44 - Localização dos ensaios de esclerometria no primeiro e segundo vão à vista lateral direita.....	53
Figura 45 - Esquematização da localização dos ensaios realizados nos blocos	53
Figura 46 - Locação dos ensaios de teor de cloretos em planta baixa - 2º vão	56
Figura 47 - Locação dos ensaios de teor de cloretos em planta baixa - 3º vão	56
Figura 48 - Modelo Geral classificado em prioridades	58
Figura 49 - Modelo segmentado com classificação de prioridades (Parte 01).....	58
Figura 50 - Modelo segmentado com classificação de prioridades (Parte 02).....	59
Figura 51 - Quantitativos para reabilitação de 100% da peça	59
Figura 52 - Quantitativos para reabilitação de 50% da peça	59
Figura 53 - Inserção dos dados da inspeção e ensaios realizados na ponte no modelo BIM ...	61

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Valores referência para o potencial de corrosão	23
Tabela 2 - Teores máximos de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto.....	26
Tabela 3 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos segundo a ABNT NBR 12655:2015.....	27
Tabela 4 - Resultados de profundidade de carbonatação	40
Tabela 5 - Estimativas de K para cada peça estrutural	41
Tabela 6 - Correlação entre altura e diâmetro (h/d) dos corpos de prova extraídos.....	46
Tabela 7 - Valor da resistência à compressão corrigida dos corpos de prova extraídos	46
Tabela 8 - Valores das resistências à compressão média dos elementos.....	47
Tabela 9 - Resumo dos índices esclerométricos obtidos	54
Tabela 10 - Teores de Cloretos obtidos nas amostras	55
Tabela 11 - Teores de Sulfatos obtidos nas amostras.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society For Testing And Materials</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	Desenho assistido por computador
FM	<i>Facilities Management</i>
IE	Índice Esclerométrico
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
LAREB	Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
OAE	Obras de Arte Especiais
RAA	Reações Álcali-Agregado
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos gerais</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>13</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Pontes	14
<i>2.2.1</i>	<i>Definição</i>	<i>14</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Classificação</i>	<i>14</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Elementos estruturais das Pontes</i>	<i>16</i>
2.2	Mapeamento de danos	17
2.3	Ensaio de caracterização de danos	18
<i>2.3.1</i>	<i>Ensaio de determinação da profundidade média de carbonatação</i>	<i>18</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Ensaio de identificação e localização das armaduras</i>	<i>20</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Extração de testemunhos de concreto</i>	<i>20</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Ensaio de potencial de corrosão</i>	<i>22</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Ensaio de esclerometria</i>	<i>23</i>
<i>2.3.6</i>	<i>Ataque por íons cloretos</i>	<i>26</i>
<i>2.3.7</i>	<i>Ataque por sulfatos</i>	<i>27</i>
2.4	Building Information Modeling (BIM)	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	Procedimento do trabalho	31
4	RESULTADOS	33
4.1	Mapeamento de danos	34
<i>4.1.1</i>	<i>Tabuleiro da ponte</i>	<i>34</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Vão central</i>	<i>36</i>
4.2	Ensaio de caracterização de danos	37
<i>4.2.1</i>	<i>Ensaio de determinação da profundidade média de carbonatação</i>	<i>37</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Determinação da localização das armaduras pelo método eletromagnético – Pacometria</i>	<i>42</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Extração e rompimento de testemunhos</i>	<i>42</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Ensaio de potencial de corrosão</i>	<i>47</i>
<i>4.2.5</i>	<i>Ensaio de esclerometria</i>	<i>51</i>
<i>4.2.6</i>	<i>Ensaio de teor de cloretos</i>	<i>55</i>

<i>4.2.7</i>	<i>Ensaio de teor de sulfatos</i>	<i>56</i>
<i>4.2.8</i>	<i>Análise global da integridade estrutura</i>	<i>57</i>
<i>4.2.9</i>	<i>Análise do mapeamento de dados e ensaios realizados na Ponte</i>	<i>60</i>
<i>4.2.10</i>	<i>Inserção dos dados da inspeção no modelo BIM</i>	<i>61</i>
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE I	67
	APÊNDICE II	70

1 INTRODUÇÃO

As obras de arte de engenharia civil devem ter sua vida útil monitorada, de forma periódica, com objetivo de garantir a segurança e estabilidade estrutural, além de um adequado desempenho de uso e operação. A atividade de inspeção e de gestão da manutenção são essenciais para estabelecer uma programação otimizada das ações necessárias de intervenções a curto, médio e longo prazo (SOUSA, 2017).

Para uma apropriada ação de manutenção é fundamental a caracterização da edificação. Essa etapa é essencial para analisar, de modo sistemático, a incidência, frequência e intensidade dos danos, bem como as áreas de extensão destes. Permite também, por exemplo, identificar as áreas ou elementos mais afetados, identificar a interligação existente entre um tipo de dano e outro e dar indícios dos principais mecanismos de degradação da estrutura. Desta forma, a caracterização fornece os alertas necessários para definir soluções de reparo em um curto tempo, tornando a manutenção mais econômica, pois as anomalias se agravam no decorrer do tempo, consequentemente aumentando os custos para reparação dos mesmos (FRAZÃO, 2020).

Segundo Dukić, Trivunić et al., (2012), o gerenciamento de manutenção adequado deve-se basear na aquisição de dados ao longo da vida útil da edificação. Esses dados devem ser precisos e estar organizados, podendo ser armazenados em formato físico ou digital. O banco de dados deve conter o registro de intervenções e atividades desempenhadas na edificação durante sua vida útil, além de documentos associados ao processo construtivo. Devido a isso, a ausência de um sistema de informações eficiente, impedirão os profissionais responsáveis por gerenciar as manutenções futuras consigam garantir a manutenção adequada (FALORCA et al., 2011).

Desta forma, o BIM pode ser usado como um banco de dados virtual para armazenar, organizar e trocar informações sobre o desempenho das estruturas e registrar processos de inspeção ao longo da vida útil das construções. Com isso, o BIM proporciona projeções do possível comportamento futuro das OAEs, facilitando a intervenção, caso necessário, auxiliando na previsão de erros e reduzindo o tempo de execução da obra.

Com o avanço da implementação da tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) na construção civil, surgem novas possibilidades e formas de projetar, devido às demandas geradas pelos usuários. Portanto, desde a fase de concepção e elaboração do projeto, podem ser inseridas informações que levam o modelo a alcançar os objetivos de uso e operação que foram estabelecidos ainda nessa fase (FRAZÃO, 2020).

A integração do BIM nas inspeções de obras de infraestruturas e gestão da manutenção ainda são poucos exploradas comparado com a aplicação nos processos de planejamento, projeto e construção. Isso ocorre devido aos incentivos e esforços relacionados à implementação do BIM, ter focado principalmente em novas construções, além da falta de estudo em casos reais da aplicação do BIM nos processos de inspeção e gestão de manutenção (BECERIK-GERBER et al., 2012).

Portanto, com a necessidade de utilizar um sistema inteligente de informações e até mesmo com alertas de avisos de vistorias, de manutenção e de operação, esse trabalho busca analisar os potenciais benefícios do uso da tecnologia BIM na melhoria e confiabilidade das inspeções prediais para uma futura manutenção da edificação através de um estudo de caso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolver um método de armazenamento dos dados da inspeção técnica diretamente no modelo virtual 3D para uma futura manutenção da OEA por meio de um estudo de caso.

1.1.2 Objetivos específicos

Para o atendimento do objetivo geral, devem ser alcançados os seguintes objetivos específicos:

- Criação do modelo 3D da edificação a partir dos projetos em CAD;
- Realizar a integração do modelo BIM na inspeção de obras de infraestrutura;
- Analisar os potenciais benefícios do uso da Plataforma BIM na melhoria e confiabilidade das inspeções técnicas;
- Destacar as principais vantagens da utilização do BIM na inspeção de obras de infraestrutura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pontes

2.2.1 Definição

As pontes, denominadas como obras-de-arte especiais (OAE), são obras projetadas para interligar vias de comunicação interrompidas por obstáculos, podendo ser, rios, lagos, braços de mar entre outros. Se tratando de passarelas, são obras de estruturas longilíneas, com a finalidade de transpor obstáculos artificiais e/ou naturais, destinados para travessia de pedestres e/ou ciclistas. Já se o obstáculo a ser transposto é um vale ou outra via, ou seja, obstáculos artificiais, denomina-se mais precisamente de viaduto (EL DEBS; TAKEYA, 2009 e MARCHETTI, 2008).

2.2.2 Classificação

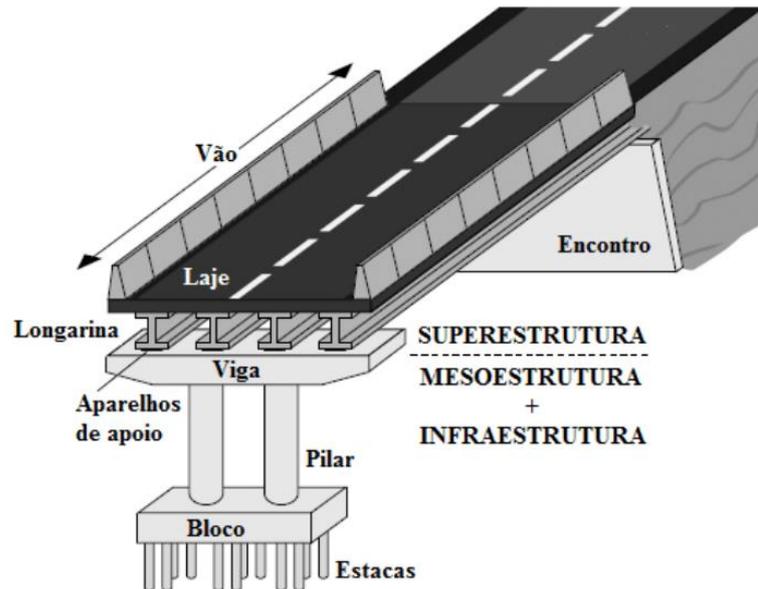
As pontes podem ser classificadas de acordo com os seguintes critérios:

- Natureza do Tráfego: De acordo com Curcio (2008), as pontes caracterizadas pelo tipo de tráfego podem ser classificadas como rodoviárias, ferroviárias, passarelas, aeroviárias, aquedutos ou mistas (Compõe de dois tipos de tráfego distintos);

- Comprimento do vão: Segundo Marchetti (2008), pode-se classificar as OAE's em bueiros, quando a estruturas contém vãos de até 2 metros, pontilhões para vãos de 2 a 10 metros e pontes, quando seus vãos tiverem mais de 10 metros;

- Tipo Estrutural: Vitório (2015) e Soares (2021) apresentam vários sistemas estruturais que podem ser utilizados em uma ponte, dos quais, os principais são: vigas, pórticos em arcos pênseis, estaiadas, laje, tabuleiro celular, balanços sucessivos, entre outros. Dentre os apresentados, salientaremos a ponte em viga, objeto da pesquisa. A Figura 1 exemplifica os componentes de uma ponte em viga.

Figura 1 - Componentes de ponte em viga



Fonte: adaptado pelo autor.

Segundo Cavalcante (2019), as pontes em vigas correspondem a sistemas estruturais, de modo que, o tabuleiro é formado por vigas longitudinais ou principais, denominadas de longarinas, que pode ser com ou sem transversinas. Elas servem de suporte para laje, onde situam-se as pistas de rolamento, responsáveis por receber diretamente os carregamentos (SOARES, 2021).

- Materiais: El Debs e Takeya (2009) e Pfeil (1979), classificam segundo o material da superestrutura em: madeira, alvenaria, concreto armado, concreto protendido, pré-moldadas, metálicas e mistas. Para a escolha adequada dos materiais a serem empregados na ponte, necessita-se de uma análise minuciosa, pois terão influência direta no desempenho das construções deste tipo de estrutura (SOARES, 2021). A Figura 2 mostra os tipos de pontes com diferentes materiais.

Figura 2 - Diferentes tipos de pontes



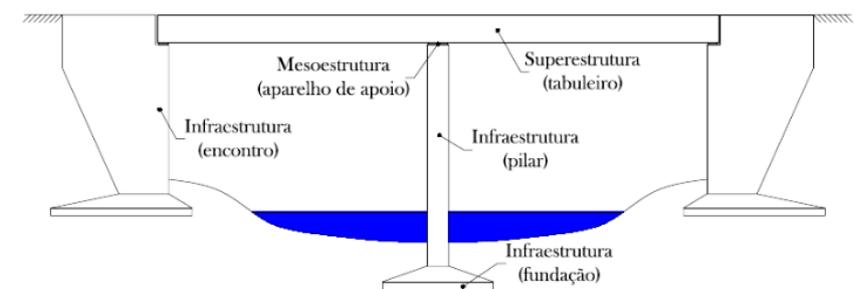
Fonte: adaptado de Nobre (2019).

- Posição do Tabuleiro, Altimetria e Planimetria: Esses fatores estão associados diretamente na arquitetura da OAE. Curcio (2008) expõe que a classificação do tabuleiro pode ser de acordo com a localização na ponte, sua concepção pode ser na parte superior, intermediária ou inferior da estrutura. Ainda conforme Curcio (2008), as OAE's podem ser classificadas em relação à altimetria em pontes retas (horizontais ou rampas) e curvas (tabuleiro convexo ou côncavo) e pela a planimetria, retas (ortogonais e esconsas) e curvas;

2.2.3 Elementos estruturais das Pontes

De acordo com El Debs e Takeya (2007), os elementos estruturais constituintes de uma ponte podem ser divididos, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Principais elementos das pontes



Fonte: adaptado de El Debs e Takeya (2009).

A superestrutura é formada pelo conjunto de elementos estruturais responsáveis por vencer os vãos, composta pelas estruturas principais e secundárias. Essas estruturas são

responsáveis por receber as cargas permanentes e acidentais que são transferidas pelas ações e tráfego sobre a ponte, em que pode ser transmitida para a mesoestrutura ou de forma direta para infraestrutura. As estruturas principais são compostas pelas peças estruturais como vigas longitudinais, e secundários, lajes ou tabuleiros (EL DEBS E TAKEYA, 2007).

A mesoestrutura é composta segundo El Debs e Takeya (2009) pelos elementos de apoio encarregados por distribuir as cargas proveniente da superestrutura para infraestrutura, quais sejam: pilares; aparelhos de apoio; elementos de fundação.

Infraestrutura são os elementos constituídos por encontros, pilares e elementos de fundação, responsáveis por receber os esforços provenientes da mesoestrutura e transmiti-los para o solo. Estes podem ser caracterizados como: sapatas; tubulões; blocos superficiais; e blocos estaqueados (EL DEBS E TAKEYA, 2007).

2.2 Mapeamento de danos

O Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural (2005) conceitua o mapeamento de danos como:

Objetiva a representação gráfica do levantamento de todos os danos existentes e identificados na edificação, relacionando-os aos seus agentes e causas. São considerados danos todos os tipos de lesões e perdas materiais e estruturais, tais como: fissuras, degradações por umidade e ataque de xilófagos, abatimentos, deformações, destacamento de argamassas, corrosão e outros (BRASIL, 2005, p. 28).

No entanto, Braga (2003) expressa o conceito de mapeamento de danos como:

O mapeamento de danos é o registro gráfico, o mais fiel possível, do estado de conservação e das patologias identificadas no edifício. Para tanto, deve-se criar uma simbologia para determinar cada uma das patologias encontradas, como perdas de materiais de revestimento; lacunas em alvenarias e outros elementos construtivos; irregularidades em esquadrias, telhados etc.; rachaduras; desnivelamentos etc.

Desse modo, o mapeamento dos danos é uma etapa essencial para se analisar, de modo sistemático, a incidência, frequência e intensidade dos danos, bem como as áreas de sua extensão. Ela permite, por exemplo, identificar as áreas ou elementos mais afetados, identificar a interligação existente entre um tipo de dano e outro e dar indícios dos principais mecanismos

de degradação da estrutura. Em adição, o mapeamento de danos permite uma melhor distribuição dos números de ensaios ao longo da estrutura, possibilitando a correta escolha dos tipos de ensaios a serem realizados.

2.3 Ensaios de caracterização de danos

2.3.1 Ensaio de determinação da profundidade média de carbonatação

Ferreira (2013), cita que o fenômeno da carbonatação, é compreendido por um fenômeno físico-químico resultante da interação entre componentes de gás carbônico (CO₂) presentes na atmosfera, transportado através dos poros e fissuras do concreto sobre o cimento hidratado, causando a remoção da película passivadora que envolve o aço, deixando o material vulnerável a corrosão das armaduras.

A carbonatação depende de diversos fatores. Desse modo, Houst (1993), expõe os principais fatores que influenciam a velocidade de carbonatação como:

- Relação água/cimento;
- Granulometria;
- Cura, a quantidade e o tipo de cimento;
- Concentração de gás carbônico;
- Temperatura;
- Teor de álcalis;
- Adições minerais.

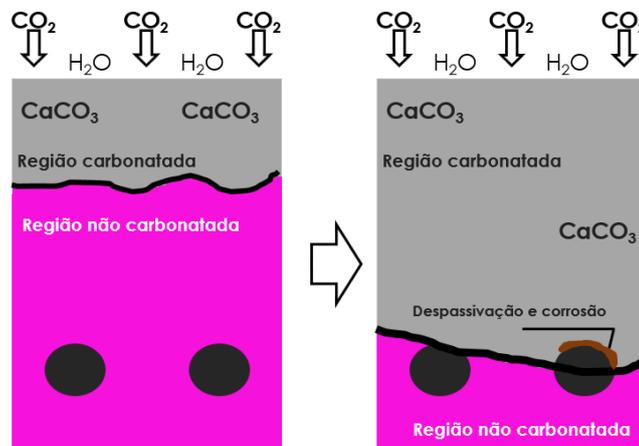
Conforme Oliveira (2017), os locais com maiores agressividades serão aqueles que obtiverem altos índices de CO₂, deixando mais suscetível à deterioração da estrutura de concreto.

Em ambientes tratados como “especiais” dentre eles túneis, viadutos, garagens, o gás carbônico apresenta valores bem mais elevados que o normal, por se tratar de ambientes confinados. Desse modo, em ambientes desta natureza, a concentração do gás carbônico é facilitada, devido à insuficiência de ventilação destas áreas (FARIAS, 2018).

O ensaio de carbonatação se dá pela aplicação de fenolftaleína nas peças de concreto. Este ocorre por meio da utilização de um borrifador com solução de fenolftaleína (1%). Esse processo é de fundamental importância para compreender o processo do avanço da carbonatação do concreto nas peças, tendo em vista que esse fenômeno culmina na

despassivação da armadura, podendo contribuir na evolução da corrosão, acentuando os danos ao elemento estrutural e comprometendo a sua durabilidade. A Figura 4 apresenta como esse mecanismo funciona.

Figura 4 - Mecanismo de carbonatação do concreto



Fonte: TASCA, M. et al., (2012).

A Fenolftaleína é conhecida como um indicador de pH capaz de mudar sua coloração quando em contato com um ambiente ácido ou básico, ficando incolor ou apresentando cor rosa intenso, respectivamente.

Um concreto com boa qualidade apresenta em seu interior um pH superior a 12. Esse nível é responsável pela formação de uma película passivadora que protege as armaduras contra a corrosão. Portanto esse nível é reduzido quando o concreto se encontra carbonatado (ANDRADE, 1997).

A utilização da fenolftaleína permite a determinação da profundidade da frente de carbonatação, possibilitando a avaliação da extensão da zona a ser reparada, esta é normalmente expressa em mm ou em cm e, que na maioria das vezes, trata-se de um valor médio (ANDRADE, 2017). Em alguns casos não ocorre a uniformidade se tratando de concretos composto de agregados graúdos com dimensão máxima característica acima de 19 mm (HELENE; CUNHA, 2001).

Utilizando um borrifador, a solução de fenolftaleína é aspergida na superfície, devendo observar a sua coloração. Se ao borrifar, a região assumir uma coloração rosa indica que a parte ensaiada não se encontra carbonatada; porém se o local se mantiver incolor, a carbonatação a atingiu (pH inferior a 11,0), demonstrando que as armaduras estão sujeitas a processos corrosivos por carbonatação (ANDRADE, 1997).

2.3.2 *Ensaio de identificação e localização das armaduras*

O ensaio de identificação e localização das armaduras em estruturas de concreto armado, conhecido amplamente como “pacometria”, segue os padrões normativos pela ACI 228 2R-98.

Bastante utilizado nos ensaios não destrutivos, a pacometria tem o objetivo localizar a posição das armaduras nos elementos de concreto armado, possibilitando medir o cobrimento das barras de aço e estimar as bitolas do aço presentes na estrutura.

O ensaio consiste em percorrer a área demarcada previamente nos elementos estabelecidos, identificando por sinais sonoros a existência de armaduras nas proximidades da área em análise, fazendo-se a leitura do cobrimento da armadura e o espaçamento entre essas.

Figura 5 - Equipamento localizador de barras de aço (Pacômetro)



Fonte: adaptado pelo autor.

2.3.3 *Extração de testemunhos de concreto*

No Brasil, o procedimento para extração de testemunho é normalizado pela NBR 7680-1 (2015). Esta norma padroniza os processos de extração de testemunhos, estipulando os níveis de desempenho para o equipamento de extração e o diâmetro dos testemunhos, sendo recomendado acima de três vezes o diâmetro do agregado graúdo, evitando sempre a ruptura da armadura.

A extração de testemunhos de concreto de uma estrutura é feita quando há dúvidas quanto à resistência e o desempenho do concreto lançado, seja por resultados de ensaios

laboratoriais, durante o controle tecnológico, ou por sinais de deterioração do concreto, ao longo de sua vida útil (MEDEIROS, M. H. F. et al., 2017a)

Segundo Medeiros, M. H. F. et al., (2017a), a extração de testemunhos pode ser empregada também para avaliar o estado atual de uma estrutura e sua durabilidade, de modo que:

- Os testemunhos extraídos podem ser utilizados para determinar a qualidade do concreto por meio de análise laboratoriais;
- Determinar a profundidade média de carbonatação em testemunhos extraídos;
- Determinação do teor de íons cloretos;
- Analisar a expansão resultante de reações álcali-agregado (RAA);
- Estabelecer propriedades físicas e mecânicas como a densidade, absorção de água, índice de vazios, massa específica, entre outras.

De acordo com a NBR 7680-1 (2015), os testemunhos cilíndricos são normalmente extraídos por meio de extratoras, dotado de cálice e coroa diamantada, ou outro material abrasivo equivalente, permitindo o corte de um anel de concreto com as dimensões estabelecidas e segmentar as armaduras, sem danificar excessivamente os elementos estruturais. Os diâmetros mais utilizados são de 100, 75 e 50 mm. A Figura 6 apresenta um equipamento de extração para obtenção de testemunhos.

Figura 6 - Equipamento extrator de testemunhos

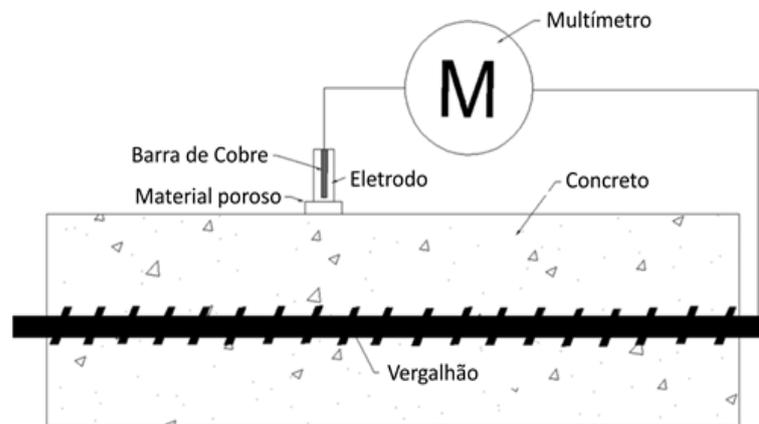


Fonte: adaptado pelo autor

2.3.4 Ensaio de potencial de corrosão

O ensaio consiste em registrar as medidas de diferença de potencial na superfície do material, utilizando-se de um multímetro ou voltímetro, um eletrodo de referência acoplado a um material poroso, e um condutor ligado diretamente a barra de aço dentro do concreto. O eletrodo de referência é comumente de cobre/sulfato de cobre, sendo imersa em uma solução aquosa saturada de sulfato de cobre. A extremidade de contato do eletrodo é formada por uma ponta porosa para proporcionar a continuidade elétrica do eletrodo de referência com o eletrodo de trabalho (MEDEIROS, M. H. F. et al. 2017b). O sistema descrito acima é mais bem representado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema de medição do potencial de corrosão



Fonte: ASTM C 876 (2015).

Os dados coletados, resumem-se a diferenças de potencial, na ordem de MiliVolts. O critério de avaliação de resultados definidos pela ASTM C 876:2015 (Tabela 1) são faixas de referência, que permitem avaliar a qualidade da peça no que refere a possível presença de atividades de corrosão. Os valores mais significativos referem-se aos valores de potencial mais negativos que -350mV , onde a probabilidade da ocorrência de corrosão é dita como maior que 90%. À medida que esse valor está mais negativo, maior essa probabilidade, indicando a presença de corrosão em um estado mais avançado.

Tabela 1 - Valores referência para o potencial de corrosão

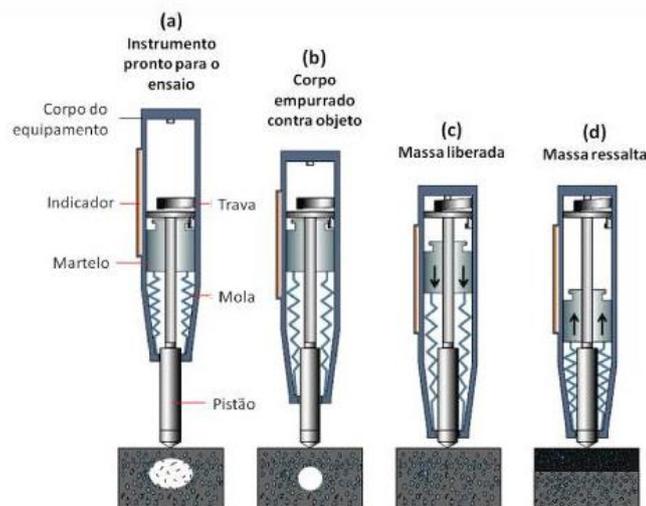
DIFERENÇA DE POTENCIAL DO SISTEMA	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
Mais negativo que -350 mV	Superior a 90%
Mais positivo que -200 mV	Inferior a 10%
De -200 a -350 mV	Incerta

Fonte: Adaptado de ASTM C 876 (2015).

2.3.5 Ensaio de esclerometria

No Brasil, o procedimento para o cumprimento deste ensaio é estabelecido pela NBR 7584:2012. O procedimento para utilização do esclerômetro e realização do ensaio é exemplificado na Figura 8.

Figura 8 - Mecanismo de funcionamento do esclerômetro



Fonte: E. Pereira; M. H. F. de Medeiros (2012).

Este ensaio tem como objetivo obter a dureza superficial do concreto, e por meio deste, correlacionar o índice esclerométrico com a resistência à compressão axial do concreto.

A NBR 7584 (2012) estabelece que antes da utilização do esclerômetro, deve-se aferi-lo, antes de sua utilização ou a cada 300 impactos realizados na mesma inspeção, seguindo as condições abaixo:

- Utilizar uma bigorna de aço com massa superior a 16 kg (Figura 9), que deverá estar apoiada sobre uma base rígida, aplica-se 10 golpes sobre a bigorna e nenhum índice esclerométrico (IE) individual poderá divergir ± 3 . Caso isso aconteça o aparelho não poderá ser empregado, devendo, então, ser calibrado.

- O coeficiente de correção do índice esclerométrico deve ser obtido pela seguinte equação:

$$K = \frac{N * I_{Enom}}{\sum_{i=1}^n I_{Ei}}$$

Onde:

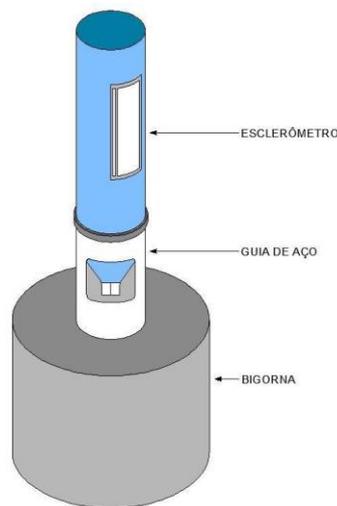
K – é o coeficiente de correção do índice esclerométrico;

N – é o número de impactos na bigorna de aço;

I_{Enom} – é o índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante;

I_{Ei} – é o índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço.

Figura 9 - Bigorna de aço

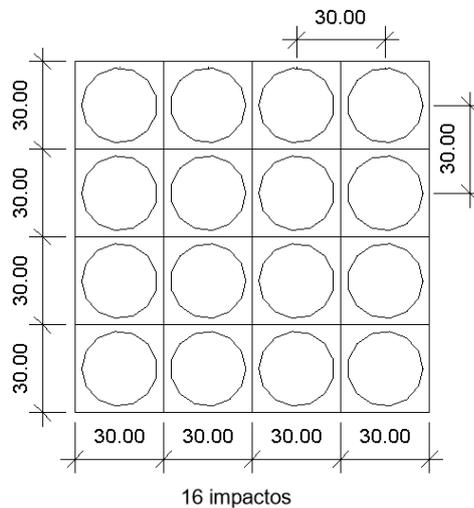


Fonte: NBR 7584 (2012).

De acordo com a NBR 7584 (2012) as superfícies do concreto devem estar secas ao ar, perfeitamente planas, isentas de pó. Devendo dar preferências para as superfícies confinadas por fôrmas não absorventes e lisas (metálicas ou chapas plastificadas). Casos as superfícies verticais (ou não) apresentarem superfícies os fenômenos de segregação ou exsudações poderá realizar-se ensaios desde que, essas irregularidades sejam preparadas adequadamente e removidas através de polimentos enérgicos e consiga, uma superfície plana e adequada para o ensaio (NBR 7594-2012).

A NBR 7584 (2012) determina que as medições devem ser seccionadas em 16 áreas de impactos por elemento ensaiado e devem estar uniformemente distribuídos na área de ensaio, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de Divisão da área Ensaída. Fonte: NBR 7584 (ABNT, 2012)



Fonte: Adaptado de NBR 7584 (2012).

Os centros de dois pontos de impacto devem ser distanciados a cada 30mm, evitando sempre impactos sobre armaduras, bolhas e áreas similares, que não representem o concreto em avaliação (NBR 7594-2012).

Conforme a NBR 7584 (2012) o manuseio do esclerômetro deve seguir as instruções do fabricante e de acordo com os procedimentos a seguir:

- A aplicação do esclerômetro deve ser sempre ortogonalmente à área de ensaio;
- A barra de percussão deve ser pressionada contra um ponto da área de ensaio, previamente delimitada. Antes que essa barra desapareça completamente no corpo do esclerômetro, o martelo deve ser liberado;
- A liberação do martelo deve ser efetuada através de aumento gradativo de pressão no corpo do aparelho;
- Após o impacto, o ponteiro indicativo, localizado na escala do esclerômetro, fornece diretamente o índice esclerométrico. Este pode ser travado por meio de botão de pressão, para permitir uma leitura mais segura em áreas de pouca luminosidade ou em posições de difícil acesso;

- O esclerômetro deve ser aplicado na posição horizontal e sobre superfícies verticais. Quando necessário aplicar em posições diversas, o índice deve ser corrigido com os coeficientes fornecidos pelo fabricante.

Para a obtenção dos resultados dos ensaios, é necessário calcular a média aritmética dos 16 valores individuais dos índices esclerométricos de cada área de ensaio, desprezando todo índice individual que destoa em mais de 10% do valor médio obtido e recalculando a média. Além disso, o índice esclerométrico médio final deve ser obtido com no mínimo cinco valores individuais, caso isso não seja possível, o ensaio realizado naquela área deve ser descartado (NBR 7594-2012).

2.3.6 Ataque por íons cloretos

De acordo com Al - Khaja (1997), Jensen et al., (1999), entre outros, a corrosão ocasionada pelos íons cloreto é uma das principais causas da degradação de estruturas de concreto armado.

A penetração desses íons está diretamente ligada a degradação da estrutura pois à medida que o teor destes aumenta, a corrosão se inicia, fazendo, portanto, a armadura diminuir sua seção. Como o cenário de cargas não é modificado, a capacidade portante da peça é diminuída até o ponto de sua ruína.

No Brasil os índices aceitáveis deste fator agressivos são normatizados pela NBR 12655:2015 cujos valores máximos são mostrados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Teores máximos de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto

Classe de agressividade (5.2.2)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12.655 (2015).

2.3.7 Ataque por sulfatos

Os sulfatos, quando presentes em solução aquosa, podem reagir com produtos da hidratação do cimento e formar nas estruturas de concreto, produtos indesejáveis. O mais comum desses produtos é a etringita tardia, que tem sua formação possibilitada pela ação de diversos fatores, mas que pode ser agravada pela presença de ambiente rico em sulfato, permeabilidade e presença de água. Essa manifestação patológica pode contribuir na expansão da peça de concreto e no desenvolvimento de fissuras mapeadas ao longo do elemento estrutural, comprometendo o seu desempenho (COLLEPARDI, 2003).

De acordo com Souza (2006) os sulfatos não estão presentes apenas na água do mar como também em águas de rio, lençóis freáticos, água de pântano e decomposição de matéria orgânica, além de locais poluídos com esgoto, ambientes industriais e nos próprios agregados incorporados no concreto.

A ABNT NBR 12655:2015 especifica o teor de sulfatos no concreto que se relaciona com diferentes classes de agressividade e condições de serviço ao qual a estrutura está submetida. A Tabela 3 apresenta esses valores.

Tabela 3 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos segundo a ABNT NBR 12655:2015

Condições De exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente no solo <i>% em massa</i>	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente na água <i>ppm</i>	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal ^a	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) <i>MPa</i>
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2	Conforme Tabela 2
Moderada ^b	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa ^c	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

^a Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

^b A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO_4 seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

^c Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: Adaptado de NBR 12.655 (2015).

2.4 Building Information Modeling (BIM)

Atualmente a indústria da construção está passando por alterações a respeito dos conceitos e tecnologias do Modelo de Informação da Construção (Building Information Modelling – BIM). As ações relacionadas ao BIM estão sendo desenvolvidas e implementadas pelo Governo e empresas em todo mundo.

No Brasil o decreto Nº 10.306, de 2 de abril de 2020, estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. A implementação será de forma gradual, obedecidas as fases estabelecidas no decreto.

Dessa forma, nos objetivos de todas essas ações contêm:

- Melhorar a eficiência e sustentabilidade de projetos e da construção civil em geral;
- Melhorar a previsibilidade de resultados de projeto e o retorno de investimentos;

A metodologia BIM (Building Information Modeling) ou Modelagem da Informação da Construção consiste em uma representação virtual das características de uma edificação, levando em consideração os parâmetros físicos e de funcionamento. Com isso, o BIM proporciona projeções do possível comportamento futuro da edificação, facilitando a intervenção, caso necessário, auxiliando na previsão de erros, reduzindo o tempo de execução da obra e aumentando o desempenho.

Segundo Ribeiro (2010), os projetos feitos na plataforma BIM são considerados como um dos surgimentos mais importantes da construção civil. Apesar desse sistema já ser utilizado em países da Europa e nos Estados Unidos, no Brasil ainda está em processo de crescimento.

O BIM oferece não apenas um modelo visual do edifício, como também uma série de informações multidisciplinares sobre a edificação, incluindo concepção do projeto, planejamento, orçamento, construção e até na pós-construção. Além de possibilitar a detecção antecipada das incompatibilidades construtivas, além de gerar quantitativos automáticos dos materiais e se estabelecidos os dados necessários, custos e prazos de execução (ROCHA, 2013).

Dentre os vários parâmetros fornecidos pelas ferramentas que se baseiam na metodologia BIM – como o Revit® da Autodesk AEC Collection, destaca-se a visualização de projetos tridimensionais. Os projetos elaborados através de uma modelagem 3D, nos permite visualizar os possíveis problemas que podem acontecer durante a execução, seja de obras de infraestrutura, edificação entre outros, evitando assim, o retrabalho e conseqüentemente viabilizando o empreendimento em termos econômicos e sustentável (SANTOS, 2015).

O ambiente BIM possui uma base composta por um banco de dados, que apresenta a geometria dos elementos construtivos em três dimensões, além de armazenar suas particularidades e, exibindo mais informação do que modelos tradicionais (CAD). Além do mais, os elementos são paramétricos, possibilitando alterações e obtenções de dados de forma instantâneas em todo o projeto. Esse processo torna possível a utilização, diminuindo conflitos entre os elementos construtivos, facilitando revisões e correções, consequentemente aumentando a produtividade (FLORIO, 2007).

A qualidade dos projetos, por sua vez, é uma das principais razões que se busca integrar a tecnologia BIM aos processos de projeto. Pois, segundo Santos (2015), essa tecnologia concede ao modelo diversos tipos de simulações, como: eficiência energética, análise estrutural, desempenho, construção, manutenção, instalações, conforto ambiental, entre outros, possibilitando testes de diversas alternativas de modo a atender ou superar as expectativas do cliente.

Um destaque no uso da metodologia é a compatibilização de informações sobre a sequência das atividades e componentes diversos dos projetos, facilitando a identificação de erros, diferente do modelo tradicional que por ser manual depende em maior parte da habilidade e percepção do projetista.

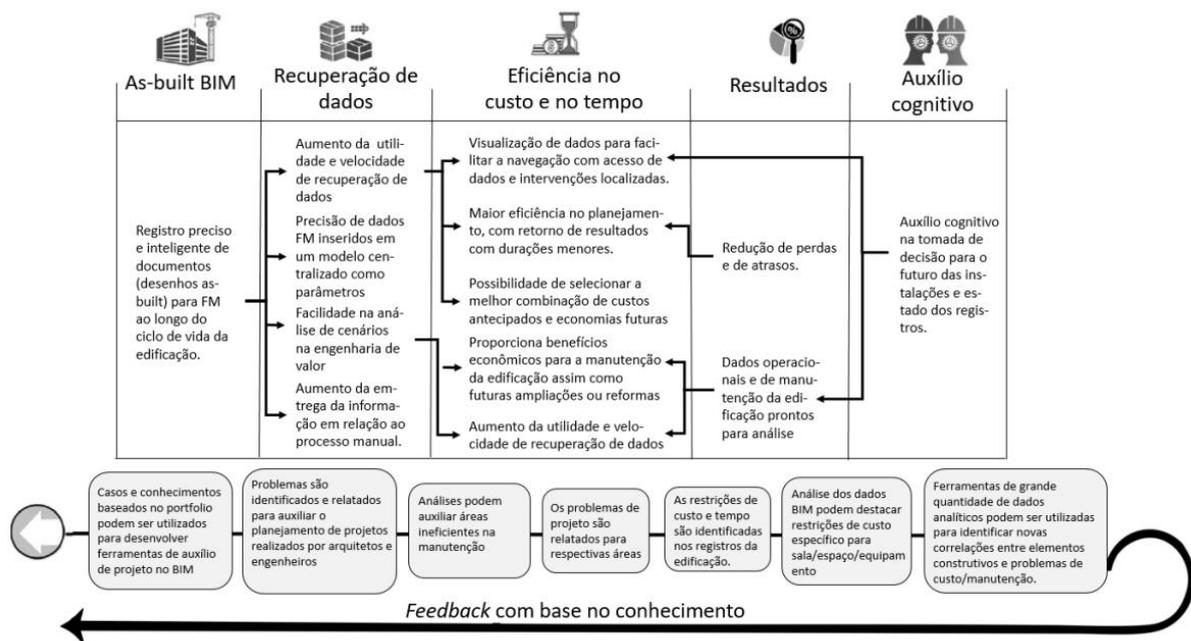
O BIM apresenta grande potencial de aplicação na fase de inspeção, operação e manutenção das estruturas. Com ele, é possível identificar e visualizar o local e relações entre sistemas construtivos e equipamentos de forma precisa, como também, acesso aos dados de atributos e documentações da construção (SANTOS, 2017).

A implementação da tecnologia BIM apresenta os seguintes benefícios para a Gestão de instalações:

- Aperfeiçoa os processos manuais de informações do processo de manutenção (KASSEM et al., 2015);
- Aumento da eficiência nos processos relacionados aos trabalhos para execução, tratando de agilidade, acesso e verificação de dados e intervenções locais (KASSEM et al., 2015).
- Implementação dos dados relacionados à gestão no modelo 3D, facilitando a acessibilidade dos mesmos (KASSEM et al., 2015).
- Diminuição dos níveis de dificuldades relacionadas a atividades de gerenciamento da construção (MOTAWA; ALMARSHAD, 2015).

- Facilidade na criação de planos específicos, elevações e renderizações com a utilização de um mesmo modelo (KASSEM et al., 2015);
- Facilitar a análise de cenários em projetos de reformas em um modelo 3D (KASSEM et al. 2015), além de possibilitar a remodelagem, renovação ou demolição das estruturas existentes. Por exemplo, pode ser verificado de forma instantâneo o código de cores da tinta onde o acabamento da parede foi danificado como também o tipo de concreto utilizado nos elementos estruturais, economizando tempo da equipe entre outros (BECERIK-GERBER et al., 2012).

Figura 11 - Principais benefícios da integração de dados BIM para inspeção técnica



Fonte: Adaptado de Pärn, Edwards e Sing (2017).

3 METODOLOGIA

Neste trabalho será utilizada uma Ponte para aplicação da tecnologia BIM na caracterização e monitoramento de construções existentes. A ponte, nomeada como Governador Newton Bello, localizada sobre o Rio Anil na cidade de São Luís, Estado do Maranhão. Foi construída no ano de 1968 e tem seus elementos da superestrutura (lajes e vigas) composto por estruturas de concreto protendido, e se divide em 15 vãos padronizados de 25 m de comprimento longitudinal apoiados em 4 longarinas e 3 transversinas além de possuir balanços de 2,5 m em cada extremidade.

3.1 Procedimento do trabalho

Para a realização do procedimento do trabalho, foram divididas três etapas principais.

Etapa 01: Nessa etapa foi utilizada o projeto de formas da ponte em dwg além de seu memorial de cálculo expedito (reconstituído) com informações adicionais, fornecida pela empresa SPG, como base para a modelagem da Ponte Governador Newton Bello no software Revit®. Logo após, foram estudados todos os projetos recebidos, fazendo as anotações necessárias para iniciar a modelagem. Com isso, foi modelado cada peça (vigas, pilares, tabuleiro entre outros) separadamente e por fim, alocado cada peça no modelo geral.

Etapa 02: Nesta etapa foi realizada a inspeção da estrutura da ponte e ensaios necessários para a avaliação desta.

Inicialmente, uma equipe da SPG apresentou a ponte à equipe de inspeção técnica, destacando alguns danos já conhecidos, assim como relatos de danos ocorridos no passado, permitindo o estabelecimento de uma prévia visão geral das manifestações patológicas.

No seguimento das atividades, foi realizado o mapeamento dos danos com sua respectiva catalogação. Conhecido e catalogado o conjunto de manifestações presentes na ponte, foram definidos os pontos a serem realizados os ensaios adicionais, selecionando os elementos que apontavam para a necessidade de um estudo mais detalhado.

De forma geral, no âmbito da avaliação da Ponte Governador Newton Bello, foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Inspeção técnica, realizada dos dias 31 de julho a 02 de agosto de 2021;
2. Mapeamento dos principais danos;
3. Determinação do índice esclerométrico de alguns elementos mais importantes;

4. Localização das armaduras pelo método do Pacômetro;
5. Determinação da profundidade média de carbonatação;
6. Extração e rompimento de testemunhos;
7. Ensaio de potencial de corrosão;
8. Ensaio de teor de cloretos;
9. Ensaio de teor de sulfatos;
10. Elaboração do relatório técnico.

Como o foco desse trabalho constitui apenas no processamento dos dados no modelo BIM, os detalhes relacionados as escolhas das quantidades de ensaio como as interpretações dos resultados, não serão tratados nesse estudo de caso.

Etapa 03: Nessa fase da pesquisa consistiu na implementação de todos os dados coletados na inspeção técnica realizada na ponte. Desse modo, foi incorporado ao modelo em BIM os resultados dos ensaios e os principais dados catalogados na Ponte Governador Newton Bello, identificando os elementos que necessitarão de intervenção e classificando em Prioridade 1 e Prioridade 2, além de disponibilizar uma lista de matérias contendo os volumes de concreto para reabilitação das peças danificadas.

Primeiramente foi inserido o mapeamento de danos no modelo. Esse mapeamento se caracteriza pelo registro fotográfico dos dados existentes na OEA. A inserção se deu por meio de importação de imagens na vista Folhas onde foi possível organizar e adicionar linhas de detalhes para identificar o local exato de cada manifestação patológica.

Posteriormente para implantação e identificação dos locais onde foram feitos os ensaios de caracterização de danos, foi optado por modelar família com ID de identificação. Nessas famílias, consta um tipo de desenho representativo como também textos com os nomes dos ensaios realizados naquele local.

Para inserção dos resultados do ensaio de potencial de corrosão foi parecido com o passo anterior, mas nesse caso específico, foi necessário a criação de parâmetro de materiais a fim de conseguir a implementação das imagens dos resultados dentro da peça em questão.

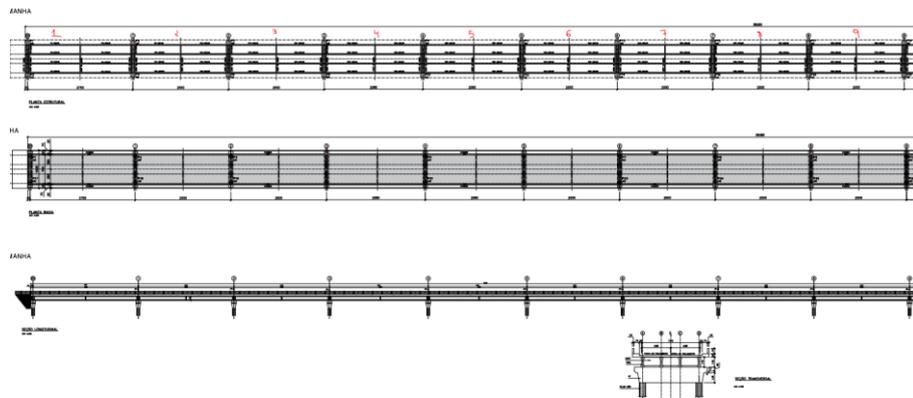
E por fim, para a identificação das peças mais danificadas, foi criado filtros de sobreposição para estabelecer cores nos elementos classificados em prioridade 1 e 2 no modelo 3D.

4 RESULTADOS

Para a modelagem dos projetos foi adotado o software BIM Autodesk Revit® versão 2021. O primeiro passo para processo de modelagem em BIM foi o levantamento das informações existentes acerca da Ponte Governador Newton Bello. A empresa SPG Brasil Infraestrutura, disponibilizou os projetos estruturais da ponte (Figura 12) que foram parâmetros norteadores para a modelagem do objeto no Revit®.

O processo de modelagem foi manual, a partir da importação dos dados bidimensionais do CAD, utilizando os elementos estruturais como principal referência. Devido a ponte possuir peças bastante particulares, para a modelagem, foi necessário a criação de famílias, dentre elas: vigas, tabuleiro, guarda rodas entre outros. O resultado da modelagem pode ser verificado na Figura 13.

Figura 12 - Parte do projeto disponibilizado pela SPG Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Modelo 3D da Ponte Governador Newton Bello



Fonte: Elaborado pelo autor.

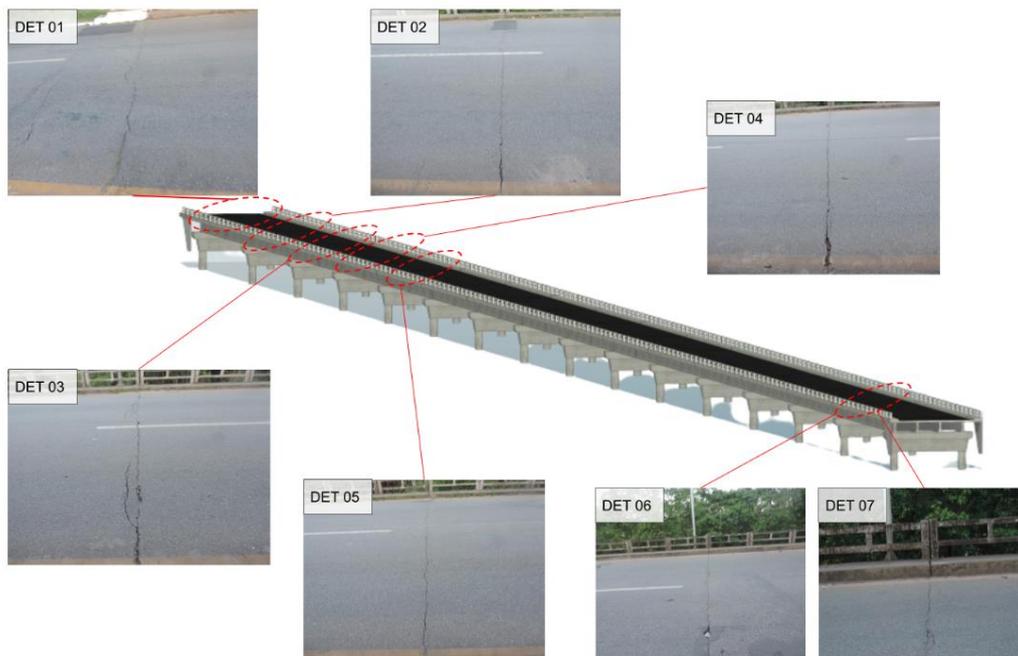
4.1 Mapeamento de danos

4.1.1 Tabuleiro da ponte

Durante a execução dos ensaios, foi realizado o mapeamento de danos de modo a determinar as principais manifestações patológicas presentes na ponte. Esse mapeamento foi iniciado pelo tabuleiro da ponte, no qual foram observadas fissuras nas proximidades das juntas de dilatação, principalmente nos vãos 3 ao 5 e nos vãos 9 ao 10.

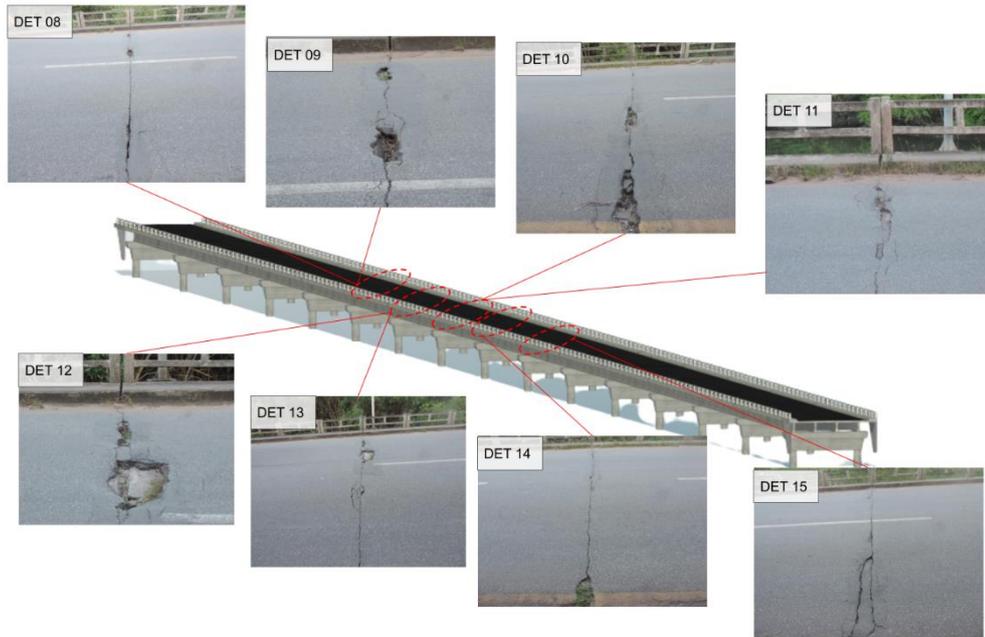
Sobre as fissuras encontradas, evidencia-se que estas resultaram do desprumo oriundo principalmente do sistema de amortecimento de cargas móveis presente na ponte, que perdeu sua capacidade de amortecimento, gerando algumas deformações diferenciais entre vãos. A Figura 14, Figura 15 e Figura 16 mostram de modo esquemático a localização dos principais danos e suas posições no tabuleiro da ponte.

Figura 14 - Mapeamento dos danos vão 15 ao 12º



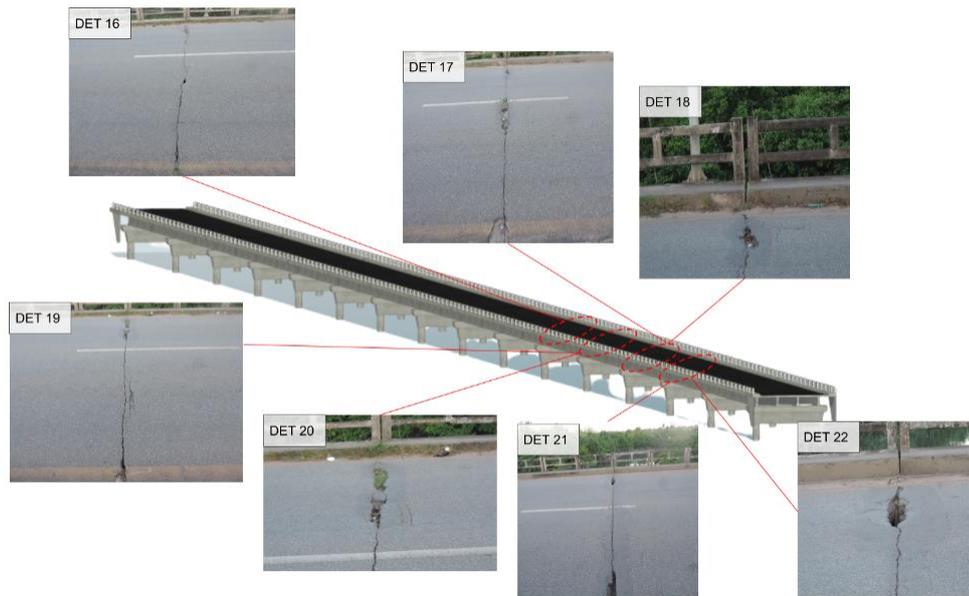
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Mapeamento dos danos vão 10 ao 6°



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Mapeamento dos danos: vão 5° ao 2°



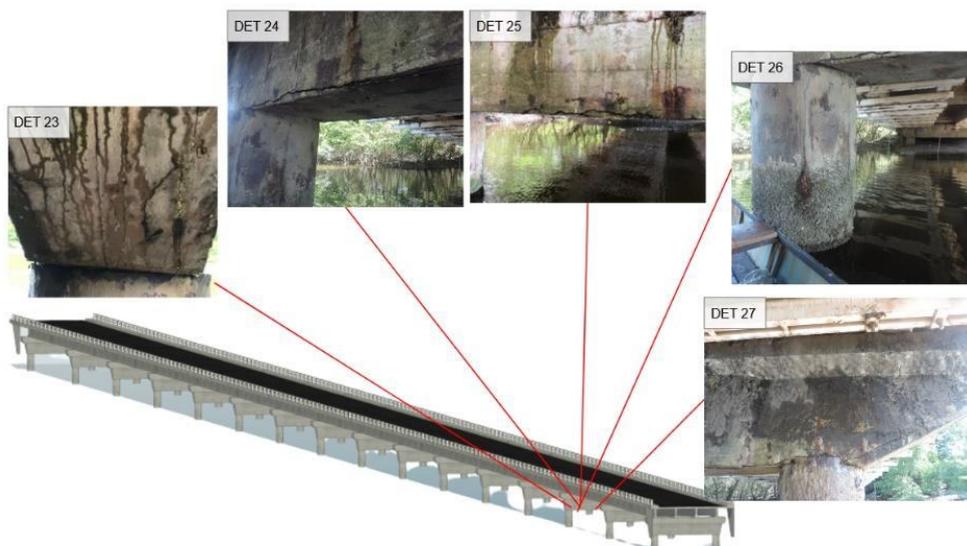
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Vão central

Foi também realizado o mapeamento de danos no vão central, cujo acesso se deu por barco. Esta zona encontra-se em contato prolongado com a água do rio Anil, com ciclos de molhagem diários no perfil longitudinal dos pilares. Ao longo dessa região, foram encontrados elementos estruturais apresentando sinais avançados de corrosão, como exemplo das vigas de transição, nomeadamente, VT3 e VT5 representadas pela Figura 17 e Figura 18.

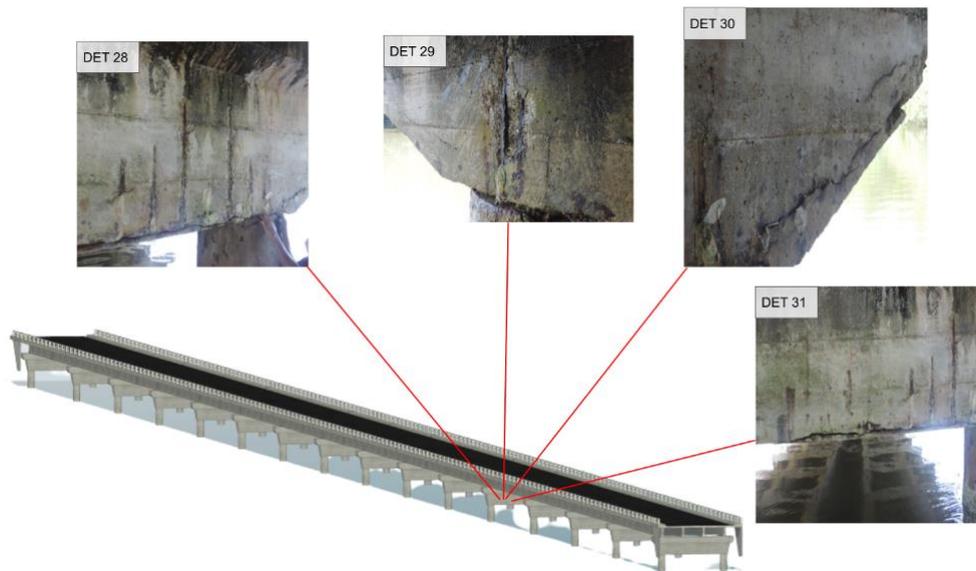
Nesta região da ponte, o contato direto do concreto armado com a água e o alto teor de cloretos acabam influenciando a corrosão da armadura e consequente formação de óxido de ferro. Por esse produto, ocorre a expansão da armadura corroída em até 600% do seu volume inicial (ANDRADE, 1992), isso, por sua vez, promove o surgimento de tensões entre a armadura e o concreto, ocasionando a fissuração nessas regiões.

Figura 17 - Mapeamento dos danos Viga de transição VT3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Viga de transição VT5



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Ensaios de caracterização de danos

Considerando as condições de acesso e a análise visual da degradação, os ensaios foram realizados nos principais elementos estruturais da ponte e distribuídos nas cabeceiras e no vão central, de forma a possibilitar a coleta de informações acerca do seu desempenho estrutural. As amostras para realização dos ensaios relatados neste documento foram coletadas entre os dias 31/07/21 e 02/08/21. Assim, os ensaios técnicos foram realizados nos elementos de maior vulnerabilidade estrutural identificados.

No seguimento, os resultados dos ensaios realizados são apresentados:

4.2.1 Ensaio de determinação da profundidade média de carbonatação

Para este ensaio foram divididos pontos entre as vigas longarinas de forma a melhor caracterizar o estado de carbonatação nos elementos da ponte. Ao total foram definidos 23 pontos distribuídos ao longo desses elementos estruturais. A Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22 indicam algumas regiões em que o ensaio de carbonatação foi realizado.

Figura 19 - Ensaio de profundidade de carbonatação V106



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Ensaio de profundidade de carbonatação V107



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Ensaio de profundidade de carbonatação V111



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Ensaio de profundidade de carbonatação V110-2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a realização dos ensaios, o referencial das vigas foi tomado de acordo com a orientação dos bairros Alemanha-Ipase, no qual a ponte está situada. No entanto, para a referência de acordo com os projetos disponibilizados pela SPG, as vigas foram renumeradas

para este trabalho tendo a Tabela 4 as nomeações corretas dos elementos onde os ensaios de carbonatação foram realizados.

Tabela 4 - Resultados de profundidade de carbonatação

Ponto/Elemento	Profundidade de carbonatação
V106	0,0 cm
V101	0,0 cm
V107	0,5 cm
V106-2	0,0 cm
V110	0,0 cm
V112	1,0 cm
V111	0,0 cm
V102	1,0 cm
V103	1,8 cm
V100	0,0 cm
V99	3,0 cm
V98	3,0 cm
V97	2,0 cm
VT13	1,0 cm
VT6	6,0 cm
V102	1,0 cm
VT5	0,0 cm
VT13	0,0 cm
VT13	0,0 cm
VT14	0,0 cm
VT14	0,0 cm
VT15	0,0 cm
VT15	0,0 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados obtidos no ensaio, percebe-se que a maioria dos elementos estruturais não apresentam sinais de carbonatação, indicando que a possibilidade de despassivação da armadura a partir desse processo, é baixa. Isto se deve principalmente ao fato do ciclo de molhagem das peças de concreto, dificultando que estas reajam com o CO₂ presente na atmosfera. No entanto, os elementos V103, V99, V98, V97 e VT6 apresentaram profundidade de carbonatação maiores que 1,0 cm, indicando o avanço desse processo nessas peças, com a maior possibilidade de despassivação da armadura constatada, principalmente no elemento VT6, em que a profundidade de carbonatação observada foi de 6,0 cm.

Para a determinação de vida útil das peças ensaiadas, foi utilizada a formulação sugerida por Helene (1997) na qual a profundidade de carbonatação pode ser descrita pela equação:

$$X = K\sqrt{t} \quad (1)$$

em que:

X = profundidade de carbonatação (cm);

K = coeficiente de carbonatação (cm²/ano);

t = tempo (anos).

O valor de K foi obtido por meio da divisão entre os valores da profundidade de carbonatação (X) de cada peça pela raiz quadrada do tempo de construção da ponte, obtendo os seguintes valores:

Tabela 5 - Estimativas de K para cada peça estrutural

Ponto/Elemento	K (cm/ano ^{1/2})
V106	0,000
V101	0,000
V107	0,069
V106-2	0,000
V110	0,000
V112	0,137
V111	0,000
V102	0,137
V103	0,247
V100	0,000
V99	0,412
V98	0,412
V97	0,275
VT13	0,137
VT6	0,824
V102	0,137
VT5	0,000
VT13	0,000
VT13	0,000
VT14	0,000
VT14	0,000
VT15	0,000
VT15	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses resultados foi possível estimar valores de vida útil utilizando a equação (1), o que resultou num tempo adicional de vida útil, considerando apenas a carbonatação, equivalente a 53 anos.

4.2.2 Determinação da localização das armaduras pelo método eletromagnético – Pacometria

Para a ponte em análise, a pacometria foi realizada em 12 pontos, sendo estes definidos de forma a auxiliar a localização da armadura para a realização do ensaio de potencial de corrosão e para possibilitar as extrações dos corpos de prova com maior segurança à estrutura. A Figura 23 mostra a utilização do pacômetro para a identificação da posição da armadura nos elementos estruturais.

Figura 23 - Realização do ensaio de pacometria em viga



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Extração e rompimento de testemunhos

A extração de testemunhos, realizada de acordo com ABNT NBR 7680-1:2015, tem como intuito orientar a extração de amostras de concreto presente na estrutura de modo a se obter características como a resistência à compressão do concreto e possibilitar a realização de

ensaios como de teor de cloretos e teor de sulfatos. Para a ponte em análise foram extraídos 7 corpos de prova dos elementos estruturais. A Figura 24 e Figura 25 evidenciam o processo de extração desses testemunhos, da retirada até a obtenção dos corpos de prova devidamente retificados.

Figura 24 - Extração dos corpos de prova sendo realizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - CP's retificados para ensaio de resistência à compressão



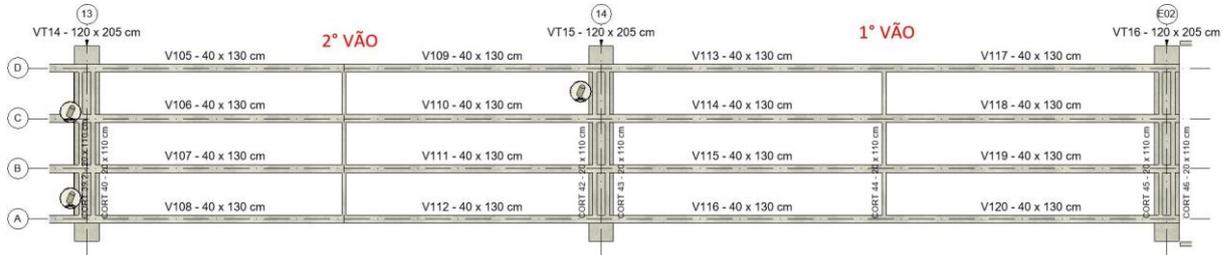
Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, a previsão de extração de corpos de prova era de 10 amostras, todavia, após a realização da inspeção visual e dos ensaios de esclerometria, entendeu-se que os danos presentes na ponte relacionavam - se com a ocorrência da corrosão, e não por comprometimento da resistência mecânica do concreto, além das difíceis condições de acesso.

A extração de testemunhos ocorreu entre os três primeiros vãos da ponte. A Figura 26 e Figura 27 indicam a posição longitudinal da região da extração, ao passo que a Figura 28,

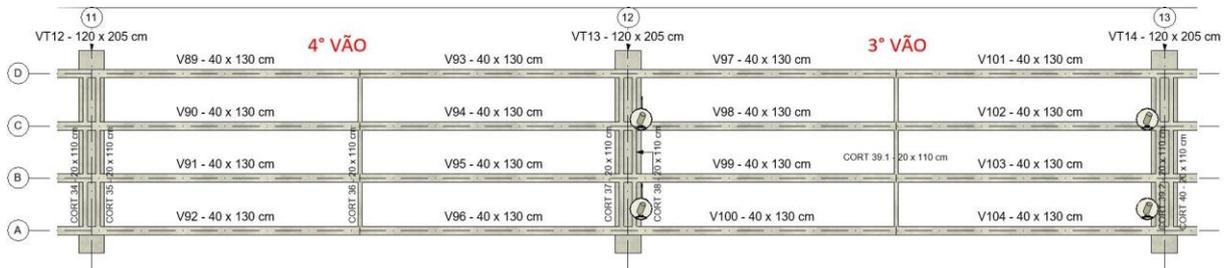
Figura 29 e Figura 30 identificam as posições transversais. Informações sobre os corpos de prova extraídos podem ser vistas na Tabela 6.

Figura 26 - Localização da região de extração de testemunhos em planta baixa entre o primeiro e segundo vão



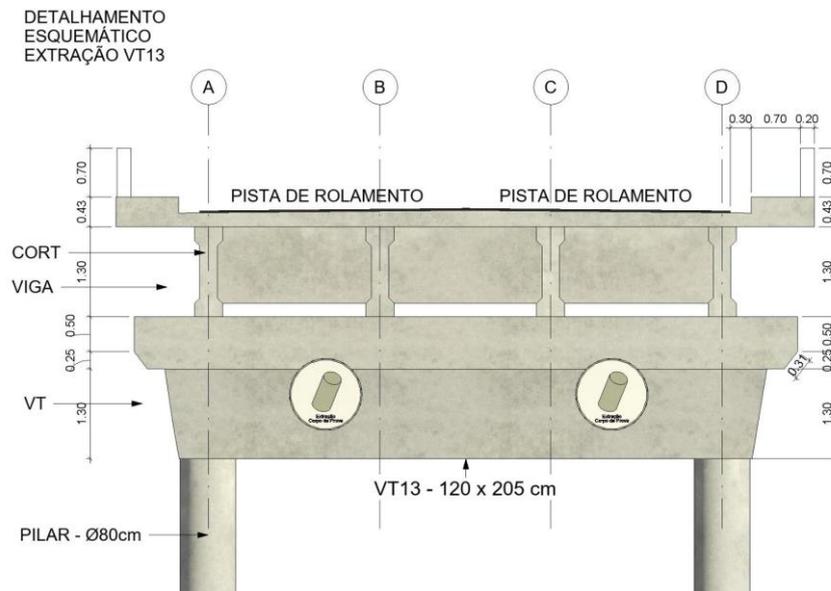
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Localização da região de extração de testemunhos em planta baixa entre o terceiro e quarto vão



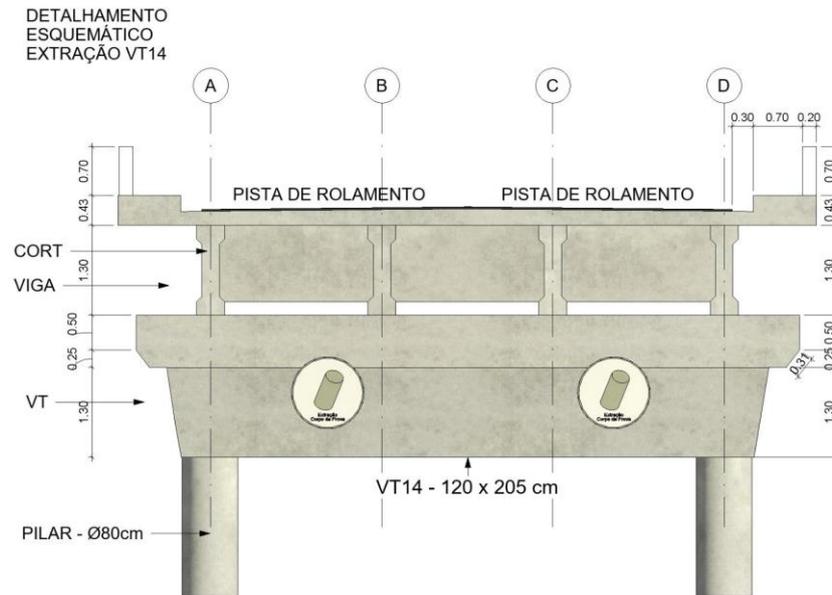
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT13 em vista transversal



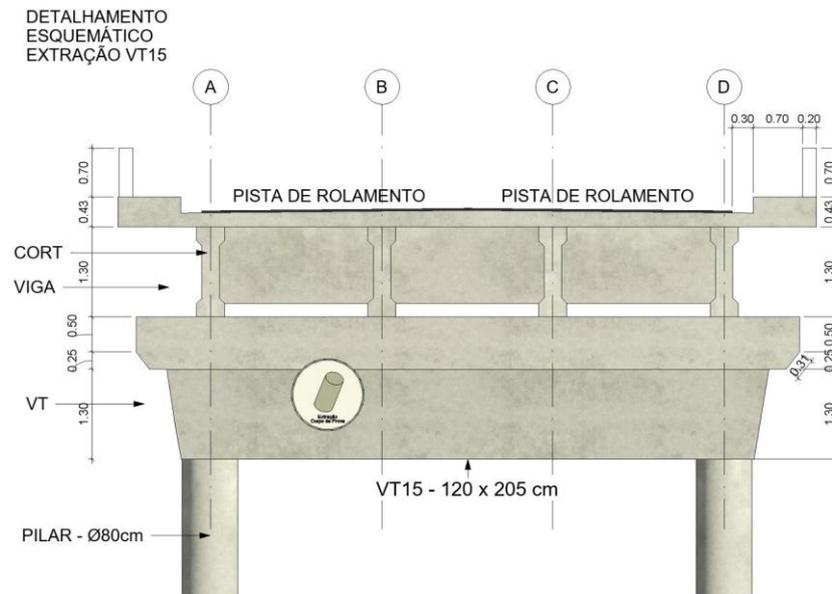
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT14 em vista transversal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Localização da posição de extração dos testemunhos no elemento VT15 em vista transversal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Correlação entre altura e diâmetro (h/d) dos corpos de prova extraídos

Peça	diâmetro (mm)	altura (mm)	h/d
VT13-E1	75	110	1,47
VT13-E1	75	90	1,2
VT13-E2	75	85	1,13
VT13-E2	75	87	1,16
VT14-E1	75	145	1,93
VT14-E2	75	110	1,47
VT15-E1	75	75	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a avaliação da resistência do concreto utilizado nos reforços, foi considerada a equação prescrita pela NBR 7680-1:2015 (k1 a k4).

$$FC_{ext} = [1 + (k1 + k2 + k3 + k4)] \times FC_{ext, inicial} \quad (2)$$

Na qual:

K1 leva-se em consideração a relação h/d, obtendo valores variados conforme a consulta da tabela na norma.

K2 é o efeito deletério do broqueamento que o determina. Para o de 50mm, obteve-se o valor de 0,12.

K3 se relaciona com a direção da extração. Na realização do ensaio, os testemunhos que foram extraídos na direção ortogonal ao lançamento, o valor de k3 é 0,05.

Já o valor de k4 é determinado pelo valor da umidade. Como os testemunhos foram rompidos a seco, o valor adotado para todos foi de – 0,04.

A Tabela 7 apresenta os valores e os cálculos conforme a equação 2:

Tabela 7 - Valor da resistência à compressão corrigida dos corpos de prova extraídos

Peça	diâmetro (mm)	altura (mm)	l/d	k1	k2	k3	k4	Coefficiente de ajuste	Resist (MPa)	Resist final (MPa)
VT13-E1	75	110	1,47	-0,044	0,09	0,05	-0,04	1,056	38,19	40,32
VT13-E1	75	90	1,20	-0,083	0,09	0,05	-0,04	1,017	33,05	33,61
VT13-E2	75	85	1,13	-0,103	0,09	0,05	-0,04	0,997	34,68	34,57
VT13-E2	75	87	1,16	-0,095	0,09	0,05	-0,04	1,005	31,17	31,32
VT14-E1	75	145	1,93	-0,006	0,09	0,05	-0,04	1,094	31,98	34,99
VT14-E2	75	110	1,47	-0,044	0,09	0,05	-0,04	1,056	27,73	29,28
VT15-E1	75	75	1,00	-0,14	0,09	0,05	-0,04	0,96	26,57	25,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo a melhor caracterizar cada elemento, após os resultados de cada corpo de prova foi feita uma média entre os resultados individuais de cada peça e obtido os valores de resistência média apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Valores das resistências à compressão média dos elementos

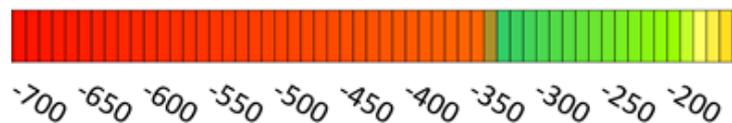
Peça	Resistência média (MPa)
VT13	34,96
VT14	32,14
VT15	25,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Ensaio de potencial de corrosão

Para melhor visualização e interpretação destes valores, os pontos coletados, foram interpolados de maneira a mostrar os valores em forma de mapas contínuos de cores, e os correspondentes valores foram indicados por e isolinhas em mV, para melhor localização em cada viga também foi adicionado uma régua em metros melhor identificação dos potenciais. A escala de cor utilizada pode ser encontrada na Figura 31.

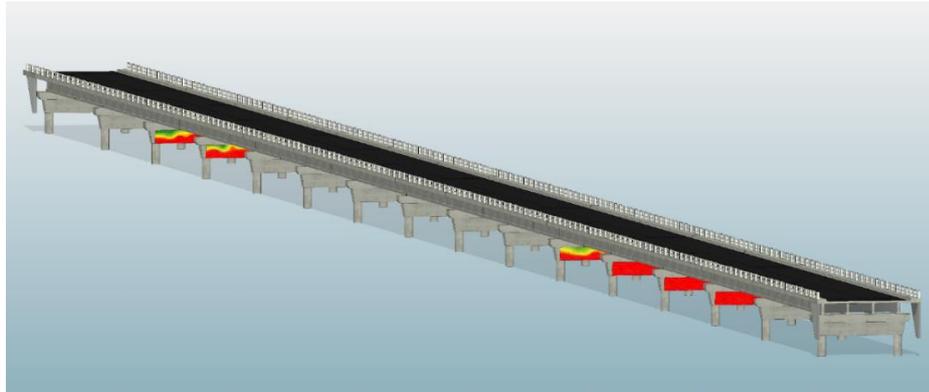
Figura 31 - Escala de cor utilizada, potencial em mV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a ponte analisada, foram definidos alguns elementos estruturais nos quais foram realizados o ensaio de potencial de corrosão. Esses elementos foram definidos em função da disponibilidade de acesso, sendo este ensaio em sua totalidade, realizado ao longo de 59,28 m² desses elementos. As regiões ensaiadas podem ser verificadas na Figura 32.

Figura 32 - Painéis com os ensaios do potencial de corrosão e suas posições na ponte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos painéis apresentados, os trechos com a coloração vermelha representam as regiões em que o potencial de corrosão foi encontrado em seu valor mais crítico, indicando a alta possibilidade de presença de corrosão. As regiões em verde correspondem aos pontos em que o potencial de corrosão indica uma baixa probabilidade de corrosão, já as regiões em amarelo indicam probabilidade moderada em se determinar a presença de corrosão nos elementos estruturais em análise.

Para os painéis VT3, VT4 e VT5, verificou-se, de forma generalizada, um valor elevado em módulo do potencial de corrosão, indicando a alta possibilidade de corrosão ao longo de toda extensão desses elementos estruturais. A Figura 33, Figura 34 e Figura 35 indicam a extensão da faixa em que foi realizado o ensaio de potencial de corrosão nestes elementos estruturais.

Figura 33 - Painel VT3 contendo os resultados do potencial de corrosão



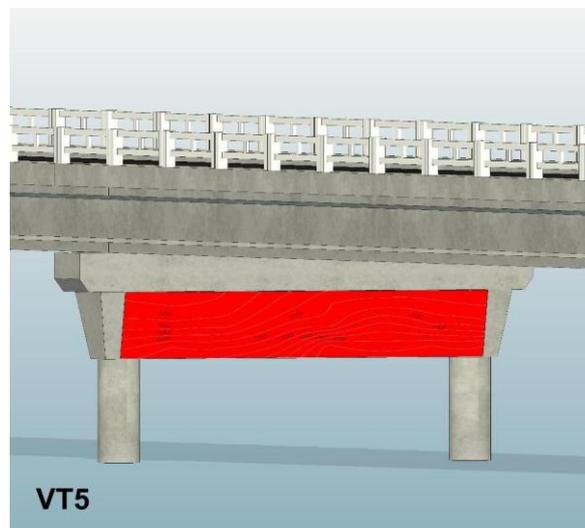
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Painel VT4 contendo os resultados do potencial de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor.

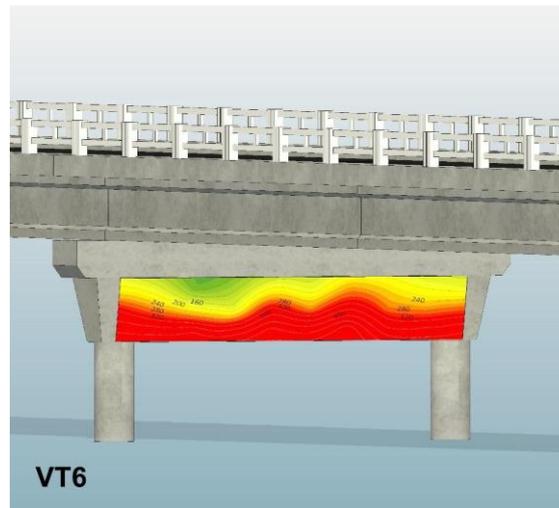
Figura 35 - Painel VT5 contendo os resultados do potencial de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor.

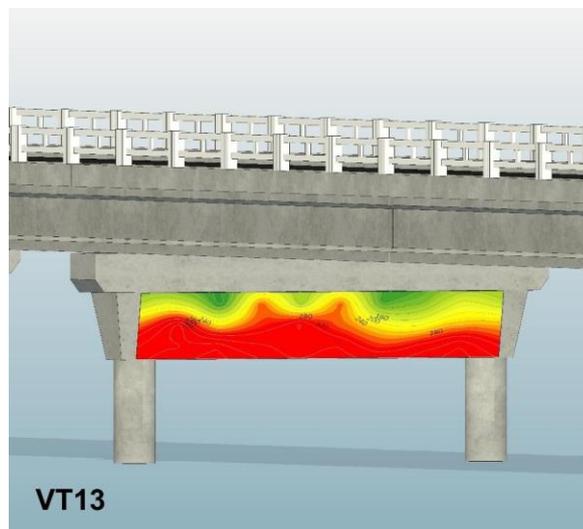
Para os painéis VT6, VT13 e VT14 evidenciou-se a presença da coloração vermelha na região inferior desses elementos estruturais. Particularmente nessas regiões, ocorre a maior possibilidade de corrosão na peça, ao passo que na área imediatamente superior, a possibilidade de corrosão é intermediária. Por fim, foi verificado que em algumas pequenas regiões superiores dos elementos estruturais em análise, na coloração verde, foi observada uma baixa possibilidade de corrosão. Essas variações no potencial de corrosão podem ser observadas na Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

Figura 36 - Painel VT6 contendo os resultados do potencial de corrosão



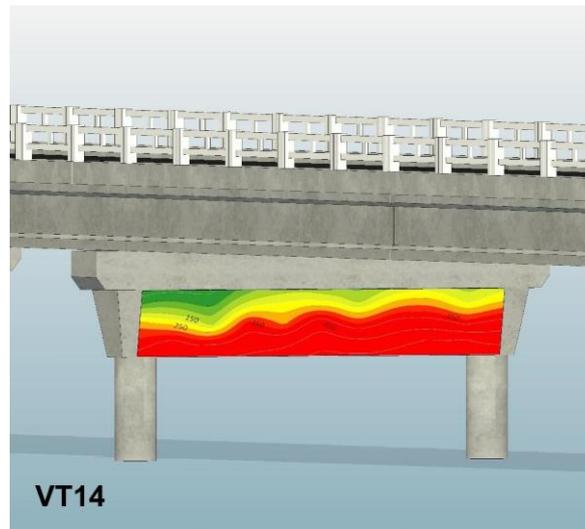
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Painel VT13 contendo os resultados do potencial de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Painel VT14 contendo os resultados do potencial de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 *Ensaio de esclerometria*

O ensaio de esclerometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7584:2012. Ao todo foram realizados 30 ensaios de esclerometria divididos entre lajes do tabuleiro e vigas (longarinas e transversinas). A Figura 39 exemplifica a realização do ensaio.

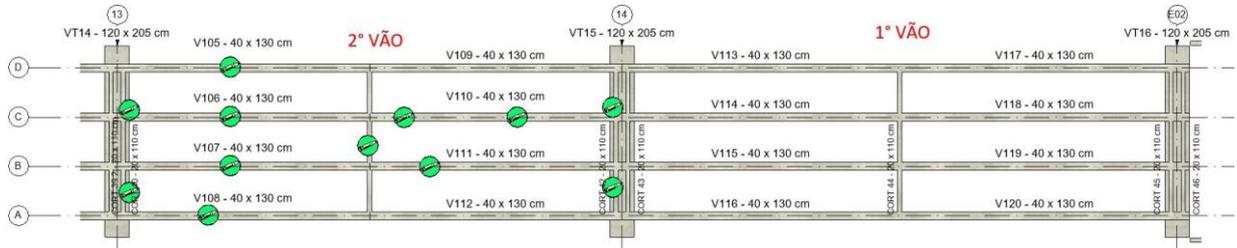
Figura 39 - Realização do ensaio de esclerometria no vão central da ponte



Fonte: Elaborado pelo autor.

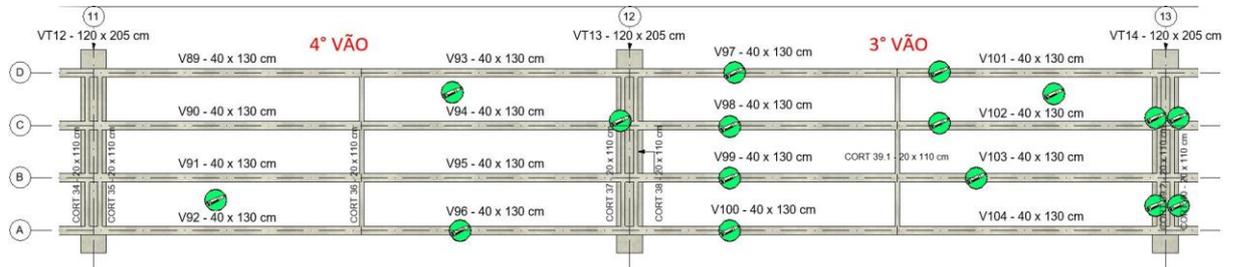
A Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43 definem a localização dos pontos onde o ensaio de esclerometria foi realizado na ponte, em planta baixa. Ao passo que a Figura 44 e Figura 45 exemplificam, na vista lateral e na seção transversal, respectivamente, a posição do elemento em que esses ensaios foram realizados.

Figura 40 - Localização dos ensaios de esclerometria no primeiro e segundo vão



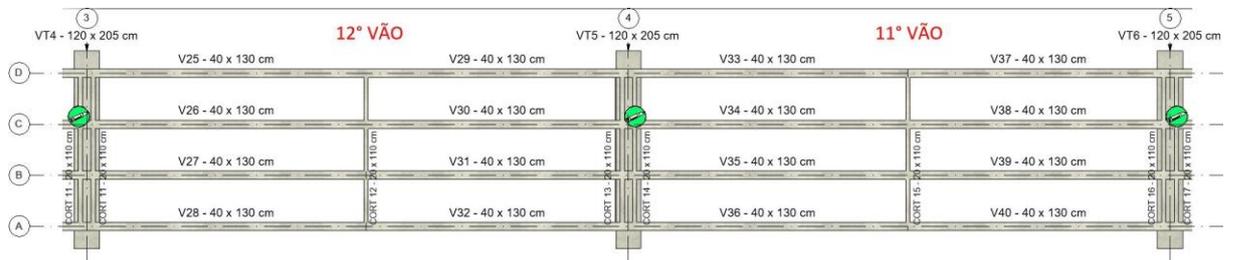
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Localização ensaios de esclerometria terceiro e quarto vão



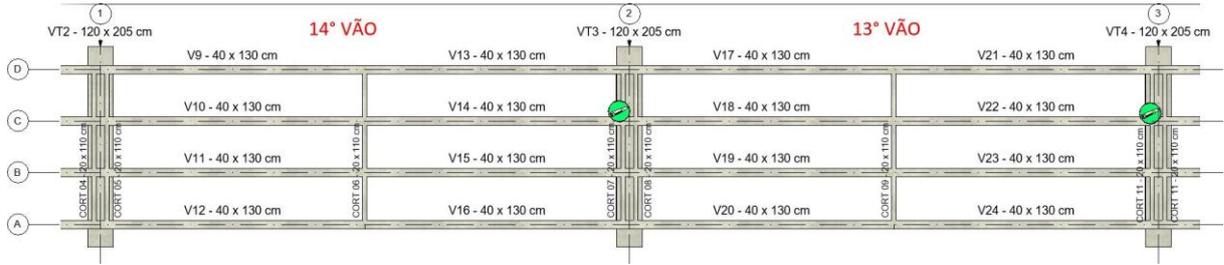
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Localização ensaios de esclerometria décimo primeiro e décimo segundo vão



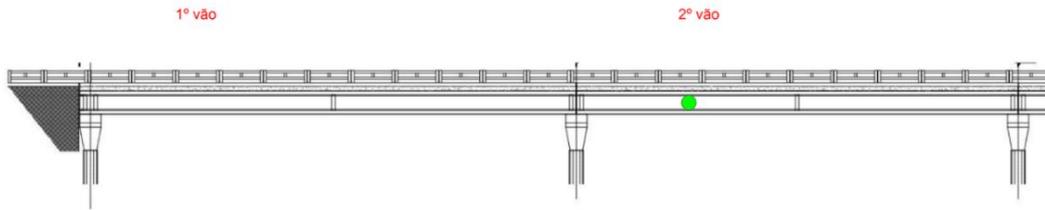
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Localização ensaios de esclerometria décimo primeiro e décimo segundo vão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Localização dos ensaios de esclerometria no primeiro e segundo vão à vista lateral direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Esquemática da localização dos ensaios realizados nos blocos



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio foi realizado com o esclerômetro tipo Schmidt (fabricado pela Engetotus). Os valores obtidos para os índices esclerométricos e respectivos elementos em que a medida foi coletada estão representados na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 - Resumo dos índices esclerométricos obtidos

Elemento	Índice esclerométrico médio
VT3	51
V108	55,3
VT6	55,1
VT5	55,1
VT4	51
Laje 1	51,4
Laje 2	54,9
Laje 2 -2	45,4
VT14 - 2	54,4
T39	45,4
Laje 1-2	51,4
VT15	45,4
T42	52,4
T41	52,4
V110 Long	55,3
V105 Long	55,3
V106 Long	55,3
VT14	53,7
V107 Long	55,3
T40	45,4
V110 - 2 Long	55,3
V101 Long	52,4
V102 Long	52,4
V103 Long	52,4
V97 Long	54,9
V98 Long	54,9
V99 Long	54,9
V96 Long	54,9
VT13	41,8
VT14	54,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral os resultados obtidos pela esclerometria demonstraram que os elementos de concreto apresentaram uma adequada homogeneidade superficial e uma grande

homogeneidade entre si, apresentando índices esclerométricos diferentes de em média 10% entre eles, com destaque para a viga V99 cujos resultados destoam 25% da média obtida. O Anexo I apresenta o conjunto de resultados relativos ao ensaio esclerométrico realizado na ponte.

4.2.6 Ensaio de teor de cloretos

Para a ponte em análise, o ensaio de teor de cloretos foi realizado em 12 amostras de diferentes elementos estruturais. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Teores de Cloretos obtidos nas amostras

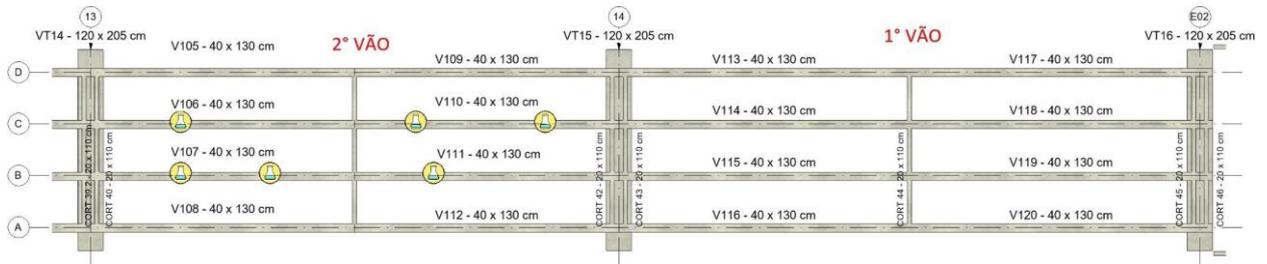
Amostras	Teor de cloretos	
	mg/kg	%
VT3	5339,66	0,53
VT6	5572,3	0,56
VT13-E1	6104,05	0,61
VT13-E2	8275,36	0,83
V102	5406,13	0,54
V103	3478,53	0,35
V111	3389,91	0,34
V110	3866,27	0,39
V107	2348,56	0,24
V107-2	2581,2	0,26
V106	4287,23	0,43
V97	4907,61	0,49

Fonte: Elaborado pelo autor.

As vigas longarinas, por serem compostas de concreto protendido, apresentaram um teor máximo de íons cloreto de 0,05%, ao passo que para os demais elementos da estrutura, foi considerada uma classe de agressividade III, em função da localização próxima à região marinha, com teor máximo de íons cloreto equivalente a 0,15%. Para os elementos analisados, foi observado que todos ultrapassaram os limites de teor de íons cloreto definidos pela ABNT NBR 12655:2015, indicando que a presença desse íon atua potencialmente como um fator promotor da corrosão na armadura desses elementos estruturais.

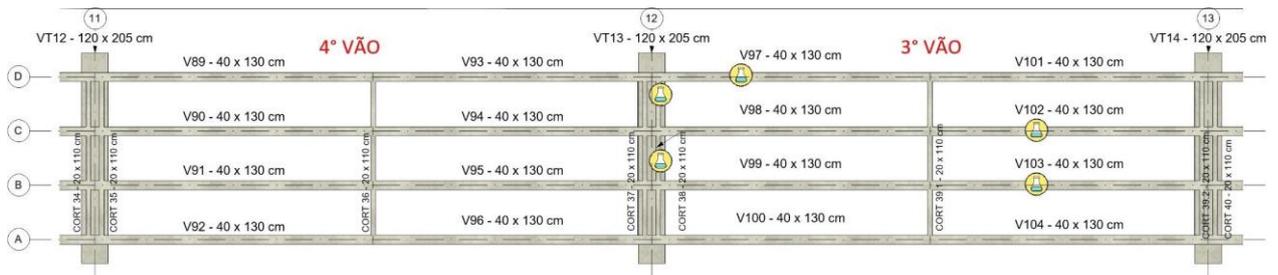
A posição das amostras extraídas que serviram para a determinação do teor de cloretos na estrutura pode ser observada na Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - Localização dos ensaios de teor de cloretos em planta baixa - 2º vão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Localização dos ensaios de teor de cloretos em planta baixa - 3º vão



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7 Ensaio de teor de sulfatos

Para a ponte em análise, o ensaio de teor de sulfatos foi realizado também em 12 amostras extraídas dos diferentes elementos estruturais. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 - Teores de Sulfatos obtidos nas amostras

Amostras	Teor de sulfatos	
	mg/kg	%
VT3	1002,50	0,10
VT6	1053,91	0,11
VT13-E1	610,49	0,06
VT13-E2	372,72	0,04
V102	1343,09	0,13
V103	873,97	0,09
V111	790,43	0,08
V110	1349,51	0,14
V107	443,41	0,04
V107-2	925,38	0,09
V106	1092,46	0,11
V97	526,95	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

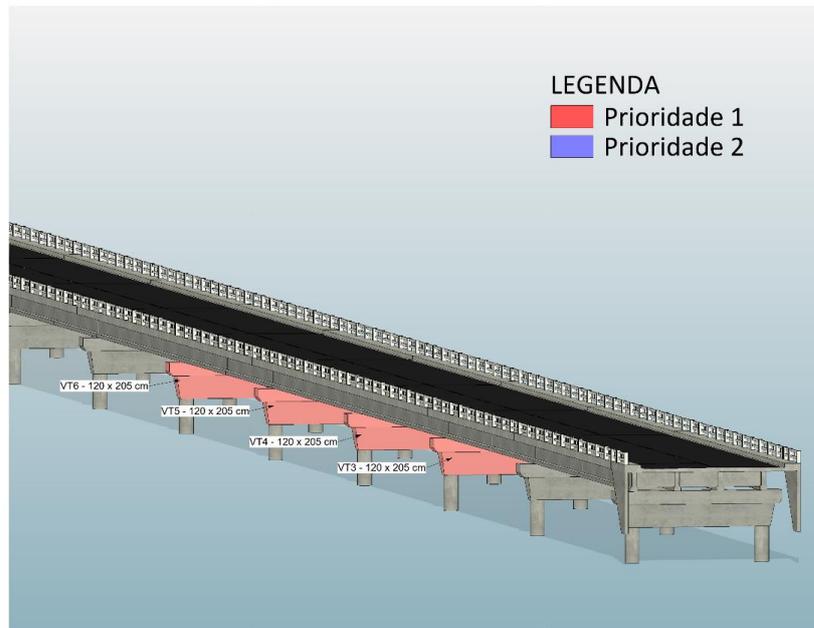
Para os elementos VT13-E1, VT13-E2, V103, V111, V107, V107-2 e V97, foi verificada uma classe de agressividade fraca, ao passo que para os demais elementos estruturais em análise, nomeadamente, os elementos VT3, VT6, V102, V110 e V106 foi constatada uma classe de agressividade moderada.

4.2.8 Análise global da integridade estrutura

A análise global da integridade estrutural tem como objetivo principal apontar o nível de vulnerabilidade dos elementos que compõem a estrutura. Para tal, procedeu-se com a análise sistemática dos resultados, de modo a confrontá-los entre si e possibilitar a identificação dos elementos que estão em estado mais avançado de degradação. Os resultados na análise de integridade da Ponte Governador Newton Bello, com destaque aos elementos que necessitam de intervenção estrutural são mostrados categorizados de acordo com a sua respectiva zona de localização. As figuras a seguir, apresentam as peças danificadas e seus respectivos volumes para reabilitação.

Há que se destacar que os elementos foram classificados em Prioridade 1 e Prioridade 2. Os elementos classificados como Prioridade 1, são aqueles que merecem intervenção, no sentido de ser necessário recuperação estrutural de 100% do elemento. Já os elementos enquadrados como Prioridade 2, são elementos que, necessitam de recuperação estrutural de 50% do elemento. Esses valores foram pré-estabelecidos no relatório técnico.

Figura 50 - Modelo segmentado com classificação de prioridades (Parte 02)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Quantitativos para reabilitação de 100% da peça

<REABILITAÇÃO VIGAS DE TRANSIÇÃO - 100% DO VOLUME DE CONCRETO DA VIGA ORIGINAL>		
A	B	C
DESCRIÇÃO	VOLUME REAL (m³)	VOLUME PARA REABILITAÇÃO (m³)
VT3 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
VT4 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
VT5 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
VT6 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
VT13 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
VT14 - 120 x 205 cm	18.98	18.98
Total geral: 6	113.86	113.86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Quantitativos para reabilitação de 50% da peça

<REABILITAÇÃO VIGAS LONGARINAS - 50% DO VOLUME DE CONCRETO DA VIGA ORIGINAL>		
A	B	C
DESCRIÇÃO	VOLUME REAL (m³)	VOLUME PARA REABILITAÇÃO (m³)
V97 - 40 x 130 cm	4.96	2.48
V98 - 40 x 130 cm	4.96	2.48
V99 - 40 x 130 cm	4.96	2.48
V103 - 40 x 130 cm	4.96	2.48
Total geral: 4	19.85	9.93

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.9 Análise do mapeamento de dados e ensaios realizados na Ponte

No presente trabalho, foi realizado o mapeamento de danos do vão central e do tabuleiro da Ponte Governador Newton Bello. Através dele, foi possível observar a presença de fissuras nas proximidades das juntas de dilatação no tabuleiro, ao passo que no vão central, foi observado a presença da corrosão nos elementos estruturais. A corrosão presente nesses elementos se apresenta em contínuo avanço, indicando o estado crítico da manifestação desse dano.

Foi realizado o ensaio de carbonatação em alguns elementos da ponte, sendo possível observar que na maioria dos elementos em análise, a profundidade de carbonatação foi nula, no entanto, as vigas longarinas V103, V99, V98 e V97 e a viga de transição VT6 apresentaram valores maiores que 1,0 cm. Para este parâmetro foi estimada uma vida útil remanescente de pelo menos 53 anos, considerando apenas o efeito da carbonatação, indicando uma boa durabilidade da estrutura para essa manifestação.

Foi realizado o ensaio de potencial de corrosão em algumas vigas de transição com o objetivo de verificar a possibilidade da ocorrência de corrosão na armadura desses elementos estruturais. Foi verificado que, nas vigas VT3, VT4 e VT5, ocorreu uma alta possibilidade da ação desse dano, ao passo que nas vigas VT6, VT13 e VT14, a região inferior apresentou alta possibilidade de manifestar corrosão, enquanto que na região central da viga foi identificada uma possibilidade de corrosão intermediária. Representando, desta forma, um quadro generalizado e crítico de corrosão desses elementos.

Para o ensaio de teor de cloretos, todas as peças ensaiadas apresentam valores característico desse teor no concreto, maiores que os limites estabelecidos pela norma, indicando o efeito nocivo que esses íons têm causado à estrutura da ponte, promovendo a evolução contínua da corrosão da armadura de seus elementos estruturais. Pelo ensaio de teor de sulfatos os elementos em análise apresentaram teores típicos de ambientes com agressividade característica entre fraca e moderada.

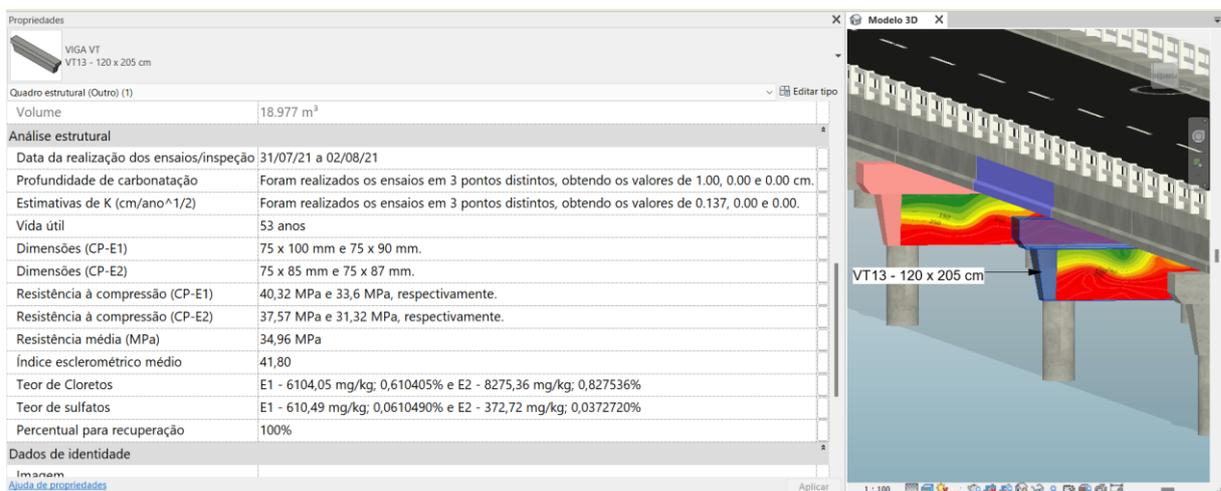
Já pelos ensaios de compressão axial, carbonatação e esclerometria, percebe-se uma adequada qualidade de concreto utilizado para a construção da ponte com valores de resistência de 34,96 MPa; 32,14 MPa e 25,51 MPa para os elementos VT13, VT14 e VT15, respectivamente. Pelos pontos de esclerometria pode-se perceber a homogeneidade do concreto utilizado, com as peças variando seu índice esclerométrico em no máximo 10%, com exceção da viga V99 cujos índices destoam em 25% da média.

Por fim, diante do quadro analisado, apesar de não apresentar comprometimento das propriedades mecânicas, e o concreto empregado na ponte Newton Bello apresentar uma boa qualidade, evidenciou-se um quadro de corrosão bastante ativo e agressivo, notadamente nas vigas de transição, com repercussões para a segurança estrutural da estrutura, sendo necessária à adoção de medidas de recuperação.

4.2.10 Inserção dos dados da inspeção no modelo BIM

No seguimento deste trabalho a inserção dos dados da inspeção e ensaios realizados na ponte se deu pela criação de parâmetros e famílias de objetos. Com isso, o profissional abre o modelo em um computador, seleciona o elemento construtivo com problema e em seguida adiciona os dados no elemento, uma espécie de tabela que fica localizado na paleta Propriedades. Estes parâmetros permitem adicionar comentários, preencher formulários onde se estabelece prioridade de intervenção, data da vistoria, adição dos resultados dos ensaios, além da possibilidade da visualização das informações paramétricas provenientes do software de modelagem, como por exemplo resistência e volume do concreto, espaçamento e cobrimento das armaduras entre outros. Após adição dessas informações, os dados ficam armazenados no modelo, de modo que, podem ser consultados a qualquer momento em uma manutenção ou inspeção futura. Na Figura 53 exemplificam a inserção desses dados no modelo virtual 3D.

Figura 53 - Inserção dos dados da inspeção e ensaios realizados na ponte no modelo BIM



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho permitiu comprovar que a Building Information Modeling (BIM), pode ser aplicada na caracterização e monitoramento de construções com ênfase nas manifestações patológicas e ensaios em elementos de construção. O software Revit® possibilitou a integração dos modelos 3D com outros tipos de informações da edificação, além de possibilitar a adição dos dados relacionados às análises, ensaios e recuperação de elementos construtivos danificados. As simulações e análises realizadas na Ponte Governador Newton Bello objeto do estudo, permitiram verificar os seguintes benefícios:

- Possibilidade de obter maior controle, disponibilidade, velocidade e precisão no acesso às informações como projetos, especificações, resultados de inspeções realizadas ao longo da fase de uso e operação e registros de manutenção. Com isso, reduz o tempo e trabalho para obtenção de dados, além de reduzir erros durante as tomadas de decisão para uma manutenção futura.
- Realizar a identificação e mapeamento das manifestações patológicas, resultados dos ensaios, além de falhas, diretamente no modelo 3D. Esses procedimentos podem ser feitos tanto no modelo arquitetônico como em um modelo específico (projetos complementares).
- Maior facilidade no processo análise e definição do tipo de intervenção para elementos estruturais com danos;
- Diminuição de perda de dados durante a vida útil da edificação, pois esses dados ficam armazenados no modelo, podendo ser verificado quando necessário.
- Acesso de forma instantânea aos quantitativos necessários para recuperações de peças danificadas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: concreto endurecido: avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: Agregados para Concreto — Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R-98**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Detroit, 1998.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- ANDRADE, G. M. R. **Avaliação do desempenho da precisão de diferentes equipamentos para realização dos ensaios não destrutivos de pacometria**. 2017. 45p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876-15**: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. West Conshohocken, PA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1218-99**: standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. west conshohocken, PA, 1999.
- AL-KHAJA, W. A. **Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concrete**. Construction and Building Materials, vol. 11, no. 1, pp. 9-13, 1997.
- BECERIK-GERBER, B. et al. **Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management**. Journal Of Construction Engineering And Management, [s.l.], v. 138, n. 3, p.431-442, mar. 2012.
- BRAGA, M. **Conservação e restauro: arquitetura**. Rio de Janeiro: Ed. Rio, 2003.
- BRASIL. Ministério da Cultura. Instituto do Programa Monumenta. **Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural** / Elaboração José Hailon Gomide, Patrícia Reis da Silva, Sylvia Maria Nelo Braga. _ Brasília: Ministério da Cultura, Instituto do Programa Monumenta, 2005.
- CAVALCANTE, G. H. F. **Pontes em concreto armado: análise e dimensionamento**. São Paulo: BLUCHER, 2019.
- COLLEPARDI, MA. **State-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete**. Cement and Concrete Composities. Vol. 25, pp. 401-407, 2003.

CURCIO, Ronald Cristhian de Lima. **Pontes rodoviárias**: levantamento das principais patologias estruturais. 2008. 88 p. Monografia (Graduação) – Universidade São Francisco, Curso de Engenharia Civil, Itatiba-SP, 2008.

DUKIĆ, D. Et al. **Computer-aided building maintenance with “BASE-FM” program**. Automation In Construction, [s.l.], v. 30, p.57-69, Sérvia, 2012.

E. PEREIRA; M. H. F. DE MEDEIROS. **Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto**: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. Vol. 5, Number 6, pp. 757-780, 2012.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. **Introdução às pontes de concreto armado**. São Carlos. 2007.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. **Introdução às pontes de concreto armado**. São Carlos. 2009.

ENGETOTUG. **Extratora Rotativa Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.engetotus.com.br/produtos/844-2/>. Acesso em: 23 dez. 2021.

FALORCA, J et al. **A Utilidade das aplicações informáticas na gestão da manutenção de edifícios**. 2º Forum Internacional de Gestão da Construção – GESCON 2011. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2011.

FARIAS, G. C. et al. **Análise da evolução da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto ao longo do tempo**. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil – UNESC, 2018.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197. Dissertação, Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

FLORIO, W. **Contribuições do Building Information Modeling no Processo de Projeto em Arquitetura**. 2007. 10 p. Porto Alegre, 2007.

HELENE, P.; CUNHA, A. C. Q. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 2001, São Paulo. 17. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001.

HELENE, Paulo R. L. **Vida útil das estruturas de concreto**. Anais. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

INOVA CIVIL. **Pontes**: descubra os 6 Principais Tipos. 2019 Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/pontes-conheca-os-principais-tipos/>. Acesso em: 23 dez. 2021.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F., COATS, A. M., GLASSER, F. P. **Chloride ingress in cement paste and mortar**. Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 1497-1504, 1999

KASSEM, M. et al. **BIM in facilities management applications**: a case study of a large university complex. Built Environment Project And Asset Management, [s.l.], v. 5, n. 3, p.261-277, 6 jul. 2015.

FRAZÃO, K. N. T. **Manutenção predial utilizando a metodologia BIM com ênfase na vida útil dos componentes construtivos**. 200. 13 p. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

- MARCHETTI, O. **Pontes de concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F. et al. **Resistência a compressão em testemunho de concreto: influência do fator de esbeltez, diâmetro da amostra e método de extração**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, p. 240–250, 2017a.
- MEDEIROS, M. H. F. et al. **Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento**. Revista IBRACON de Estrutura e Materiais, v. 10, n. 4, p. 864–885, 2017b.
- MOTAWA, I., ALMARSHAD, A. **Case-based reasoning and BIM systems for asset management**. Built Environment Project And Asset Management, [s.l.], v. 5, n. 3, p.233-247, 2015.
- NOBRE, G. T. N. **Análise das manifestações patológicas em pontes da rodovia RN-233**. 2008. 88 p. Monografia (Graduação) – Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Curso de Engenharia Civil, Caraúbas-RN, 2019.
- OLIVEIRA, Tatiane R. **Análise da frente de carbonatação em concreto convencional: estudo de caso em edificações com idade diferenciada na cidade de Juazeiro do Norte – CE**. 2017. 53p. Monografia, Curso de Tecnologia da Construção Civil com habilitação em Edifícios, Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, 2017.
- PÄRN, E. A.; EDWARDS, D. J.; SING, M. C. P. **The Building Information Modelling trajectory in facilities management: A review**. Automation In Construction, [s.l.], v. 75, p.45-55, 2017.
- PFEIL, W. **Pontes em concreto armado: elementos de projeto, solicitações, dimensionamento**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- RIBEIRO, J. T. G. **Modelagem de informações de edificações aplicadas no processo de projetos de aeroportos**. 2010. 133 p. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. (Tese de Mestrado) - Universidade Federal Brasília, Brasília, 2010.
- ROCHA, A. P. **Gerente BIM**. 2013. Disponível em: <http://revistatechne.com.br/engenhariacivil/191/gerente-bim-profissional-e-o-responsavel-pelo-aprimoramento-da-277526-1.asp>. Acesso em: 03 setembro. 2021.
- SANTOS, K. P. B. **Gestão da manutenção de edificações com o bim. Enfoque nas manifestações patológicas de elementos de construção**. 2017. 203. Dissertação, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santos, Espírito Santos, Vitoria, 2017.
- SANTOS, P. D. **Compatibilização de Projetos Utilizando a Metodologia Bim (Building Infomation Modeling)**. 2015. 88 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.
- SOARES, V. K. S. **Análise patológica na ponte sobre o rio Santo Antônio localizada na BR–230 no quilômetro 500 próxima à cidade de Cajazeiras-PB**. 2021. 45 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras, Cajazeiras - PB, 2021.

SOUSA, G. J. B. **Implementação BIM no contexto de inspeção e gestão da manutenção de Obras de Arte em betão armado**: proposta de metodologia e aplicação piloto. 2017. 179p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2017.

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 2006. 139p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TASCA, M. et al. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179p. Dissertação, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

VITÓRIO, J. A. P. **Pontes, conservação e gestão**. Recife, CREA-PB, 2015.

APÊNDICE I
FICHAS INDIVIDUAIS ESCLEROMETRIA

Ponto/Elemento	Reprovado					Reprovado						
	B3	V108 L	B6	B5	B4	Laje 1	Laje 2	Laje 2 - 2	B14 - 2	T39	Laje 1-2	B15
1	58	56	58	44	45	54	57	60	54	59	57	46
2	48	48	59	50	50	48	58	54	54	54	60	42
3	46	60	40	44	60	53	52	58	54	60	60	47
4	54	46	50	56	58	55	56	60	52	54	62	35
5	56	54	54	56	42	53	60	40	49	60	50	42
6	48	50	48	40	57	49	48	60	55	58	58	46
7	50	56	44	56	62	52	44	59	55	54	57	52
8	58	58	56	56	56	46	60	59	52	54	50	52
9	49	60	45	55	56	46	53	56	46	52	55	48
10	53	59	42	47	56	52	51	60	58	56	57	46
11	47	46	45	56	62	54	56	58	54	56	57	49
12	58	52	44	50	54	48	60	57	50	55	58	38
13	54	56	40	57	44	58	59	57	58	57	58	47
14	47	54	56	45	54	50	56	58	57	52	56	42
15	54	52	56	49	56	52	48	51	56	55	58	46
16	52	57	58	56	54	48	51	56	58	54	57	44
Índice Esclerométrico Médio Inicial	52,0	54,0	49,7	51,1	54,1	51,1	54,3	56,4	53,9	55,6	56,9	45,1
Limite Superior	57,2	59,4	54,7	56,2	59,5	56,2	59,7	62,1	59,3	61,2	62,6	49,6
Limite Inferior	46,8	48,6	44,7	46,0	48,7	46,0	48,9	50,8	48,5	50,1	51,2	40,6
Índice Esclerométrico Médio Final	51,0	54,9	48,4	53,4	55,1	51,4	54,9	57,5	54,4	55,6	57,9	45,4
Índice Esclerométrico Efetivo	51,0	54,9	48,4	53,4	55,1	51,4	54,9	57,5	54,4	55,6	57,9	45,4
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	-90	-90	-90	0	0	-90	0

Obs: Itens reprovados são desconsiderados para os cálculos.

Ponto/Elemento	Reprovado		Reprovado						
	T42	T41	V110 Long	V105 Long	V106 Long	B14	V107 Long	T40	V110 - 2 Long
1	54	50	58	56	58	44	56	54	54
2	55	52	55	58	56	40	58	46	55
3	55	54	55	54	50	44	54	52	52
4	56	52	57	56	52	52	56	52	53
5	54	52	52	57	60	60	48	52	55
6	55	49	56	56	56	56	56	48	52
7	51	46	59	54	48	58	58	46	54
8	57	56	56	56	56	56	56	56	55
9	51	54	54	57	42	58	58	52	58
10	54	48	58	58	46	58	58	56	54
11	50	55	56	58	54	44	44	56	54
12	49	50	56	57	48	48	48	48	48
13	51	56	56	63	46	52	52	54	56
14	42	50	58	52	58	58	58	54	58
15	47	54	56	56	46	56	56	56	52
16	49	54	60	49	30	56	56	58	54
Índice Esclerométrico Médio Inicial	51,9	52,0	56,4	56,1	50,4	52,5	54,5	52,5	54,0
Limite Superior	57,1	57,2	62,0	61,7	55,4	57,8	60,0	57,8	59,4
Limite Inferior	46,7	46,8	50,7	50,5	45,3	47,3	49,1	47,3	48,6
Índice Esclerométrico Médio Final	52,5	52,4	56,4	56,1	48,8	53,7	56,3	53,1	54,4
Índice Esclerométrico Efetivo	52,5	52,4	56,4	56,1	48,8	53,7	56,3	53,1	54,4
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obs: Itens reprovados são desconsiderados para os cálculos.

Ponto/Elemento	V101 Long	V102 Long	V103 Long	V97 Long	V98 Long	V99 Long	V96 Long	B13	V101 Long
1	54	54	56	58	54	40	52	44	54
2	54	54	55	54	55	42	54	46	54
3	52	56	48	52	49	44	54	48	52
4	46	60	52	52	56	39	52	46	46
5	58	54	56	52	52	44	56	40	58
6	49	58	58	52	53	43	54	52	49
7	55	58	52	55	58	43	55	46	55
8	42	56	56	57	58	40	48	52	42
9	56	54	54	61	52	44	56	54	56
10	58	56	58	57	58	46	56	48	58
11	47	56	56	54	62	40	58	52	47
12	56	55	55	57	55	44	60	46	56
13	56	52	54	53	50	40	58	42	56
14	54	55	56	52	55	46	44	44	54
15	50	52	58	52	49	44	52	50	50
16	54	55	54	54	52	46	60	42	54
Índice Esclerométrico Médio Inicial	52,6	55,3	54,9	54,5	54,3	42,8	54,3	47,0	52,6
Limite Superior	57,8	60,8	60,4	60,0	59,7	47,1	59,7	51,7	57,8
Limite Inferior	47,3	49,8	49,4	49,1	48,8	38,5	48,9	42,3	47,3
Índice Esclerométrico Médio Final	53,6	55,3	55,3	54,1	53,7	42,8	54,8	46,4	53,6
Índice Esclerométrico Efetivo	53,6	55,3	55,3	54,1	53,7	42,8	54,8	46,4	53,6
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obs: Itens reprovados são desconsiderados para os cálculos.

APÊNDICE II
VÍDEO DE APRESENTAÇÃO – MODELO BIM

