

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DAS TÉCNICAS DE TOMOGRAFIA
ULTRASSÔNICA E RADAR DE PENETRAÇÃO COM
CONTRIBUIÇÃO EM METODOLOGIA DE INSPEÇÃO
DE OBRAS DE CONCRETO**

ANTÔNIO CARLOS ASSIS LEONEL

D0276C22
GOIÂNIA
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFUG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFUG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Antônio Carlos Assis Leonel

3. Título do trabalho

Estudo das Técnicas de Tomografia Ultrassônica e Radar de Penetração com Contribuição em Metodologia de Inspeção de Obras de Concreto

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos Assis Leonel, Técnico**, em 11/01/2023, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 18/01/2023, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3398607** e o código CRC **A15B2542**.

ANTÔNIO CARLOS ASSIS LEONEL

**ESTUDO DAS TÉCNICAS DE TOMOGRAFIA
ULTRASSÔNICA E RADAR DE PENETRAÇÃO COM
CONTRIBUIÇÃO EM METODOLOGIA DE INSPEÇÃO
DE OBRAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção civil da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Andrielli Morais de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0276C22

GOIÂNIA

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Leonel, Antônio Carlos Assis

Estudo das técnicas de tomografia ultrassônica e radar de penetração com contribuição em metodologia de inspeção de obras de concreto. [manuscrito] / Antônio Carlos Assis Leonel. - 2022. CCIX, 209 f.

Orientador: Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira; co-orientador Dr. Oswaldo Cascudo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2022.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Inspeções. 2. Ensaios não destrutivos. 3. Concreto. 4. Tomografia Ultrassônica. 5. Radar GPR. I. Oliveira, Andrielli Moraes de, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 271 da sessão de Defesa de Dissertação de **Antônio Carlos Assis Leonel** que confere o título de Mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração em **Construção Civil**.

Aos **vinte e um dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois**, a partir das **quatorze horas e trinta minutos, na Sala Profa. Márcia Mara de Oliveira, no Centro de Estudos em Hidrologia e Geotecnia Ambiental (CEHIGE)**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Proposta de metodologia de inspeção aplicável a grandes obras de infraestrutura de concreto utilizando técnicas de inspeção não destrutivas”**. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Andrielli Morais de Oliveira (PPGGECON/UFG)** com a participação do coorientador **Oswaldo Cascudo (PPGGECON/UFG)** e demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Helena Carasek Cascudo (PPGGECON/UFG)**, membro titular interno; Professora Doutora **Janine Domingos Vieira (UFF)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Andrielli Morais de Oliveira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e um dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Estudo das Técnicas de Tomografia Ultrassônica e Radar de Penetração com Contribuição em Metodologia de Inspeção de Obras de Concreto



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Morais de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 11/01/2023, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helena Carasek Cascudo, Professor do Magistério Superior**, em 11/01/2023, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos Assis Leonel, Técnico**, em 11/01/2023, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janine Domingos Vieira, Usuário Externo**, em 11/01/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Oswaldo Cascudo Matos, Professor do Magistério Superior**, em 21/01/2023, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3398644** e o código CRC **C9B452C3**.

Referência: Processo nº 23070.064322/2022-72

SEI nº 3398644

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de vida, por me abençoar e me guiar até aqui, me concedendo saúde e sabedoria para seguir em frente.

À minha família, que me apoiou com todo suporte durante toda essa caminhada. Obrigado por acreditar no meu sonho e sempre me motivar a seguir em frente. É muito bom saber que posso contar com vocês em todos os momentos. Amo vocês!

Aos meus professores orientadores. À professora orientadora, Dra. Andrielli Moraes de Oliveira, muito obrigado pelas dicas, orientações, correções, horas gastas em reuniões e discussões técnicas. Ao professor coorientador Dr. Oswaldo Cascudo, obrigado por tão generosamente compartilhar do seu amplo conhecimento e contribuir para o avanço deste trabalho. Sua contribuição é essencial para a concretização de todas as pesquisas desenvolvidas neste Programa de pós-graduação. Muito obrigado!

À Universidade Federal de Goiás, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, por ter me concedido a oportunidade de ampliar e aprofundar meus conhecimentos, abrindo novas possibilidades para minha carreira profissional.

À ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e Furnas Centrais Elétricas S.A por financiar, subsidiar e tornar possível a realização de toda essa pesquisa, por meio dos projetos de pesquisa e desenvolvimento ao qual faço parte. À toda a equipe envolvida no projeto de ANEEL/ Furnas, pelo apoio prestado em várias etapas da pesquisa. Ao Alexandre, Alfredo, Solanda e Aloísio por compartilhar seus conhecimentos e tempo na realização dos ensaios fundamentais para realização desse trabalho, assim como na orientação quanto ao delineamento da pesquisa.

À equipe de compras da FUNAPE, pela parte operacional na aquisição dos equipamentos e materiais necessários.

Ao Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC), pela infraestrutura necessária para a realização do programa experimental. Aos técnicos de laboratório, Vitor, Walter e Tiago pela incrível ajuda durante todo o programa experimental. Agradeço pela grande força dada nas intermináveis concretagens. Sem vocês esse trabalho não seria possível de ser realizado.

Ao GEDur (Grupo de Estudos em Durabilidade) pela troca de conhecimento nas pesquisas em andamento. Aos meus colegas e amigos do mestrado, em especial a Caroliny, Bruna e Jéssica, pela ajuda nas disciplinas, programa experimental e pelas trocas de experiências.

Aos meus amigos, que me ajudaram a ter fé e força para lutar e enfrentar todos os obstáculos, sem nunca desistir. Obrigado pelo companheirismo, apoio e amizade incondicional.

Aos professores e amigos Rodrigo Carvalho da Mata, Lucas Pinheiro e Ricardo Andrade que me inspiraram a ingressar nos estudos relacionados à engenharia diagnóstica, principalmente na temática de inspeções e ensaios não destrutivos. Sempre foram grandes exemplo para mim, e hoje, agradeço por terem me incentivado a seguir no caminho da pós-graduação. Muito obrigado por tudo!

RESUMO

Programas periódicos de inspeção são fundamentais para o planejamento de manutenções preventivas e corretivas em tempo hábil de fazer aportes financeiros e contratação de equipe técnica e de engenharia e evitar colapsos da estrutura, enormes prejuízos monetários e transtornos sociais. Aliado a essas necessidades de ações manutenção, os métodos de ensaios não destrutivos modernos mostram-se como importantes ferramentas para o monitoramento da integridade dessas estruturas, oferecendo parâmetros quantitativos e qualitativos que auxiliam a análise do inspetor. Diante desse contexto, propõe-se com o trabalho avaliar a aplicabilidade de ensaios não destrutivos para detecção de danos em estruturas de concreto, principalmente os ensaios de tomografia ultrassônica e radar GPR e, a partir de parâmetros quali-quantitativos, propor o aprimoramento de uma metodologia pré-existente voltada às grandes obras de infraestrutura brasileiras como barragens, hidrelétricas e parques eólicos, considerando seu grau de deterioração. O programa experimental proposto prevê a produção e moldagem em laboratório de dois concretos estruturais utilizados em obras de infraestrutura, com classe de resistência C25 e C45 MPa, sob duas condições de cura: ao ar e úmida. Nesses concretos foram realizadas as caracterizações básicas dos materiais constituintes e caracterização física e mecânica com a utilização de ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão e índice de vazios e ensaios não destrutivos, quais sejam esclerometria, velocidade de onda ultrassônica e resistividade elétrica superficial aparente e resistividade volumétrica) entre 1 e 28 dias. Também foi verificada a potencialidade de uso dos ensaios de tomografia ultrassônica e radar GPR para identificação de barras e tubos no interior de blocos, análise de defeitos gerados em placas e fissuração em lajes. Como resultados, pôde-se obter boas correlações entre os ensaios destrutivos e não destrutivos, com coeficientes de determinação (R^2), em sua maioria, acima de 0,9. As menores correlações obtidas (da ordem de 0,7 a 0,79) referem-se aos resultados de resistividade elétrica de concretos submetidos à cura ao ar. Em relação à verificação de defeitos e danos nos concretos C25 e C45, o radar GPR mostrou-se eficiente para localizar armaduras e defeitos de maiores magnitude. Já a utilização da tomografia ultrassônica mostrou-se útil para analisar diferentes homogeneidades, detectar vazios internos na estrutura de concreto de pequeno e médio tamanho, além de também poder atuar na detecção de armaduras. Entretanto, nenhuma das técnicas pôde ser capaz de identificar com precisão juntas frias de concretagem. Assim, cada situação de utilização dessas técnicas de vanguarda deve ser precisamente analisada, a depender das condições de ensaio e dos resultados que se espera, já que em muitas ocasiões cabe ao operador a interpretação do que lhe é apresentado pelas imagens geradas pelo radar e tomógrafo. Por fim, têm-se apresentada a proposta de alteração da metodologia GDE UNB, com a recomendação de inserção de alguns ensaios não destrutivos, bem como a adição de novos fatores de ponderação e intensidade a serem considerados, a fim de compor uma metodologia focada na análise de dano adaptada às situações de grandes obras de infraestrutura.

Palavras-chave: Inspeções. Ensaios não destrutivos. Concreto. Tomografia Ultrassônica. Radar GPR.

ABSTRACT

Periodic inspection programs are essential for planning preventive and corrective maintenance in a timely manner, making financial contributions and hiring technical and engineering staff, and avoiding structure collapses, huge monetary losses and social disturbances. Allied to these needs for maintenance actions, modern non-destructive testing methods are important tools for monitoring the integrity of these structures, offering quantitative and qualitative parameters that help the inspector's analysis. Given this context, this work proposes to evaluate the applicability of non-destructive tests for detecting damage in concrete structures, mainly ultrasonic tomography and GPR radar tests and, based on quali-quantitative parameters, propose the improvement of a methodology pre-existing infrastructure dedicated to large Brazilian infrastructure works such as dams, hydroelectric plants and wind farms, considering their degree of deterioration. The proposed experimental program foresees the laboratory production and molding of two structural concretes used in infrastructure works, with strength classes C25 and C45, under two curing conditions: air and humid. In these concretes, the basic characterization of the constituent materials and physical and mechanical characterization were carried out with the use of tests of compressive strength, modulus of elasticity, water absorption by immersion and voids index and non-destructive tests (rebound hammer, ultrasonic wave velocity and surface electrical resistivity and volumetric) from 1 to 28 days. The potential use of ultrasonic tomography and GPR radar tests was also verified to identify bars and tubes inside blocks, analysis of defects generated in plates and cracking in slabs. As a result, it was possible to obtain good correlations between destructive and non-destructive tests, with coefficients of determination R^2 , mostly above 0.9. The smallest correlations obtained (on the order of 0.7 to 0.79) refer to the results of electrical resistivity of concrete submitted to dry curing in air. Regarding the verification of defects and damages in the C25 and C45 concretes, the GPR radar proved to be efficient to locate reinforcement and defects of greater magnitude. The use of ultrasonic tomography, on the other hand, proved to be useful to analyze different homogeneities, detect internal voids in small and medium-sized concrete structures, in addition to being able to act in the detection of reinforcement. However, none of the techniques could be able to accurately identify concrete cold joints. Thus, each situation in which these cutting-edge techniques are used must be precisely analyzed, depending on the test conditions and the expected results, since on many occasions it is up to the operator to interpret what is presented to him by the images generated by the radar and tomography. Finally, a proposal has been presented to change the GDE UNB methodology, with the recommendation of inserting some non-destructive tests, as well as the addition of new weighting and intensity factors to be considered, in order to compose a methodology focused on the damage analysis adapted to the situations of large infrastructure works.

Keywords: Inspections. Non-destructive testing. Concrete. Ultrasonic Tomography. GPR Radar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Quantidade de publicações ao longo dos anos.....	13
Figura 2.2. Quantidade de publicações por país.....	14
Figura 2.3. Quantidade de publicações por autor.....	14
Figura 2.4 - Número de publicações por revista.....	15
Figura 2.5 - Ensaio de pacometria para identificação de localização de armaduras (LEONEL; FRANÇA, 2019).....	16
Figura 2.6 - Área de ensaio e pontos de impacto (Adaptado de ABNT NBR 7584, 2012). ..	17
Figura 2.7 - Utilização do esclerômetro de reflexão (SILVA, 2017).....	17
Figura 2.8 - Comportamento do ensaio de eco de impacto: medição da profundidade do elemento (a) e detecção de defeito interno (b) (Adaptado de ACI 228.2R, 2013).....	18
Figura 2.9 – (a) Imagem térmica gerada a partir de análise de fachada de edificação (b) (HUANG <i>et al.</i> , 2020).	19
Figura 2.10 - Sistemas de termografia infravermelha em diferentes escalas (MARTIN <i>et al.</i> , 2022).....	20
Figura 2.11 - Esquema do ensaio de resistividade elétrica superficial – método de Wenner – 4 pontos (PROCEQ, 2017).	22
Figura 2.12 - Ensaio de ultrassom: formas de transmissão da onda: direta, semidireta ou indireta (Adaptado de BS 1881: Part 203, 1986).....	24
Tabela 2.3 - Avaliação da qualidade do concreto (Cánovas,1988).	25
Figura 2.13 - Tomografia ultrassônica em prisma de concreto.	26
Figura 2.14 - Tomografia realizada em corpo de prova (PERLIN; PINTO, 2013).....	27
Figura 2.15 - Representação das leituras ultrassônicas: (a) leituras simples, (b) discretizadas e (c) várias leituras discretizadas (PERLIN; PINTO, 2013).	27
Figura 2.16 - Imagem obtida por tomografia dos módulos de impacto: (a) antes do impacto, (b) após os impactos (FERRARO <i>et al.</i> ,2013).	28
Figura 2.17 - Imagem obtida por tomografia em pilar de concreto: (a) antes e (b) após o impacto (FERRARO <i>et al.</i> , 2013).	28
Figura 2.18 - (a) 3D obtido a partir da tomografia ultrassônica e (b) local de realização do ensaio (LORENZI <i>et al.</i> , 2015).	29
Figura 2.19 - Desenho esquemático de um sistema GPR (TAKAHASHI, 2012).....	30
Figura 2.20 - Utilização do radar GPR (ROCHA; SANTOS; BORGES, 2017).....	31
Figura 2.21 - Exemplo de resultado - radargrama (TAKAHASHI, 2012).....	31

Tabela 2.4 - Avaliação qualitativa preliminar do uso de ensaios não destrutivos.....	33
Quadro 2.1 - Levantamento da aplicabilidade dos métodos não destrutivos, mencionados pela literatura.....	34
Figura 2.22 - Relação entre custo e informações relevantes na Inspeção Visual. (Adaptado de FIB, 2002).....	43
Quadro 2.2 - Classificação da condição da OAE (Adaptado de ABNT NBR 9452, 2019a). 44	
Figura 2.23 - Fluxograma da aplicação da Metodologia GDE/UnB (Adaptado de CASTRO, 1994).....	49
Figura 2.24 - Formulação do grau do dano (D) (VERLY, 2015).....	51
Quadro 3.1 - Resultados de caracterização química do cimento CP II F-40 utilizado.....	58
Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural de origem quartzosa.	59
Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado graúdo de pedra britada de rocha granítica.	59
Tabela 3.3 - Caracterização do aditivo superplastificante.....	60
Tabela 3.4 - Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos estudados: classe C45 e C25 MPa.....	61
Tabela 3.5 - Rastreabilidade da produção dos corpos de prova de concreto.....	63
Figura 3.3 - Concretagem: (a) concreto no estado fresco e (b) moldagem de CP cilíndrico. 64	
Figura 3.4 – Montagem e concretagem da placa para simulação de defeitos na peça de concreto.	64
Figura 3.5 – Corpos de prova de concreto com junta fria de concretagem: (a) C45 e (b) C45 e C25.....	65
Figura 3.6 – Corpo de prova de concreto com dimensões de 170x60x10 cm: (a) formas e armadura e (b) concretagem.	66
Figura 3.7 – Fôrmas dos blocos de concreto (a) vista lateral e (b) vista superior.	66
Figura 3.8 – Ensaio de consistência (<i>slump test</i>): (a) concreto C45 e (b) detalhe C45.	67
Tabela 3.6 – Resultados de ensaio de massa específica e consistência (<i>slump test</i>).	67
Tabela 3.7 – Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.	68
Figura 3.9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.	68
Tabela 3.8 – Resultados de ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios NBR 9778 (ABNT, 2005).....	69
Figura 3.10 – Ensaio de esclerometria em prisma de concreto C45.....	70

Figura 3.11 – Ensaio de ultrassom em prisma de concreto C25.....	71
Figura 3.12 – Ensaio de resistividade elétrica superficial (a) e volumétrica (b)	72
Figura 3.13 – Ensaio de tomografia ultrassônica por varredura no topo dos elementos bloco (a) e placa (b).....	73
Figura 3.14 – Divisão dos pontos de leitura de tomografia ultrassônica para detecção de danos em laje de concreto.	74
Figura 3.15 – Esquema de realização do ensaio de flexão (a) e leitura de tomografia ultrassônica na laje (b).	74
Figura 3.16 – Medição de abertura de fissuras por fissurômetro óptico (a) vista lateral e (b) detalhe régua gabarito e fissuras.....	75
Figura 3.17 – Saturação da laje (a) e realização do ensaio de resistividade elétrica superficial aparente (b).....	75
Figura 3.18 – Ensaio com radar GPR fazendo varredura no topo dos elementos bloco (a) e placa (b).	76
Tabela 4.1 – Resultados de índice esclerométrico dos concretos estudados.....	79
Figura 4.1 - Evolução dos resultados de Índice Esclerométrico do concreto C25 para cura seca ao ar e cura úmida.....	80
Figura 4.2 - Evolução dos resultados de Índice Esclerométrico do concreto C45 para cura seca ao ar e cura úmida.....	80
Figura 4.3 - Evolução dos resultados de Velocidade de Propagação de onda ultrassônica do concreto C25 para cura seca ao ar e cura úmida.....	82
Figura 4.4 - Evolução dos resultados de Velocidade de Propagação de onda ultrassônica do concreto C45 para cura seca ao ar e cura úmida.....	83
Figura 4.5 - Evolução dos resultados de resistividade elétrica superficial dos concretos C25 e C45 nas condições de cura seca ao ar e cura úmida.	86
Figura 4.6 - Evolução dos resultados de resistividade elétrica volumétrica dos concretos C25 e C45 nas condições de cura seca ao ar e cura úmida.	87
Figura 4.7 - Evolução dos resultados médios de resistividade elétrica superficial (R_e) e volumétrica (R_v) dos concretos C25 e C45.....	88
Figura 4.8 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e resistência a compressão de concretos C25 e C45.....	90
Figura 4.9 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e módulo de elasticidade estático de concretos C25 e C45.....	91

Figura 4.10 - Correlação entre índice esclerométrico e resistência a compressão de concretos C25 e C45.....	91
Figura 4.11 - Correlação entre índice esclerométrico e módulo de elasticidade estático de concretos C25 e C45.....	92
Figura 4.12 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.	94
Figura 4.13 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.....	94
Figura 4.14 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e resistência à compressão de concretos C25 e C45.....	95
Figura 4.15 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e resistência à compressão de concretos C25 e C45.....	96
Figura 4.16 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.	96
Figura 4.17 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.	97
Figura 4.18 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.....	97
Figura 4.19 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.....	98
Figura 4.20 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura úmida.....	98
Figura 4.21 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura úmida.....	99
Figura 4.22 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.	99
Figura 4.23 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.	100
Figura 4.24 – Imagem de tomografia ultrassônica (a) e foto lateral (b) do Bloco C25.....	102
Figura 4.25 - Imagem de tomografia ultrassônica (a) e foto lateral (b) do Bloco C45	103
Figura 4.26 - Interferências nas leituras de termografia ultrassônica no bloco C25: heterogeneidades do concreto.....	104
Figura 4.27 - Interferências nas leituras de termografia ultrassônica no bloco C45: heterogeneidades do concreto.....	104

Figura 4.28 – Termografia ultrassônica no bloco C25: ruído de superfície gerado.	105
Figura 4.29 - Contato dos transdutores do tomógrafo ultrassônico com o elemento de concreto em análise.	105
Figura 4.30 - Tomografia ultrassônica do bloco C25: identificação de picos de onda.	106
Figura 4.31 - Tomografia ultrassônica do bloco C45: identificação de picos de onda.	106
Figura 4.32 – Tomografia ultrassônica no prisma C25: detecção de defeitos internos.	107
Figura 4.33 – Tomografia ultrassônica no prisma C45: percepção das camadas de concretagem.	108
Figura 4.35 – Uso do radar GPR no bloco C45.	109
Figura 4.36 - Aplicação do tomógrafo ultrassônico e radar GPR em estruturas de concreto. (SCREENINGEAGLE, s.d.)	110
Figura 4.37 - Identificação de elementos no Bloco C45 por GPR.	111
Figura 4.38 Identificação de elementos no Bloco C45 por GPR.	112
Figura 4.39 - Detecção de barras com tomografia ultrassônica em Placa C25.	113
Figura 4.40 - Detecção de elementos (bolas) com tomografia ultrassônica em Placa C25.	113
Figura 4.41 - Detecção do defeito de ninho de concretagem com tomografia ultrassônica: Placa C25.	114
Figura 4.42 - Detecção de bolas de <i>ping pong</i> com tomografia ultrassônica: Placa C25.	114
Figura 4.43 - Detecção de delaminação com tomografia ultrassônica em Placa C25.	115
Figura 4.44 - Detecção de delaminação com tomografia ultrassônica em Placa C45.	115
Figura 4.45 - Detecção de bola de EPS com tomografia ultrassônica em Placa C45.	116
Figura 4.46 - Detecção de bola de <i>ping pong</i> com tomografia ultrassônica em Placa C45.	116
Figura 4.47 - Detecção de bola de EPS com tomografia ultrassônica em Placa C45.	117
Figura 4.48 - Detecção de ninho de concretagem com tomografia ultrassônica em Placa C45.	117
Figura 4.49 - Tomografia ultrassônica em junta fria: placa C25/C45.	118
Figura 4.50 - Tomografia ultrassônica em junta fria - placa C25/C45 (com aumento de ganho)	118
Figura 4.51 – Detecção de barras e elementos internos com radar GPR em Placa C25.	119
Figura 4.52 - Detecção de barras e bola de EPS com radar GPR em Placa C25.	120
Figura 4.53 - Detecção de bola de <i>ping pong</i> com radar GPR em Placa C25.	120
Figura 4.54 – Detecção de ninhos de concretagem e bola de <i>ping pong</i> com radar GPR em placa C25.	121

Figura 4.55 – Detecção de bola de EPS e barras com radar GPR em Placa C45.....	121
Figura 4.56 – Detecção de bola de <i>ping pong</i> com radar GPR em Placa C45.	122
Figura 4.57 - Detecção de bola de EPS com radar GPR em Placa C45.	122
Figura 4.58 – Detecção de ninhos de concretagem e bola de <i>ping pong</i> com radar GPR em Placa C45.	123
Figura 4.59 – Identificação de armaduras paralelas à seção de leitura com radar GPR em Placa C45.	123
Figura 4.60 - Análise da coloração da crista da hipérbole gerada pelo radargrama em Placa C45.	124
Figura 4.61 - Aplicativo de realidade aumentada (a) e mapeamento de barras (b) com radar GPR em Placa de concreto.	124
Figura 4.62 - Fissuras de flexão em laje C25.	125
Figura 4.63 - Fissuras de flexão em laje C45.	125
Figura 4.64 - Ensaio de tomografia ultrassônica em Laje C25.	126
Figura 4.65 - Ensaio de tomografia ultrassônica em Laje C45.	127
Figura 4.66 – Resistividade elétrica superficial ($k\Omega\text{cm}$) antes e depois do ensaio de flexão simples em laje C25.	127
Figura 4.67 – Resistividade elétrica superficial ($k\Omega\text{cm}$) antes e depois do ensaio de flexão simples em laje C45.	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Levantamento da aplicabilidade dos métodos não destrutivos, mencionados pela literatura.....	34
Quadro 2.2 - Classificação da condição da OAE (Adaptado de ABNT NBR 9452, 2019a). ..	44
Quadro 3.1 - Resultados de caracterização química do cimento CP II F-40 utilizado.....	58
Quadro 3.2 – Resumo do programa experimental: técnicas, idades de ensaio, quantidade de leituras e dimensões de corpos de prova utilizados para cada concreto.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Etapas do processo de seleção dos artigos.	12
Tabela 2.2 - Relação entre a resistividade do concreto e o risco de corrosão das armaduras (Adaptado de POLDER, 2000).....	22
Tabela 2.3 - Avaliação da qualidade do concreto (Cánovas,1988).	25
Tabela 2.4 - Avaliação qualitativa preliminar do uso de ensaios não destrutivos.....	33
Tabela 2.5 - Modelo de ficha de classificação da OAE (Adaptado de ABNT NBR 9452, 2019a)	45
Tabela 2.6 - Exemplos de Fatores de Ponderação (Fp) para famílias de elementos estruturais - pilares. (Adaptado de VERLY, 2015)	49
Tabela 2.7 - Exemplos de Fatores de Intensidade (F _i) para famílias de elementos estruturais (Adaptado de VERLY, 2015).....	50
Tabela 2.8 - Classificação dos níveis de deterioração do elemento (Adaptado de VERLY, 2015).	52
Tabela 2.9 - Fatores de relevância estrutural (Fr) (Adaptado de CASTRO, 1994).....	53
Tabela 2.10 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura e ações recomendadas (Adaptado de VERLY, 2015).....	54
Tabela 3.1 - Resultados de caracterização física e mecânica do cimento CP II F-40 utilizado.	57
Tabela 3.2 - Caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa.....	59
Tabela 3.3 - Caracterização do aditivo superplastificante.....	60
Tabela 3.4 - Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos estudados: classe C45 e C25 MPa.	61
Tabela 3.5 - Rastreabilidade da produção dos corpos de prova de concreto.....	63
Tabela 3.6 – Resultados de ensaio de massa específica e consistência (<i>slump test</i>).	67
Tabela 3.7 – Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.	68
Tabela 3.8 – Resultados de ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios NBR 9778 (ABNT, 2005).....	69
Tabela 4.1 – Resultados de índice esclerométrico dos concretos estudados.....	79
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica.....	85
Tabela 4.3. Resumo das equações e correlações obtidas entre os ensaios destrutivos e não destrutivos.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State and Highway Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ARTESP	Agência de Transporte do Estado de São Paulo
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEB	<i>Euro-International Committee for Concrete</i>
CPII F-40	Cimento Portland composto com <i>filler</i> , com resistência à compressão de 40 MPa
CV	Coefficiente de variação
$D_{\text{máx}}$	Maior grau do dano encontrado no elemento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
$E_{\text{ci,m}}$	Módulo de elasticidade tangente à origem médio
END	Ensaio não destrutivo
ETE	Estação de tratamento de esgoto
F_{ck}	Resistência característica à compressão
F_{cm}	Resistência à compressão média
F_i	Fator de intensidade do dano
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
F_p	Fator de ponderação de um dano

F_r	Fator de relevância estrutural
G	Grau do dano
G_d	Grau de deterioração da estrutura
G_{de}	Grau de deterioração de um elemento
$G_{de,máx}$	Maior grau de deterioração encontrado em uma família de elementos
G_{df}	Grau de deterioração de uma família de elementos
GEDUR	Grupo de estudos em durabilidade
GPR	Ensaio de radar de penetração no solo
GPR	<i>Ground Penetrating radar</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IE	Ensaio de eco de impacto
IRT	Ensaio de resposta ao impulso
LABITECC	Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MFL	Ensaio de vazamento de fluxo magnético
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OAEs	Obras de arte especiais
Pa	Pascal – unidade de tensão
PROARTE	Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas
R^2	Coefficiente de determinação

RNA	Redes neurais artificias
RSL	Revisão sistemática da literatura
RT	Ensaio radiográfico
S.A.	Sociedade anônima
Sd	Desvio padrão amostral
TERM	Ensaio de termografia infravermelha
UDOT	<i>Utah Department of Transportation</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>
UT	Ensaio de ultrassom

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	6
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	11
2.2.1 Dados bibliométricos	13
2.2.2 Técnicas não destrutivas	15
a) Técnica de Pacometria	15
b) Esclerometria	16
c) Ensaio de eco de impacto	18
d) Termografia Infravermelha.....	19
e) Resistividade elétrica	21
f) Ultrassom.....	23
g) Tomografia ultrassônica	25
h) Georadar (GPR).....	29
2.2.3 Análise da aplicabilidade dos ensaios não destrutivos em inspeções.....	32
2.3 METODOLOGIAS/ ROTEIROS PARA INSPEÇÕES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	38
2.3.1 Metodologias internacionais	38
2.3.2 Metodologia proposta pela NBR 9452 (ABNT, 2019a).....	41
2.3.3 Metodologia GDE/UnB	46
a) Fator de Ponderação do Dano (F_p).....	49
b) Fator de intensidade do dano (F_i).....	50
c) Grau do Dano (D)	51
d) Grau de deterioração do elemento (G_{de}).....	52
e) Grau de deterioração da família de elementos (G_{df}).....	53
f) Fator de relevância estrutural (F_r).....	53
g) Grau de deterioração da estrutura (G_d)	54
2.4 Comentários gerais	54
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	57

3.1.1	Materiais	57
3.1.2	Dosagem dos concretos	60
3.1.3	Produção, moldagem e cura dos concretos.....	61
3.1.4	Caracterização dos concretos no estado fresco e endurecido	67
3.1.5	Métodos não destrutivos convencionais	70
a)	Esclerometria	70
b)	Propagação da onda ultrassônica	71
c)	Resistividade elétrica superficial aparente (Re) e Resistividade elétrica volumétrica (Rv)	72
3.1.6	Métodos não destrutivos mais contemporâneos	73
d)	Tomografia ultrassônica	73
e)	Radar GPR	76
3.2	PROPOSTA DE METODOLOGIA DE INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	76
CAPÍTULO 4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NOS PRIMEIROS 28 DIAS DE IDADE	78
4.1.1	Esclerometria	79
4.1.2	Velocidade de onda ultrassônica	82
4.1.3	Resistividade elétrica	84
4.1.4	Correlações entre as grandezas medidas.....	90
4.2	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DANOS NO CONCRETO	101
4.2.1	Detecção de barras e tubos em blocos de concreto.....	102
a)	Detecção por tomografia ultrassônica.....	102
b)	Detecção por radar GPR	108
4.2.2	Detecção de defeitos produzidos em placas	112
c)	Tomografia ultrassônica	112
d)	Radar GPR	119
4.2.3	Detecção de danos de fissuração produzidos em lajes	124
e)	Detecção de danos por tomografia ultrassônica	125
f)	Detecção de danos por resistividade elétrica superficial	127
4.3	PARÂMETROS PROPOSTOS PARA A METODOLOGIA DE INSPEÇÃO ..	128
4.3.1	Danos, Fatores de Ponderação (Fp) e Fatores de Intensidade (Fi) adicionais	129
CAPÍTULO 5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133

5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA.....	133
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	136
REFERÊNCIAS.....	138
ANEXO A - MANUAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA GDE/UNB A OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	152

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho expõe aspectos relacionados à engenharia diagnóstica e ao prognóstico de estruturas de concreto que podem ou não apresentar sinais de danos e de deterioração. Neste sentido, o conceito de ferramentas diagnósticas se insere no que tange a vistorias, inspeções e avaliações, além de ensaios e testes para a composição de análises e investigação da qualidade do concreto (GOMIDE, FAGUNDES NETO; GULLO, 2009).

É de conhecimento que estruturas de concreto duráveis consomem recursos naturais, recursos humanos e sociais de forma mais otimizada e racional, além de ocasionarem significativas reduções nas quantidades de resíduos gerados e menores parcelas de emissões de gases de efeito estufa durante sua vida útil, além de serem mais adaptáveis às mudanças climáticas (OLIVEIRA, CASCUDO, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021; CAPMAS, 2014).

Ao mesmo tempo, em um cenário mundial, estruturas de concreto armado já existentes podem ter a sua vida útil, desempenho, conservação e durabilidade comprometidos por formação de ilhas de calor, chuvas ácidas, aumento de poluição atmosférica e de CO₂, dentre outros.

Nesse sentido, a ciência de dados e da informação pode auxiliar em um eficiente planejamento estratégico das cidades focando em programas e roteiros de inspeções e manutenções de estruturas de concreto. Isto permite o controle de riscos à segurança, dos danos e do comprometimento dessas estruturas. Além disso, a correção de eventuais problemas se torna mais barata e têm-se uma maior possibilidade de prevenção de novos danos, fazendo com que haja uma melhor programação de aportes financeiros e o mínimo de transtorno social e à dinâmica das cidades.

Assim, a necessidade de monitoramento da estrutura cresce à medida que sua idade avança, requerendo assim um acompanhamento contínuo em função da possibilidade de danos que podem conduzir a resultados desastrosos (CHO, 2003). Da mesma forma, caso as intervenções de manutenção não ocorram em um prazo correto, o nível de degradação poderá acarretar em limitações no uso da estrutura ou até mesmo sua completa interdição (VERLY, 2015).

Com efeito, nota-se que nos últimos anos, os pesquisadores têm focado em estratégias de monitoramento e inspeções que visam a aspectos econômicos e, principalmente, de segurança estrutural e aumento de vida útil (SOHN, 2005). Logo, é crescente o número de estudos relacionados ao monitoramento da integridade estrutural com o uso de técnicas não destrutivas, tendo em vista a variedade de ferramentas eficazes para avaliação disponíveis.

Nas últimas décadas a utilização dos ensaios não destrutivos têm sido crescente e têm se tornado um tema de grande relevância em diversos países (SILVA, 2017). Isto posto, é importante ressaltar que, se por um lado tem-se a crescente demanda de utilização das técnicas não destrutivas em inspeções, por outro tem-se a limitação do uso dessas técnicas em função de sua impossibilidade de verificar em totalidade as regiões sujeitas ao dano (BARROS FILHO, 2018). Em função disso, em algumas situações, é comum a utilização de ensaios associados, ou até mesmo o uso de inteligência artificial com a finalidade de melhorar a localização de danos e sua caracterização com maior precisão possível.

Na 10ª edição da conferência anual de tecnologia da Nvidia, a *GPU Technology Conference* (2019), a empresa PRENAV apresentou uma ferramenta de inspeção de pontes, usinas hidroelétricas, barragens e torres eólicas com a utilização de drones automatizados conduzidos por inteligência artificial. Os drones utilizados sobrevoavam as estruturas realizando centenas de fotos em alta resolução, que, posteriormente, eram montadas em 3 dimensões. Em seguida, algoritmos realizavam a detecção dos danos e seu grau com base no histórico de inspeções daquela estrutura, mapeando a ocorrência de fissuras no concreto, corrosão nas peças de aço, peças deterioradas etc. (COSTA, 2019) Em entrevista, Nathan Schuett, o *ceo* da empresa PRENAV, afirmou textualmente o seguinte: "a manutenção contínua é cada vez mais importante, e nós (PRENAV) queremos ajudar a melhorar as inspeções para que não ocorram acidentes" (COSTA, 2019).

Dada a grande relevância ao tema pelo mundo todo, diversos centros de pesquisa dedicam-se ao estudo de técnicas de inspeção e proposição de sistemas de gestão para monitoramento de estruturas em concreto armado (MITRE, 2005). No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT - administra cerca de oito mil Obras de Arte Especiais (OAEs), dentre elas pontes, túneis, viadutos e passarelas de concreto armado. Entre os anos de 2016 a 2020, desde que foi implementado o Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas – PROARTE, o DNIT investiu mais de 97 milhões de reais em obras de manutenção e reabilitação de OAEs, além da construção de novas passarelas pelo Brasil (DNIT, 2020).

Neste contexto, percebe-se a crescente preocupação com o desenvolvimento das ações de manutenção das grandes estruturas de concreto armado, em função de sua notada importância para o meio urbano.

Apesar da crescente demanda pelo tema, os principais trabalhos sobre inspeção e gestão de OAEs no Brasil, em sua maioria, não apresentam integração entre si e, em suas essências, baseiam-se principalmente na metodologia GDE/UnB proposta inicialmente por Castro (1994) ou na metodologia de inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto apresentada pela NBR 9452 (ABNT, 2019a). Em suma, a metodologia GDE/UnB apresenta uma avaliação baseada no grau de deterioração estrutural, que estabelece relação direta com as manifestações patológicas encontradas; já a metodologia da NBR 9452 (ABNT, 2019a), por sua vez, avalia as condições de estabilidade da estrutura, baseando-se nos danos observados em elementos padrão.

Ressalta-se ainda que a metodologia proposta pela norma brasileira NBR 9452, em suas versões anteriores, promoveu o desenvolvimento de dois outros documentos nacionais: a norma DNIT 010/2004 de Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido (DNIT, 2004) e a resolução ARTESP ET-C21/002: Controle das condições estruturais e funcionais e de durabilidade das Obras de Arte Especiais (ARTESP, 2007), empregada para pontes do Estado de São Paulo.

Estudos acerca de métodos de monitoramento e diagnóstico de danos em estruturas de concreto são apresentadas por Cavalcanti (2010), Sahuinco (2011), Euqueres (2011), Rosa (2014) Verly (2015), Barros Filho (2018) e Lauria (2018). Chies (2014) e Silva (2017) apresentam a utilização da técnica de ultrassonografia para detecção de danos. Segundo eles, a técnica apresenta-se como uma alternativa viável, embora demande tempo e um investimento financeiro relativamente elevado para sua realização.

Teixeira, Silva e Neto (2019) exibem em sua pesquisa o monitoramento de integridade estrutural em tempo real, utilizando sinal obtido por técnica de impedância eletromecânica, que permite avaliar, de forma não destrutiva, estruturas de difícil acesso e elevado custo. Na pesquisa mencionada, há complementarmente o emprego de inteligência artificial, por meio da técnica de Redes Neurais Artificiais - RNA, para tratar os dados obtidos e propor modelos. Barros Filho (2018) também promoveu a utilização de ensaios não destrutivos aliados ao

emprego da Inteligência Artificial por meio de redes neurais artificiais, com o objetivo de promover uma maior facilidade no monitoramento do mecanismo do dano.

Cabe ressaltar ainda que na temática de avaliação de deterioração de estruturas de concreto, alguns estudos desenvolvidos pelo GEDUR – Grupo de Estudos em Durabilidade, da Universidade Federal de Goiás, precedem e se relacionam com o objetivo do presente trabalho. Guimarães (2003) realizou um estudo que promoveu o desenvolvimento de uma ferramenta metodológica para avaliação comparativa do grau de deterioração de edificações. O trabalho baseou-se em levantamento de manifestações patológicas das edificações que pretendiam ser comparadas, atribuindo um índice de deterioração de acordo com a gravidade da anomalia detectada e do comprometimento em função da perda de desempenho. Assim, pôde ser obtido o valor da deterioração absoluta da edificação para, a partir disso, estabelecer prioridades para ações de manutenção. O estudo de caso foi realizado em 20 edificações da Universidade Federal de Goiás.

Outro trabalho de relevância regional e nacional desenvolvido pelos pesquisadores do GEDUR foi o relatório técnico de inspeção e avaliação da estrutura de concreto do Estádio Serra Dourada, que se trata de uma obra em concreto aparente com cerca de 48 anos de idade (CASCUDO *et. al.*, 2009). Em seu escopo o trabalho promoveu a avaliação da estrutura sob aspectos de resistência e segurança estrutural, mediante avaliações qualitativas e quantitativas do concreto e da estrutura, em termos dos aspectos mecânicos e estruturais. Também foi observada a estrutura sob o ponto de vista da durabilidade, inferindo sobre o estado de conservação e estabelecendo um diagnóstico acerca das principais manifestações patológicas observadas e suas implicações em relação ao desempenho do sistema estrutural. Na inspeção foi utilizada a metodologia GDE/UnB para estruturar as avaliações visuais do quadro de sintomas dos problemas existentes na estrutura.

Nessa mesma temática de inspeções, Dias (2018) realizou uma pesquisa experimental cujo objetivo foi avaliar o grau de deterioração de estruturas em concreto armado de Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs. Para tanto, também foi utilizada a metodologia GDE/UnB adaptada para ETEs. Dentre os aspectos que mais influenciaram a deterioração da ETE analisada, citam-se os aspectos operacionais, as características do esgoto e as especificações de projeto das estruturas. Os ensaios realizados para diagnóstico das manifestações patológicas que forneceram subsídios para a aplicação da Metodologia GDE/UnB foram a medida de espessura da frente de carbonatação, aspensão de nitrato de prata para verificação da frente de

penetração de cloretos, índice esclerométrico, pacométria, resistividade elétrica superficial e extração de testemunhos para avaliação da resistência mecânica à compressão e para análises da microestrutura (por microscopia eletrônica de varredura – MEV). A partir dos resultados obtidos pelos ensaios, pôde-se determinar o grau de deterioração da estrutura analisada e estipular prazos e prioridades para manutenção das anomalias identificadas.

Com relação à aplicação de ensaios não destrutivos, o trabalho desenvolvido por Spíndola (2017) objetivou a avaliação de concreto estrutural de pilares a partir dos ensaios de esclerometria e ultrassom em comparação com resultados do controle tecnológico. Em seus resultados, pôde-se verificar altas correlações entre as técnicas destrutivas e não destrutivas, evidenciando que estas últimas podem ser utilizadas em futuros estudos ou em ações de manutenções preventivas.

Assim, este trabalho insere-se em um contexto de pesquisas de durabilidade do concreto amado, dentro do GEDUR no sentido de dar continuidade aos trabalhos acima citados e contribuir ainda mais com os estudos que vêm sendo desenvolvidos pelo grupo para avaliação da aplicabilidade das técnicas não destrutivas convencionais e de vanguarda para subsidiar análises básicas e avançadas em inspeções de estruturas em concreto armado, sendo um dos principais focos deste trabalho avaliar a sensibilidade de técnicas não destrutivas de tomografia ultrassônica e o radar GPR para detecção de defeitos internos em estruturas e, a partir disso, propor uma metodologia de inspeção que seja aplicável à grandes obras de infraestrutura em concreto, como barragens, estruturas de usinas hidroelétricas, blocos de torres eólicas, estruturas de pontes e viadutos, etc.

Em resumo, observa-se que há muitas informações acerca de metodologias de inspeção aplicadas a obras de infraestrutura na literatura nacional e internacional, entretanto elas não estão correlacionadas e não há um guia de seleção unificado para definição de métodos de ensaios não destrutivos aplicáveis aos potenciais danos presentes nessas estruturas. Isso em partes é justificado pela diversidade e natureza das obras de concreto armado que, muitas vezes a depender da forma, local onde está inserida e característica do uso, pode apresentar manifestações patológicas distintas, ocasionando em técnicas de inspeção diferentes.

Assim, o presente trabalho justifica-se a partir da lacuna existente em relação à vigência de uma metodologia de inspeção aplicada especialmente a grandes obras de infraestrutura que se baseie na avaliação do grau do dano dessa estrutura, com a utilização de técnicas de ensaios com parâmetros quali-quantitativos, obtidos por meio de ensaios não destrutivos. Para resolver esta

lacuna, estudos que avaliam do grau de deterioração de estruturas e resultados de inspeções, foram utilizados como base neste trabalho para identificar os potenciais danos que essas estruturas estão sujeitas. Isso fornece uma nova abordagem para a seleção de métodos de ensaios não destrutivos com a maior aplicabilidade para avaliar e identificar os possíveis danos em estruturas de concreto.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade de ensaios não destrutivos para detecção de danos em estruturas de concreto, a partir de parâmetros quali-quantitativos e, propor a inserção desses ensaios a uma metodologia de inspeção já existente e voltada para grandes obras de infraestrutura, tais como: barragens de concreto, estruturas de usinas hidroelétricas, bases de torres eólicas, estruturas de pontes e viadutos.

Os objetivos específicos são:

- identificar, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), os principais ensaios não destrutivos existentes e aplicáveis às inspeções de estruturas em concreto e avaliar a aplicabilidade deles para detecção de danos e manifestações patológicas em estruturas de concreto armado;
- correlacionar as grandezas obtidas pelos ensaios não destrutivos tradicionais de esclerometria, ultrassom, resistividade elétrica superficial e resistividade volumétrica entre si e com as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados;
- avaliar a sensibilidade de técnicas não destrutivas contemporâneas, como tomografia ultrassônica e radar GPR para detecção de barras, tubos, defeitos de concretagem e danos internos aos elementos de concreto e
- propor alteração em metodologia de inspeção existente, considerando o grau de deterioração da obra inspecionada com o emprego de ensaios não destrutivos tradicionais e contemporâneos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 contextualiza os aspectos da importância do estudo de procedimentos de monitoramento e técnicas de inspeção de estruturas acabadas, sob o ponto de vista da durabilidade, em estruturas de concreto aplicadas em grandes obras de infraestrutura. Nesta seção também é descrita a justificativa que motiva o presente trabalho, assim como os objetivos que pretendem ser alcançados.

No capítulo 2 expõe-se uma revisão da literatura sobre a temática de inspeções em estruturas de concreto acabadas, destacando os tipos de danos mais recorrentes nessas estruturas, assim como as principais técnicas de ensaios não destrutivos encontradas na literatura. Também é trazido uma Revisão Sistemática da Literatura - RSL que objetiva associar os principais ensaios não destrutivos em estruturas de concreto com a sua aplicabilidade para detecção de danos e manifestações patológicas. Por fim, o capítulo ainda traz um panorama sobre as principais metodologias de inspeção de estrutura em concreto utilizadas no Brasil e no mundo.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos propostos para o desenvolvimento da pesquisa, assim como a caracterização básica dos materiais utilizados. Também é apresentado todas as e ensaios relacionados ao procedimento experimental. Na última parte deste capítulo também é apresentada a metodologia de inspeção utilizada como referência neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões desta dissertação, com a aplicação de ensaios não destrutivos para caracterização dos concretos C25 e C45 nos primeiros 28 dias de idade; assim como as curvas e coeficientes de correlação entre eles. Também é apresentada a análise de danos ocorridos em elementos em concreto pelos ensaios de tomografia ultrassônica, radar GPR e Resistividade elétrica superficial. Por fim, discute-se as principais modificações propostas na metodologia tida como base para este trabalho com a inserção de outros ensaios não destrutivos e seus respectivos fatores de intensidade e ponderação.

O Capítulo 5 traz as considerações finais acerca da Revisão da Literatura e as conclusões desta dissertação acerca dos ensaios e metodologia proposta. A seguir, após as referências encontram-se o Anexo A à essa dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda aspectos da engenharia legal, a qual é composta por vistoria e metodologia de inspeção, testes e avaliação para diagnósticos mais assertivos (GOMIDE; FAGUNDES NETO; GULLO, 2009). Dessa forma, relevantes técnicas e ensaios não destrutivos para aplicação em campo, assim como equipamentos, princípios básicos, normatização existente, aplicações e limitações serão mencionados. Ao mesmo tempo, as principais metodologias de vistoria e inspeção em obras e edificações, a nível nacional e internacional existentes, serão exibidas.

Neste sentido, uma revisão sistemática da literatura foi delineada e uma contribuição com dados bibliométricos e dados de engenharia sobre o uso de ensaios não destrutivos e sua relação com a indicação confiável na detecção de danos e defeitos mais recorrentes em estruturas de concreto será exibido. Sob essa perspectiva, destaca-se que a revisão sistemática da literatura – RSL pode ser uma ferramenta útil, uma vez que proporciona o agrupamento, a organização e a posterior avaliação de informações técnicas disponíveis, a partir de pesquisas já realizadas, em sequência, a consolidação desse conhecimento. A categorização de informações, por meio de RSL, tem sido utilizada em vários trabalhos científicos e em várias áreas do conhecimento (KHAN *et al.*, 2001; PETERSEN *et al.*, 2008; KITCHENHAM; CHARTERS, 2009; VAZ; CARASEK; 2019; AHMED *et al.*, 2021; OLENA, *et al.*, 2021; LI *et al.*; 2022; LOPES *et al.*, 2022a,b).

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A vida útil de estruturas de concreto, situadas em ambientes agressivos ou não, pode ser comprometida, entre outros, por influências ambientais, falta de manutenções, tempo, mudanças de uso e falhas construtivas (CAPMAS, 2014; ABNT NBR 15.575, 2021). Em especial no Brasil, grande parte de suas OAEs foram construídas entre as décadas de 1950 e 1970 (MENDES, 2009). Em razão disso, uma significativa parcela dessas estruturas encontra-se em idade avançada entre 40 e 70 anos. Dessa maneira e conforme exposto por Oliveira (2019), a idade/tempo dessas estruturas constitui-se como uma variável significativa no processo de deterioração.

O trabalho de Farhangdoust e Mehrabi (2020), que trata de uma RSL acerca de problemas patológicos em estruturas de concreto armado, lista os seguintes danos e defeitos como os mais comuns de ocorrerem em estruturas de concreto: deslocamento; fragmentação do cobrimento; fissuras e trincas; segregação, falhas de concretagem, vazios internos; separação em juntas frias; carbonatação; exposição e corrosão das armaduras aço e redução de seção transversal de aço.

Esses tipos de danos são, direta ou indiretamente, resultado de fatores como o uso de materiais inadequados, falhas de projeto e execução, e efeitos mecânicos e ambientais (SUTTER *et al*, 2008). Sua ocorrência, quando não diagnosticada e tratada, pode se desdobrar em problemas de segunda ordem, gerando um quadro patológico de grande complexidade. A título de exemplo, a retração por secagem, causada pelo uso excessivo de água na mistura de concreto pode resultar em fissuras nas interfaces das juntas de elementos estruturais, o que por sua vez, permitiria a percolação de água pelas fissuras e, conseqüentemente, poderia causar a lixiviação do concreto e corrosão das armaduras a longo prazo.

Em situações de despassivação das armaduras, a corrosão do aço tem um caráter deletério progressivo, com evolução caótica. À medida que a oxidação do ferro ocorre e que os produtos de corrosão se depositam no entorno das armaduras, o dano estrutural vai se efetivando (CASCUDO, 1997). Caso ela não seja controlada, fissuras de maior magnitude, lascamento e destacamento do concreto, além das deformações nos elementos estruturais, vão certamente ocorrer (CASCUDO, 1997; MEHRABI; FARHANGDOUST, 2019)

Defeitos de concretagem e vazios internos em elementos de concreto são defeitos típicos em estruturas que podem ser causados por dosagem e concepção inadequadas do concreto ou por processos impróprios de mistura, transporte e adensamento concreto. Uma das investigações mais detalhadas sobre a avaliação do desempenho de estruturas de concreto foi realizada pelo Departamento de Transporte de Utah (UDOT, 2004). Em suas investigações, fissuras de retração foram relatadas após a construção, apontando para uma especificação inadequada do concreto como a principal causa.

Em relação às falhas ocasionadas durante a fase executiva, pelos profissionais encarregados pela construção, destacam-se os erros construtivos e os erros na concepção do projeto (SOUSA *et al.*, 2021). Dentre as falhas mais comuns relacionadas a manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, pode-se citar as falhas durante o processo de concretagem, como

escoramento inadequado, armaduras insuficientes ou mal posicionadas, assim como o emprego equivocado de materiais de construção (TRINDADE, 2015).

Para Werneck, Costa e Ferreira (2020), o apontamento de qual fase da etapa construtiva ou pós-construtiva promoveu a ocorrência de defeitos deve ser realizado a partir do conhecimento da origem do problema e do histórico da construção. Batista *et al.* (2021) ainda citam que os problemas oriundos de uma combinação de fatores associados ou não, foram agravados ainda mais nas últimas décadas em virtude da crise econômica em que, algumas obras e estruturas, não passaram por manutenções adequadas.

Outro conjunto de parâmetros relevantes que causam danos à estrutura, principalmente em termos de defeitos de superfície, são os efeitos ambientais. Umidade, variação de temperatura, degelo, precipitação, exposição a cloretos, carbonatação e outros fatores ambientais podem ter efeitos prejudiciais para as estruturas (HASANIAN; CHOI; LISSENDEN, 2018).

Diante deste cenário de danos nas avaliações de estruturas de concreto armado, conhecer os principais danos e manifestações patológicas que podem comprometer essas estruturas é imprescindível. Assim, para que sejam mantidas a integridade e a funcionalidade de uma estrutura é necessário que se tenha um programa de manutenção periódica aplicado a essa estrutura, pois uma vez que o dano é diagnosticado, torna-se necessário a realização de inspeções com o objetivo de prevenir problemas futuros e assim obter sucesso no processo de reabilitação. Portanto, é imprescindível entender os processos de deterioração e os métodos e ensaios necessários para que sejam realizados diagnósticos precisos de possíveis danos e possibilitem desenvolver ações eficazes e capazes de reduzir a ocorrência de anomalias e falhas, melhorando assim a qualidade em uso das estruturas e otimizando a administração dos recursos (SOUSA *et al.*, 2021).

Aliado a isso, o uso de técnicas não destrutivas têm se mostrado como uma maneira econômica e eficiente de viabilizar a inspeção e avaliar o estado de conservação de estruturas e obras. Por sua natureza predominantemente não invasiva, estes ensaios caracterizam-se como importantes ferramentas para o controle de qualidade de materiais e produtos da construção civil e valem-se como uma importante estratégia para o monitoramento de estruturas em concreto armado.

Segundo Neville (2016), os ensaios não destrutivos raramente resultam em um "número" que pode ser interpretado de forma inequívoca, ou seja, é necessária uma análise baseada em engenharia. Dessa forma, caso os ensaios sejam realizados em função de uma controvérsia entre

partes envolvidas na obra, o programa completo de ensaios deve ser determinado previamente e a interpretação dos possíveis resultados, considerando sua variabilidade, deve ser acordada.

De acordo com o documento TCS-17 (IAEA, 2002), as seguintes situações associadas à construção civil podem ter o emprego de métodos não destrutivos:

- controle tecnológico em concretos;
- aceitação ou rejeição de lotes de materiais;
- verificação da qualidade de mão de obra a respeito dos processos de mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto;
- monitorar o crescimento da resistência do concreto, visando remoção de fôrmas e duração do período de cura;
- determinação de extensão e profundidade de fissuras, vazios ou falhas de concretagem.
- verificação de cobrimento e condições das armaduras;
- checagem da uniformidade e homogeneidade do concreto e
- verificação do nível de deterioração do concreto após ações de sobrecarga, fogo e fadiga.

Nota-se que, em muitos casos, as aplicações estão associadas à localização e avaliação de falhas e defeitos em estruturas de concreto. Assim, para um correto diagnóstico dessas estruturas, é muito interessante associar uma ou mais técnicas de ensaios que possam permitir um diagnóstico mais assertivo.

2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Com o objetivo de maior aprofundamento sobre o tema e preenchimento das lacunas da pesquisa acerca da utilização de técnicas não destrutivas aplicáveis em inspeções foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A RSL foi realizada em três etapas (DRESCH *et al.*, 2015), sendo a primeira de planejamento, em que as orientações de pesquisa foram reunidas em um protocolo; a segunda de condução, que consistiu na realização de busca e seleção de estudos aderentes de acordo com os critérios de inclusão e exclusão definidos no protocolo; e a

terceira de extração e análise dos dados, que possibilitou compreender o estado da arte da área em investigação (GRANT; BOOTH, 2009; TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003)

A questão de pesquisa foi “Quais são os ensaios não destrutivos recomendados para avaliação do estado de conservação de estruturas em concreto?”. Como critérios de inclusão foram considerados os trabalhos que tratavam de inspeções em estruturas de concreto de obras de infraestrutura (pontes, barragens, viadutos etc) e trabalhos que relataram exclusivamente a utilização de ensaios não destrutivos. Já os critérios de exclusão adotados foram estudos que trataram de ensaios realizados em laboratório, estudos de ensaios realizados em estruturas que não sejam concretos, estudos que não estavam em língua inglesa e estudos repetidos entre as bases de busca.

A coleta dos dados deu-se entre novembro de 2020 a março de 2021, nas seguintes bases de dados: *Scopus, Web Of Science, Engineering Village e Science Direct*. A *string* (palavras-chaves) de busca utilizada foi *inspection* AND concrete AND structure* AND test* AND (non-destructive OR “non destructive” OR NDT)*, com o objetivo de obter artigos que possam tratar exclusivamente de atividades de inspeções ou vistorias em estruturas de concreto armado com a utilização de ensaios não destrutivos.

Na Tabela 2.1 é possível acompanhar as etapas de seleção dos artigos. Foram considerados todos os estudos relacionados à área de pesquisa, independente do ano de publicação. A busca resultou, inicialmente, em 1042 trabalhos. Após a leitura dos títulos e exclusão de artigos repetidos, obteve-se 364 trabalhos. Em sequência, a análise dos resumos retornou em 67 trabalhos. Por fim, a leitura final de todos os trabalhos resultou em 50 trabalhos aderentes ao tema pesquisado.

Tabela 2.1 - Etapas do processo de seleção dos artigos.

Etapa	Nº de artigos resultantes
Seleção nas bases de dados mediante <i>string</i> de busca	1042
Primeiro processo de seleção: leitura dos títulos e exclusão de trabalhos em duplicidade	364
Segundo processo de seleção: leitura dos resumos	67
Terceiro processo de seleção: leitura dos artigos e seleção de trabalhos relevantes para pesquisa	50

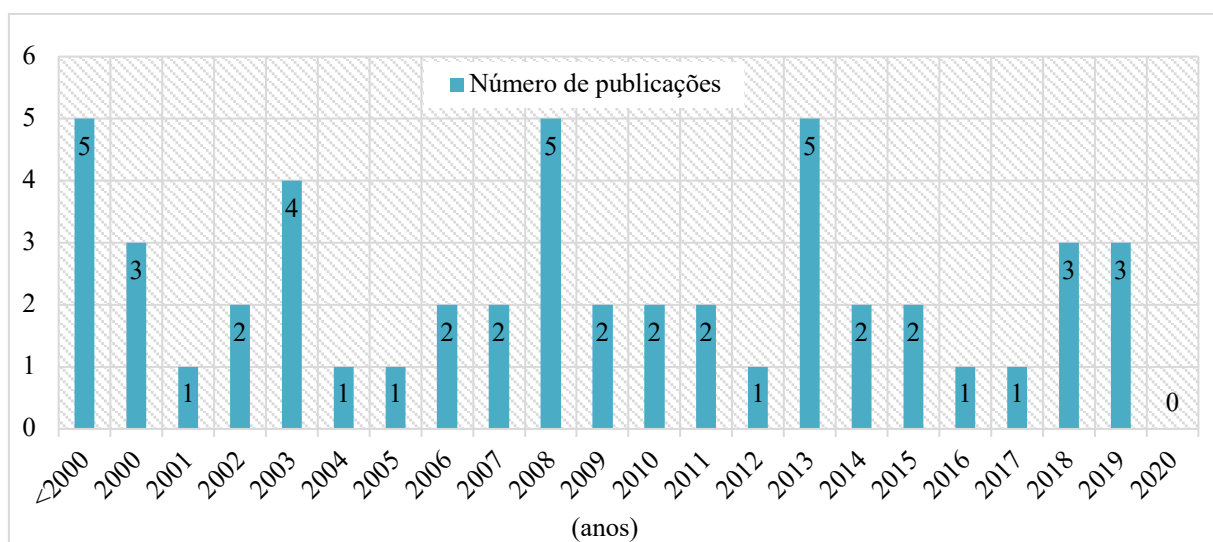
As técnicas de ensaios não-destrutivos mais utilizadas foram extraídas de cada estudo, tabuladas e uma análise das vantagens e desvantagens de cada método foi realizado ao final da revisão da

literatura. Uma investigação abrangente foi realizada em relação às limitações e capacidades de vários métodos e, conseqüentemente, os métodos promissores foram comparados e avaliados com base em sua aplicabilidade para detecção de danos.

2.2.1 Dados bibliométricos

Os resultados bibliométricos apresentam um panorama dos artigos obtidos, disponíveis com base critérios estabelecidos. Não houve recorte temporal. Assim, a Figura 2.1 apresenta o número de publicações obtidas ano a ano. A pesquisa mais antiga obtida data-se do ano de 1990. É notável a manutenção de trabalhos relacionados com o tema ao longo dos anos, sendo publicados, em média 2 trabalhos ao ano. Os anos de 2008 e 2013 tiveram o maior número de publicações aderentes com 5 trabalhos cada. Nota-se também que no último ano da busca (2021), houve um decréscimo dos estudos realizados acerca do tema. Uma justificativa para isso pode ser atrelada à Pandemia de Covid-19, em que países de todo o mundo adotaram políticas para distanciamento social e assim as pesquisas de campo relacionadas a inspeções de estruturas em concreto foram pouco desenvolvidas. Muitas universidades e centros de estudos tiveram de desenvolver seus trabalhos remotamente, com exceção das pesquisas relacionados ao estudo da doença, como o desenvolvimento de antígenos.

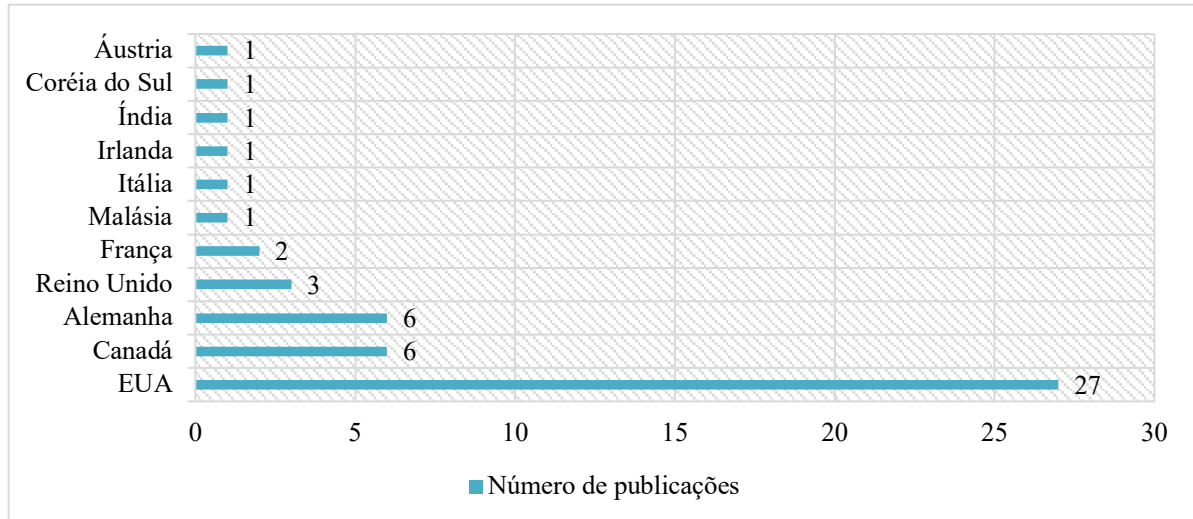
Figura 2.1 – Quantidade de publicações ao longo dos anos.



A Figura 2.2 exibe a quantidade de publicações por países. Fica evidenciada a predominância de publicações sobre o tema por autores dos Estados Unidos (EUA). A justificativa para o ocorrido encontra-se no fato das ações realizadas pelo Departamento de Transportes do país em recuperação e reforma do seu sistema de infraestrutura viária, incluindo a manutenção de suas

pontes e rodovias de concreto. Em 1997, os custos já atingiam 212 bilhões de dólares (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2.2. Quantidade de publicações por país.



Nota-se também que a maioria dos autores que publicaram 2 ou mais trabalhos sobre o tema é de origem norte americana (Figura 2.3). Já na Figura 2.4 encontramos a relação entre o número de publicações e as revistas com dois ou mais artigos. Nota-se a participação significativa da revista *NDT&E Internacional* nas publicações com 09 publicações aderentes à busca. Essa revista é caracterizada pela publicação de trabalhos relacionados pesquisa e desenvolvimento em todas as categorias dos campos de testes e avaliação não destrutivos, incluindo ultrassônicos, eletromagnéticos, radiografia, métodos ópticos e térmicos. Além dos tópicos tradicionais de ensaios não destrutivos, também é enfatizada a área de tecnologia emergente de inspeção de estruturas e materiais civis (SCIENCE DIRECT, 2022).

Figura 2.3. Quantidade de publicações por autor.

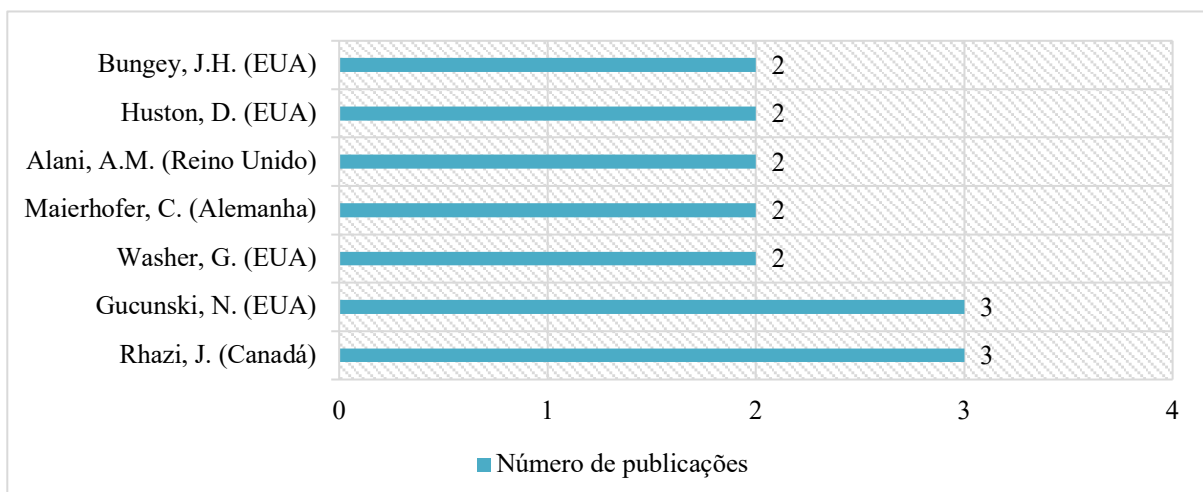
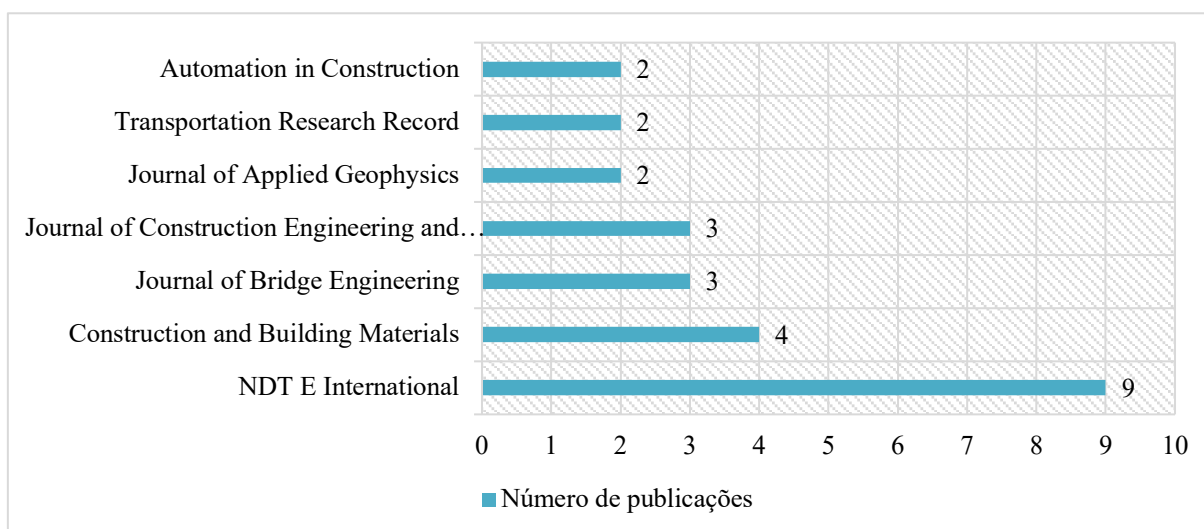


Figura 2.4 - Número de publicações por revista.



Para avaliação de danos estruturas de concreto, cita-se as seguintes técnicas de ensaio, quais sejam: potenciais de corrosão, resistividade elétrica, profundidade de carbonatação, teor de cloretos e sulfatos, absorção de água, porosidade, entre outros (CASCUDO, 2000). Já para análise dos aspectos de resistência mecânica à compressão e estabilidade de estruturas de concreto, podem ser empregados os ensaios de ultrassom, esclerometria e pacometria (SAHUINCO, 2011). Os métodos de ensaios não destrutivos elegíveis para avaliação e monitoramento de estruturas de concreto foram selecionados e avaliados com base nos resultados fornecidos pela revisão da literatura. Para tanto foram selecionados os ensaios de eco de impacto (IE), radar de penetração (GPR), ultrassom (UT), termografia infravermelha (TERM), resposta ao impulso (IRT), ensaio radiográfico (RT) e vazamento de fluxo de magnético (MFL). Nos itens seguintes, há uma descrição dos principais métodos de ensaios, eleitos pela literatura nacional e internacional com pleno potencial para o monitoramento de estruturas em concreto.

2.2.2 Técnicas não destrutivas

a) Técnica de Pacometria

A identificação da posição e espaçamento de armaduras no interior do concreto, além de seu cobrimento, é determinada pela pacometria. Para a realização da técnica, utiliza-se de um equipamento chamado pacômetro (Figura 2.5), que ao deslizar sobre a face da estrutura, detecta interferências metálicas (armaduras) e a profundidade de cada interferência, por meio da alteração na leitura do campo eletromagnético emitido pelo próprio aparelho (ACI, 2004),

Figura 2.5 - Ensaio de pacometria para identificação de localização de armaduras (LEONEL; FRANÇA, 2019).



Fonseca *et al.* (2021) relatam que os aparelhos mais avançados utilizam o sistema de escaneamento por radar, um método geofísico que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência. Isso resulta basicamente na diferença de amplitude e frequência da onda eletromagnética emitida e captada pelas antenas e a capacidade do equipamento em gerar o processamento gráfico dos elementos identificados. A fim de melhorar a precisão dos dados recebidos pelo aparelho, é sugerido deslizá-lo mais de uma vez sobre o mesmo ponto. Uma das dificuldades relatadas por Leonel e França (2019) em sua pesquisa é que durante a realização do método, pode-se haver dificuldade na leitura em função das irregularidades presentes na superfície da estrutura em análise.

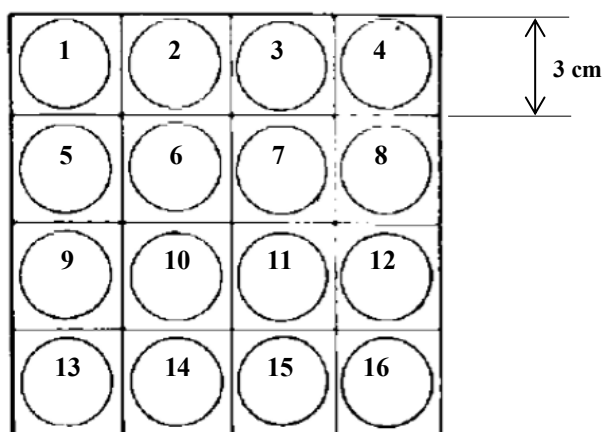
b) Esclerometria

Normatizado no Brasil pela NBR 7584 (ABNT, 2012), o ensaio de esclerometria revela dados a respeito da dureza superficial do material em análise (concreto) no quadrante de análise. O método baseia-se no princípio do impacto de uma massa chocante impulsionada por uma mola, transferindo esta energia para o concreto por meio de uma haste rígida. A parte da energia não absorvida pelo concreto reverte-se em um retorno da massa que se chocou contra o substrato (o chamado ricochete ou reflexão da massa), que é registrado pelo aparelho como um índice mensurável: o índice esclerométrico ou índice de reflexão. Esse índice de impacto não absorvido pelo concreto depende da resistência e da dureza do concreto (ABNT, 2012; ACI, 2004). Portanto, quanto mais resistente e duro for o concreto, maior será o seu índice esclerométrico.

Para a realização do ensaio, a norma NBR 7584 (ABNT, 2012) estabelece que as medições devem ser realizadas em uma região do elemento estrutural compreendida com 9 ou 16

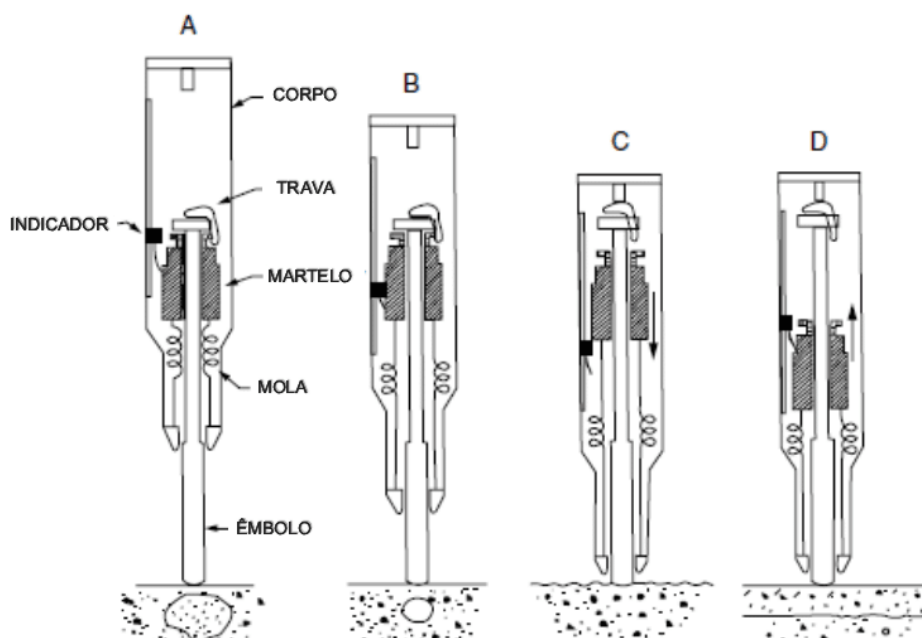
impactos, efetuados com centro espaçados de no mínimo 3 cm, conforme ilustra a Figura 2.6. O valor do índice esclerométrico (IE) é calculado a partir da média aritmética dos valores obtidos. Desprezam-se os valores que divergirem em mais de 10% do valor médio alcançado e recalcula-se a nova média.

Figura 2.6 - Área de ensaio e pontos de impacto (Adaptado de ABNT NBR 7584, 2012).



O equipamento utilizado para determinação do índice esclerométrico é o esclerômetro de reflexão ou martelo Schmidt, cuja operação é ilustrada pela Figura 2.7.

Figura 2.7 - Utilização do esclerômetro de reflexão (SILVA, 2017).



O índice de reflexão é comumente utilizado como teste indireto de sua resistência à compressão (NGUYEN *et al.*, 2013; LIN *et al.*, 2018; SILVA, 2017). Alguns autores trabalham na construção de modelos que correlacionam a resistência à compressão e o índice de rebote do martelo do concreto, por meio de ajustes estatísticos de resultados experimentais repetidos

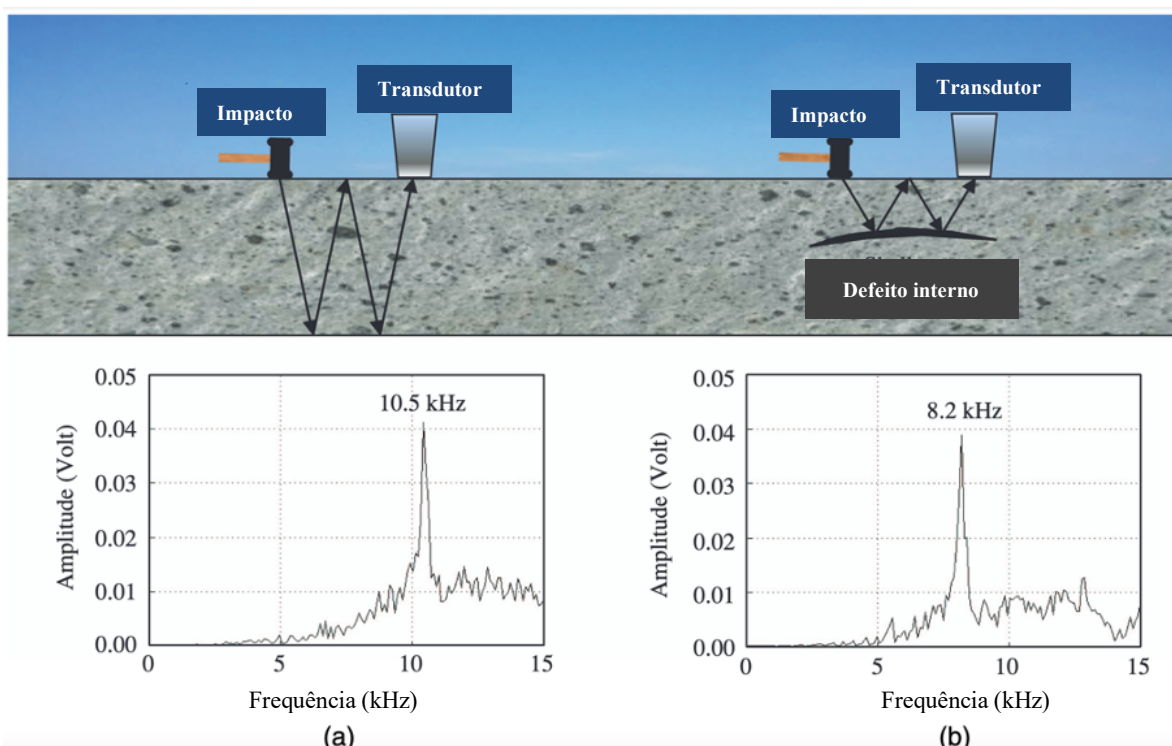
(LIN *et al.*, 2018; LIM; CAO, 2013; SAHA; AMANAT, 2021), pois aspectos como a natureza e a origem do agregado e o tipo de cimento podem determinar o índice esclerométrico (WASHER *et al.*, 2009; REVILLA-CUESTA *et al.*, 2022).

c) Ensaio de eco de impacto

O princípio da técnica de eco de impacto é dado a partir da aplicação de pulsos de impactos mecânicos na superfície do material analisado. A técnica foi inicialmente difundida para avaliação da integridade de elementos de fundação, mas atualmente pode ser utilizada para inspeções em estruturas, devido ao custo relativamente baixo para execução.

Durante a execução do ensaio, os impactos produzidos na superfície do material produzem pequenas vibrações que formam ondas elásticas que se propagam pelo meio (LIANG; SU, 2001). Após realizar um teste de eco de impacto, a frequência dominante excitada pela força de impacto pode ser determinada em muitos locais na superfície do elemento testado (ACI, 2013). Além disso, a presença de falhas em um elemento estrutural sólido interrompe a resposta obtida de um elemento típico de concreto sem falhas (COLEMAN; SCHINDLER; JETZEL, 2021) Este comportamento pode ser observado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Comportamento do ensaio de eco de impacto: medição da profundidade do elemento (a) e detecção de defeito interno (b) (Adaptado de ACI 228.2R, 2013).



Dentre as aplicações relatadas na literatura para o ensaio de eco de impacto, pode-se citar estudos de efeito escala em corpos de prova e elementos estruturais (HONG; KIM; LEE, 2016), defeitos no interior do concreto (COLEMAN; SCHINDLER; JETZEL, 2021), adesão em interfaces e a detecção de corrosão em armaduras de aço (LIANG; SU, 2001).

d) Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha pode fornecer imagens que representam a temperatura refletida da superfície de diferentes elementos no ambiente construído (MARTIN *et al.*, 2022, BAGAVATHAPPAN *et al.*, 2013).

A técnica é baseada no princípio de que uma distribuição anormal de temperatura refletida na imagem termográfica é causada por defeitos, mudanças de materiais ou vazios que alteram a resposta térmica (ou seja, transmitância) do objeto, elemento ou fachada que está sendo testado (KULKARNI *et al.*, 2022). Para estruturas e elementos da construção civil, os ciclos naturais de aquecimento/resfriamento, como a alternância dia-noite, podem ser suficientes para gerar uma resposta térmica no sistema (HUANG *et al.*, 2020), conforme ilustra a Figura 2.9.

Figura 2.9 – (a) Imagem térmica gerada a partir de análise de fachada de edificação (b) (HUANG *et al.*, 2020).

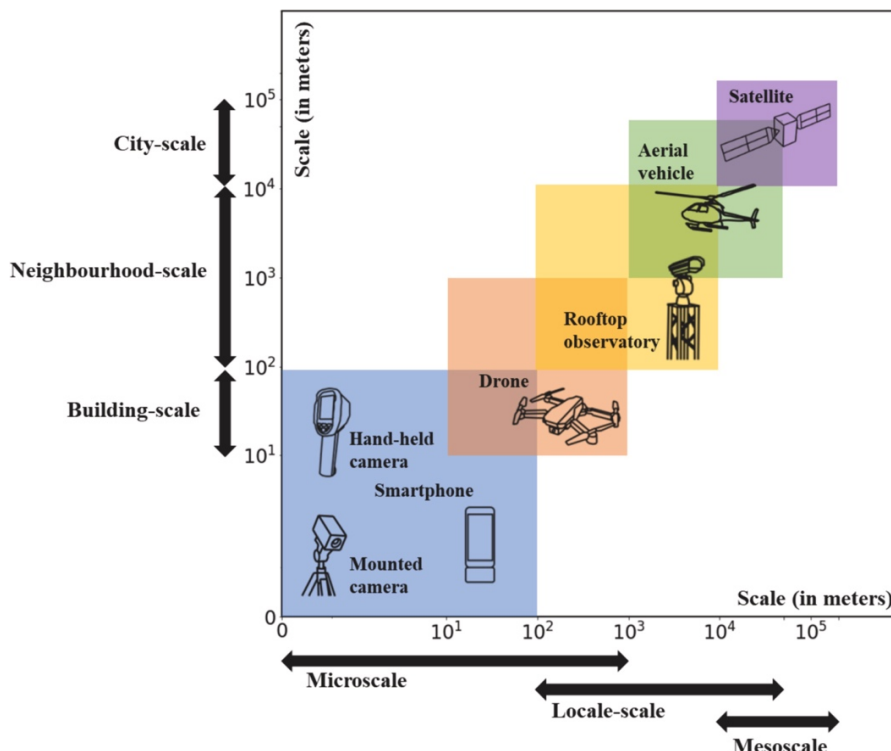


Além de fornecer informações do ambiente construído com alta resolução, a termografia infravermelha também pode ser usada para muitas aplicações em diferentes escalas. Os trabalhos de revisão da literatura publicados por Freitas, Carasek e Cascudo (2014), Ngie *et al.* (2014), Almeida *et al.* (2021), Balaras e Argirou (2002), Dafico *et al.* (2022) relatam as várias aplicações da termografia infravermelha com base em imagens térmicas coletadas. Um exemplo são as atividades de levantamentos de edificações, em que a aplicação não se concentra apenas nos defeitos do entorno do edifício, mas também nas falhas de circuitos elétricos e sistemas de

aquecimento, ventilação e ar-condicionado que podem ser detectados usando a tecnologia (BALARAS; ARGIROU, 2002).

Adicionalmente, o trabalho de Fox *et al.* (2014) descreve as possíveis aplicações da termografia infravermelha para avaliação de parâmetros de eficiência energética de um edifício com base em imagens térmicas. Em paralelo, Martin *et al.* (2022) classificam a termografia em ativa ou passiva. Enquanto a termografia ativa geralmente é usada para detectar defeitos internos de um material ou camada de construção usando uma fonte de excitação interna ou externa, os métodos passivos visam observar o calor emitido por uma superfície. Ainda, a depender da escala em que se pretende obter os resultados, diferentes sistemas infravermelhos podem ser utilizados, conforme ilustra a Figura 2.10.

Figura 2.10 - Sistemas de termografia infravermelha em diferentes escalas (MARTIN *et al.*, 2022).



O satélite é o sistema que permite a coleta de imagens térmicas em maior escala. Além das imagens térmicas, que geralmente são usadas para medir a temperatura da superfície da terra, um satélite pode conter outros sensores para coletar dados em meso-escala. Quando as imagens térmicas são necessárias entre a escala da cidade e a escala do bairro, uma câmera infravermelha é normalmente instalada em um veículo aéreo, como por exemplo uma aeronave. A câmera infravermelha também pode ser instalada em diferentes suportes para coletar imagens térmicas em escalas locais, podendo ser fixadas em telhados, antenas e torres para estudos em escala de bairro. Neste sentido, o uso de veículos não tripulados ou drones podem ser utilizados para

estudos entre a escala de um bairro e até mesmo na escala de uma construção, como por exemplo para levantamento de fachadas de uma edificação. Em estudos de microescala, podem ser utilizados câmeras termográficas colocadas em tripé, sistemas portáteis ou acopladas em smartphones.

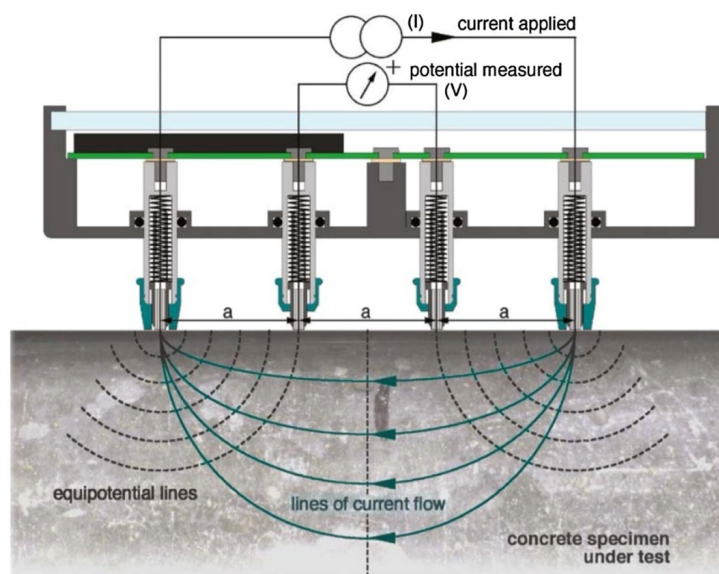
Outra aplicação comentada na literatura mais recente a respeito da termografia infravermelha é para a detecção de defeitos internos, tais como vazios de concretagem, fissuras e corrosão de armaduras em elementos estruturais de concreto armado (BAGAVATHAPPAN *et al.*, 2013). Como exemplo de aplicação, têm-se o emprego em inspeção de pontes de concreto (MICHAL; ILJA; JIRI, 2017; HIASA *et al.*, 2018), materiais compósitos (BOCCARDI *et al.*, 2016; DUAN *et al.*, 2012), assim como para detectar danos em fachadas de edifícios de múltiplos pavimentos (BARREIRA; ALMEIDA; SIMÕES, 2021; PULITI; MONTAGGIOLI; SABATO, 2021).

e) Resistividade elétrica

A resistividade elétrica pode ser capaz de fornecer informações a respeito da microestrutura do concreto, principalmente sobre sua porosidade e sobre a solução da água presente nos poros. Sendo assim, a medição obtida pela técnica pode fornecer indicadores para a avaliação de características do concreto, como por exemplo presença e penetração de cloretos (CASCUDO, 1997; HAMED *et al.*, 2015; CHEYTANI; CHAN, 2021; SENGUL, 2014, YIM *et al.*, 2020). Além disso, por ser um método não destrutivo, é possível sua realização, inclusive, para avaliar o desenvolvimento da resistividade elétrica do concreto ao longo do tempo, sem que prejudique o elemento estrutural (SILVA, 2016).

Outras aplicações para os métodos de resistividade elétrica estão associadas à previsão de resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto e monitorar em tempo real o processo de hidratação do cimento, a partir da consolidação dos produtos de hidratação, principalmente o C-S-H (CHUNG *et al.*, 2021, PAN *et al.*, 2022, GHODDOUSI *et al.*, 2017). Dessa forma, embora existam vários métodos de determinação da resistividade do concreto, o teste de sonda Wenner (4 eletrodos) geralmente têm sido a preferência para testes de resistividade em laboratório e em campo devido à sua natureza não destrutiva, medição rápida e equipamento compacto (HAMED *et al.*, 2015; SPRAGG *et al.*, 2013; RAMÓN *et al.*, 2021). Este ensaio é descrito pela ASTM G57 (2012) e foi inicialmente proposto para o estudo dos solos, porém, posteriormente foi adaptado para o estudo em concretos. A Figura 2.11 ilustra um desenho esquemático de sonda Wenner com quatro eletrodos lineares igualmente espaçados.

Figura 2.11 - Esquema do ensaio de resistividade elétrica superficial – método de Wenner – 4 pontos (PROCEQ, 2017).



Existe ainda a resistividade volumétrica ou resistividade elétrica em 2 pontos. Polder (2000) estabelece uma relação entre a possibilidade de corrosão e os valores de resistividade elétrica superficial, obtidos a partir de leituras em concretos de cimento Portland. Essa relação é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Relação entre a resistividade do concreto e o risco de corrosão das armaduras (Adaptado de POLDER, 2000)

Resistividade do concreto ($k\Omega.cm$)	Probabilidade de corrosão
< 5	Muito alta
5 - 10	Alta
10 - 20	Baixa
> 20	Desprezível

A partir dos parâmetros da Tabela 2.2, a medição da resistividade do concreto pode ser utilizada como indicador da resistência à corrosão de vergalhões embutidos em estruturas de concreto armado (POLDER, 2000; GOWERS; MILLARD, 1999). Entre as vantagens para a utilização desse método, destacam-se a velocidade e praticidade de execução do ensaio em campo. Os resultados obtidos pela técnica podem ser utilizados para complementar resultados de outros ensaios de monitoramento do processo de corrosão das armaduras (SAHUINCO, 2011; MEDEIROS, 2001). Por outro lado, dentre as dificuldades da realização do ensaio, têm-se que a resistividade elétrica é altamente dependente de fatores ambientais, como a umidade do concreto (SALEEM *et al.*, 1996; VILLAGRÁN-ZACCARDI *et al.*, 2009) e a dureza superficial

dele. O trabalho de Larsen (2006) relata que quando a umidade interna do elemento estrutural de concreto reduz de 88% para a 77%, o valor da resistividade elétrica aumenta em média duas vezes e que quando diminui mais ainda de 88% para 66%, aumenta em média seis vezes. Já o trabalho de Sengul (2014) demonstrou que o concreto seco ao ar, apresentou valores de resistividade elétrica cerca de 50% maior do que em condições saturadas.

O ensaio de resistividade do concreto requer contato suficiente entre o dispositivo de medição e a superfície amostrada. Para que se garanta uma precisão e confiabilidade na medição, é necessário que a qualidade deste contato seja garantida. Na literatura encontram-se algumas soluções envolvendo a modificação da superfície do concreto para estabelecer o contato eletrolítico entre os eletrodos da sonda e a superfície do concreto, como o uso de esponjas saturadas (POLDER, 2000), gel condutor (ANGST; ELSENER, 2014) ou umedecimento localizado (PROCEQ, 2017). O impacto dessas modificações de superfície nas medições de resistividade do concreto ainda se encontra com poucas comprovações na literatura de melhoria desse contato (ZACCARDI; MAIO, 2014; CHEYTANI; CHAN, 2021).

Por fim, Cheytani e Chan (2021) relatam em sua pesquisa que não se tem definido um padrão internacional para medições de resistividade de concreto para corpos de prova de concreto, principalmente os não saturados. Assim, o uso de novas técnicas, inclusive com o embutimento de sondas, podem ser opções viáveis para garantia do contato necessário entre a sonda e o concreto sem modificações provenientes da umidade superficial (RAMÓN *et al.*, 2021).

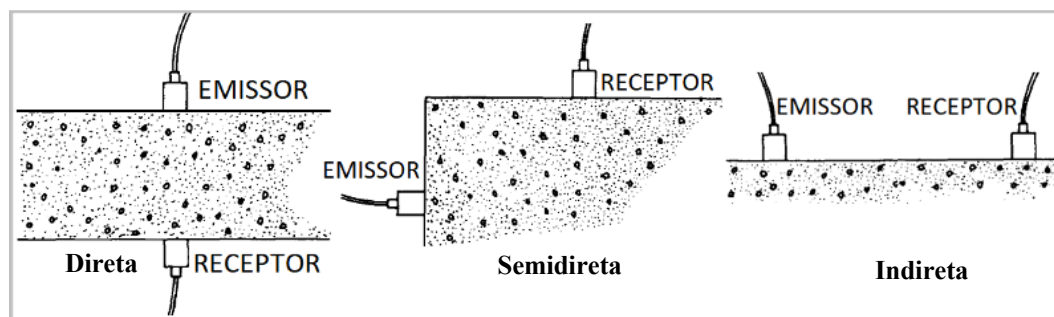
f) Ultrassom

O ensaio de ultrassom é baseado no uso de ondas acústicas de alta frequência, não perceptíveis para o ouvido humano, que se transmite através do material analisado sem causar-lhe nenhum dano. Ademais, o elemento pode ser testado quantas vezes for necessário no mesmo local, o que pode ser bastante útil e viável para as ações de monitoramento de estruturas e acompanhamento das condições internas ao longo do tempo.

Com a técnica de ultrassom é possível obter parâmetros de uniformidade do concreto, ou seja, detectar fissuras, descontinuidades, defeitos superficiais e internos, assim como, espessuras de peças, camadas de diferentes características e estimar módulo de elasticidade dinâmico do concreto (PERLIN; PINTO, 2013; GRACE; JOHN, 2019; SANDES, 2020).

No Brasil, o ensaio de ultrassom é regulamentado pela ABNT NBR 8802 (ABNT, 2019b) e para a realização do ensaio, os transdutores emissores e receptores podem estar posicionados de forma direta, semidireta e indireta (Figura 2.12).

Figura 2.12 - Ensaio de ultrassom: formas de transmissão da onda: direta, semidireta ou indireta (Adaptado de BS 1881: Part 203, 1986).



Para verificação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, os elementos de concreto analisados são submetidos a um pulso ultrassônico de alta frequência (intervalo de 20 a 150 KHz). Esse pulso atravessa o material em análise e é recebido por um transdutor receptor, que permite a obtenção do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal (PERLIN; PINTO, 2013; MELLO *et al.*, 2017; LIN *et al.*, 2018). Por fim, o resultado emitido pelo aparelho é o tempo no qual a onda se deslocou do emissor ao receptor, sendo medido em segundos. A distância entre os transdutores deve ser medida em metros e, com base nesses valores, é possível determinar a velocidade de deslocamento da onda ultrassônica.

De acordo com Sandes (2020), as condições do local do ensaio ou a geometria e acesso ao elemento estrutural ditam qual a configuração a ser adotada. Em pilares de extremidades, por exemplo, onde não se tem o acesso facilitado em todas as faces do pilar, o ensaio pode ser realizado utilizando a técnica da transmissão indireta ou semidireta. Cabe ressaltar que o método de propagação direta é o mais recomendável e que apresenta os resultados mais satisfatórios, já que a onda se propaga no interior do concreto e desta forma se tem uma representação mais verdadeira do estado do concreto. Já o método indireto, a propagação da onda dá-se na camada mais superficial do concreto e isso pode ocasionar valores diferentes dos obtidos na propagação direta. Além disso a amplitude do sinal recebido é menor do que na propagação direta (NO, 2002; REHMAN *et al.*, 2016; SANDES, 2020).

Outro fator que pode impactar no tipo e qualidade dos resultados obtidos pelo ensaio de ultrassom é o tipo do transdutor utilizado. O transdutor que atua transformando os pulsos elétricos gerados em ondas ultrassônicas pode atuar numa faixa de 25 kHz a 10 MHz,

dependendo da aplicação. Um transdutor de altas frequências (acima de 100 kHz), por exemplo, é geralmente utilizado para amostras de pequenas dimensões, caminhos mais curtos ou concretos de elevada resistência à compressão. Já os transdutores de baixa frequência (menor que 25 kHz) são mais utilizados em elementos de grandes dimensões que possuem um caminho mais longo para a onda percorrer (RAMIREZ, 2015).

Uma situação comumente apresentada no meio técnico e científico é a aplicação dos ensaios de ultrassom para determinação de profundidade de fissuras. Podem ser citados diversos trabalhos desenvolvidos para detecção de falhas e fissuras, como o de No (2002) e Perlin e Pinto (2013), e para estimar a profundidade delas, como nos estudos de Bungey *et al.* (2006), e Souza (2016).

Apesar das vantagens na utilização do ultrassom, cabe ressaltar que alguns fatores podem afetar os resultados do ensaio, como distância entre as superfícies de contato dos transdutores; a presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; tipo, massa específica e outras características do agregado; tipo de cimento e grau de hidratação e, por fim, tipo de adensamento e idade do concreto (REHMAN *et al.*, 2016; LIN *et al.*, 2018; SILVA, 2016).

A Tabela 2.3 apresenta os parâmetros para avaliação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica, estabelecidos por Cánovas (1988).

Tabela 2.3 - Avaliação da qualidade do concreto (Cánovas,1988).

Velocidade de propagação (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

g) Tomografia ultrassônica

A tomografia por ultrassom refere-se à construção de imagens transversais de um objeto sólido com base em ondas ultrassônicas. Esta técnica permite a avaliação qualitativa e identificação dos defeitos internos do concreto, por meio de imagens ocasionadas em escalas de cores, conforme ilustra a Figura 2.13 em que se tem a realização do ensaio de ultrassom em um prisma de concreto.

Figura 2.13 - Tomografia ultrassônica em prisma de concreto.



O princípio da tomografia por ultrassom consiste na emissão de uma série de sondas, cada uma controlada individualmente por um *software*. De acordo com a excitação controlada, um feixe ultrassônico concentrado de várias distâncias focais é gerado e, assim, uma apresentação bidimensional ou tridimensional pode ser produzida para exibir a localização exata e o tamanho de cada defeito (NO, 2002), conforme ilustra a Figura 2.14 no estudo realizado por Perlin e Pinto (2013).

Quando comparada com a técnica de ultrassom tradicional, a tomografia ultrassônica amplia a capacidade de representação, uma vez que os resultados obtidos produzem uma reconstrução completa de qualquer objeto ou região submetido a várias projeções em diferentes ângulos até somar uma volta completa. Tal técnica foi chamada de transformada de Radon¹ e é considerada a base matemática para a tomografia computadorizada (PERLIN; PINTO, 2013), conforme ilustra a Figura 2.15-c, em que ao discretizar a seção em elementos, o pulso ultrassônico percorre diferentes elementos com distintas distâncias.

¹ A transformada de Radon, é uma clássica operação proposta por Jhohann Radon em 1917, em que se têm a transformação a partir de uma integral de uma função definida no plano para o espaço. Tem sido aplicado com sucesso em diversas tarefas, como reconstrução de imagem tomográfica, correção de imagem multiespectral, detecção de pontos de impressão digital e reconhecimento de caracteres em uma imagem digital (COSTA *et al.*, 2017).

Figura 2.14 - Tomografia realizada em corpo de prova (PERLIN; PINTO, 2013).

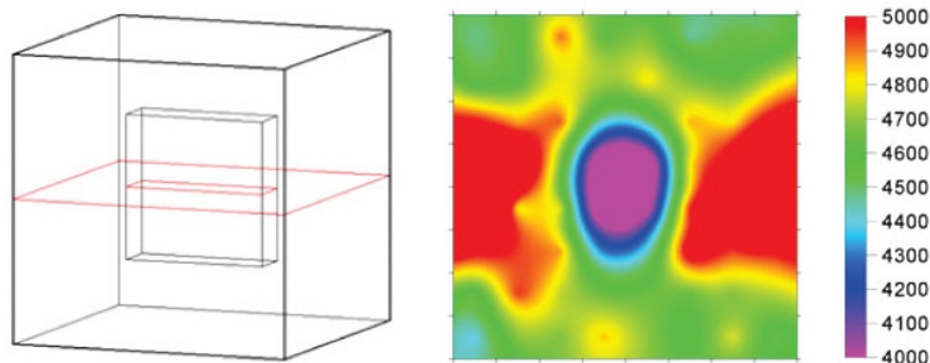
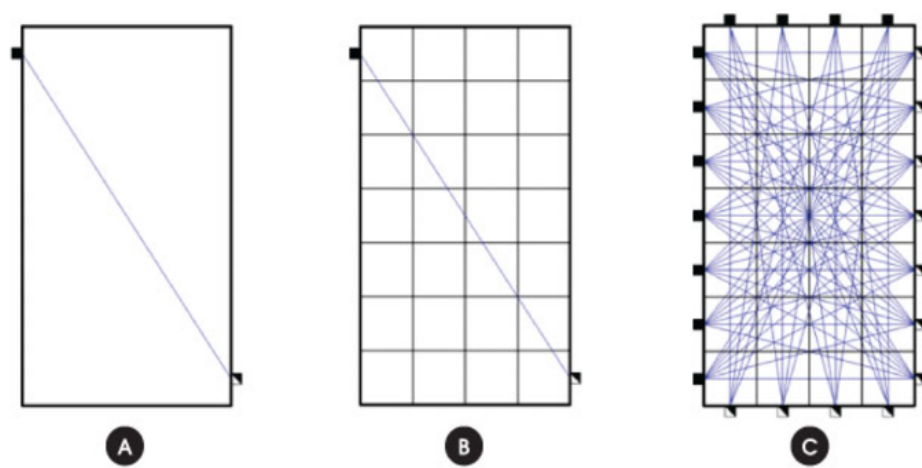


Figura 2.15 - Representação das leituras ultrassônicas: (a) leituras simples, (b) discretizadas e (c) várias leituras discretizadas (PERLIN; PINTO, 2013).



No estudo de FERRARO *et al.* (2013), a técnica de tomografia ultrassônica foi utilizada para avaliar a integridade de dois pilares de uma ponte antes e depois de serem aplicadas cargas de impactos. Para o estudo, os pilares foram acoplados à blocos de impacto produzidos em concreto armado e células de carga. Antes e após a realização dos impactos foram realizadas medições de tomografia em seções transversais horizontais em diferentes alturas nos pilares e também nos blocos de impacto. As imagens tomográficas tridimensionais foram geradas a partir de reconstruções bidimensionais para cada altura dos pilares, conforme ilustra as Figuras 2.16 e 2.17.

Figura 2.16 - Imagem obtida por tomografia dos módulos de impacto: (a) antes do impacto, (b) após os impactos (FERRARO *et al.*, 2013).

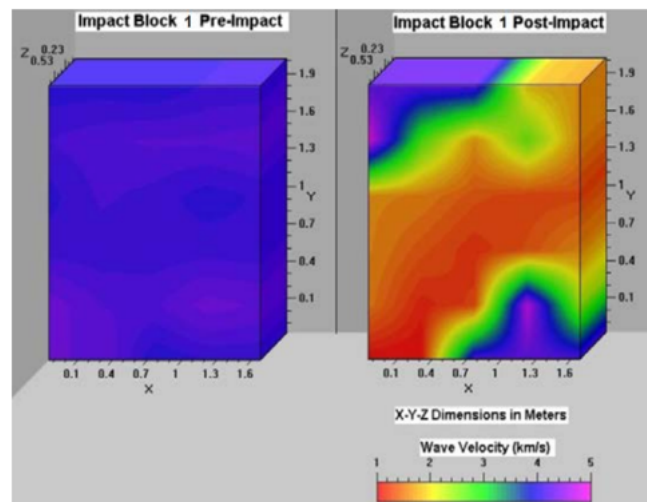
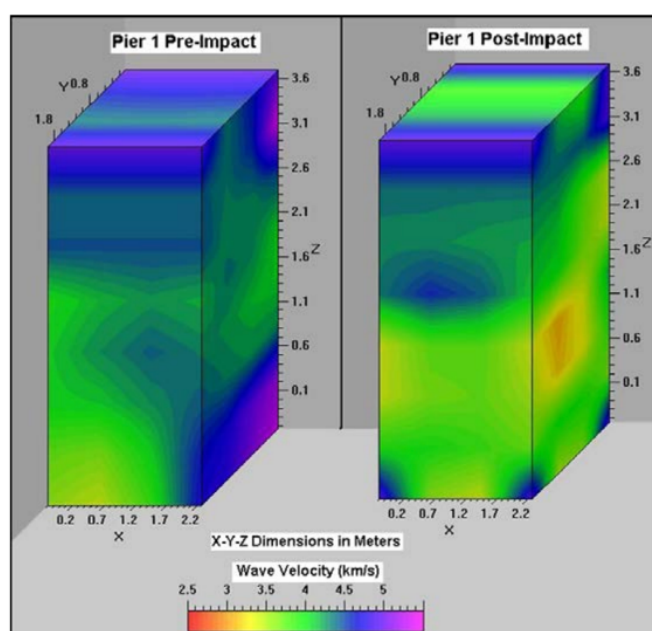


Figura 2.17 - Imagem obtida por tomografia em pilar de concreto: (a) antes e (b) após o impacto (FERRARO *et al.*, 2013).

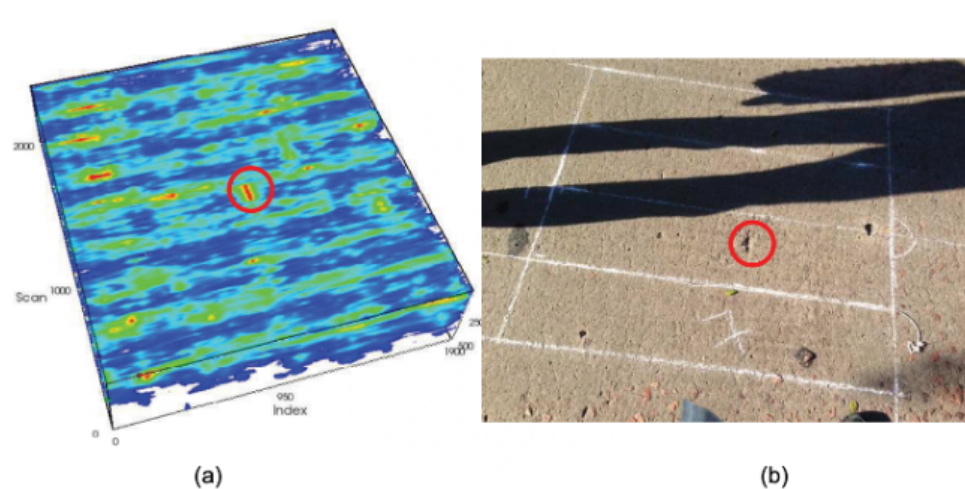


Os resultados da tomografia antes dos impactos mostram velocidades de propagação de onda que indicam concretos de boa qualidade e, além disso, baixas variações de velocidades indicam boa homogeneidade da estrutura (FERRARO *et al.*, 2013). Em contrapartida, as imagens ocasionadas após as colisões sobre os blocos, indicaram a redução das velocidades. Os dados tomográficos obtidos mostram-se em bom acordo com os danos visuais presentes nos blocos de impacto. Ferraro *et al.* (2013) concluíram que o uso da tomografia ultrassônica em elementos estruturais que sofreram danos por cargas de impacto foi viável tecnicamente para avaliação de

sua integridade, uma vez que identificam com bastante precisão os danos no interior da estrutura.

No trabalho de Lorenzi *et al.* (2015), os autores utilizaram a tomografia para criar uma representação tridimensional de defeitos internos em elementos estruturais de concreto armado (Figura 2.18).

Figura 2.18 - (a) 3D obtido a partir da tomografia ultrassônica e (b) local de realização do ensaio (LORENZI *et al.*, 2015).



Ainda na pesquisa de Lorenzi *et al.* (2015), a partir dos dados coletados na varredura em postes de concreto foram geradas imagens 3D das interfaces refletidas do elemento ensaiado, constatando a presença de diferentes elementos no interior do poste. Já a análise em um painel de laje permitiu determinar com precisão o posicionamento, quantidade e tamanho dos alvéolos dos elementos pré-fabricados, assim como os defeitos em sua superfície, conforme ilustra o destaque em vermelho na Figura 2.18. A análise dos dados coletados permitiu explorar as superfícies e fazer cortes na estrutura, mostrando a versatilidade que o equipamento oferece.

h) Georadar (GPR)

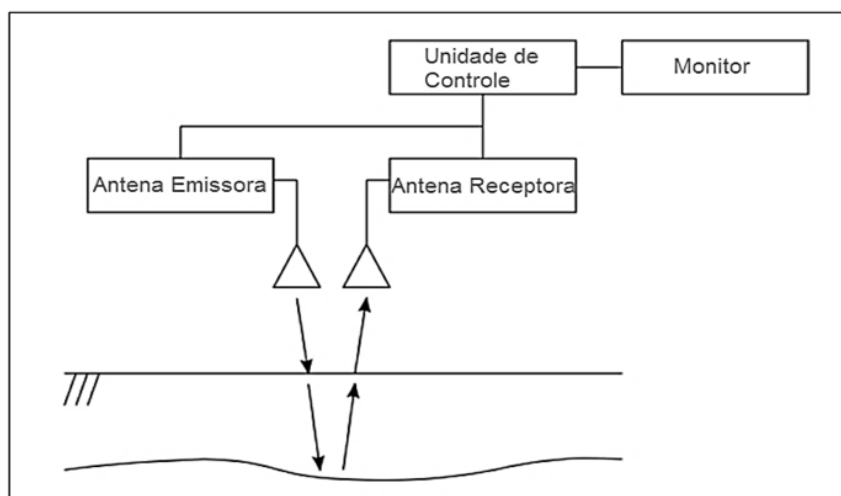
Este método baseia-se na propagação de pulsos eletromagnéticos de curta duração e alta frequência, geralmente compreendida na faixa de 10 a 3000 MHz, que são repetidamente irradiadas por meio de uma antena transmissora. O registro contínuo de traços amostrados, ao longo de uma seção, gera um radargrama, que após a aplicação da rotina de processamento, configura-se em uma seção de alta resolução do meio (PROCEQ, 2022)

O GPR propõe-se a fornecer informações mapeamento de objetos metálicos e até mesmo tubulações de água ou gás, monitoramento de estruturas de prédios ou outros tipos de construção, como túneis e pontes e monitoramentos em campo. Em adição, Barrile e Pucinotti (2005) citam que a técnica do GPR tem sido bastante útil em estruturas de concreto armado, principalmente para:

- estimar a espessura de peças a partir de um dos lados;
- localizar armaduras passivas no interior das estruturas;
- estimar a espessura do cobrimento em peças de concreto armado;
- localizar vazios e fissuras e estimar suas dimensões e
- localizar grandes variações de umidade no elemento analisado.

O princípio de funcionamento da técnica dá-se a partir da emissão de pequenos pulsos eletromagnéticos e da detecção da reflexão destes pulsos em regiões não homogêneas. Antenas emissoras enviam os pulsos eletromagnéticos que percorrem o interior da estrutura. Nas regiões com diferentes propriedades eletromagnéticas são geradas reflexões. Assim, parte da energia emitida retorna à superfície e as reflexões são então capturadas por antenas receptoras que enviam os dados para o processamento e exibição no monitor. A outra parte é propagada através da descontinuidade (GRACIA, 2008), conforme ilustra a Figura 2.19.

Figura 2.19 - Desenho esquemático de um sistema GPR (TAKAHASHI, 2012).



Dentre os principais parâmetros que podem influenciar nas medidas de GPR, cita-se: a permissividade relativa do meio, a condutividade, a permeabilidade magnética e a frequência

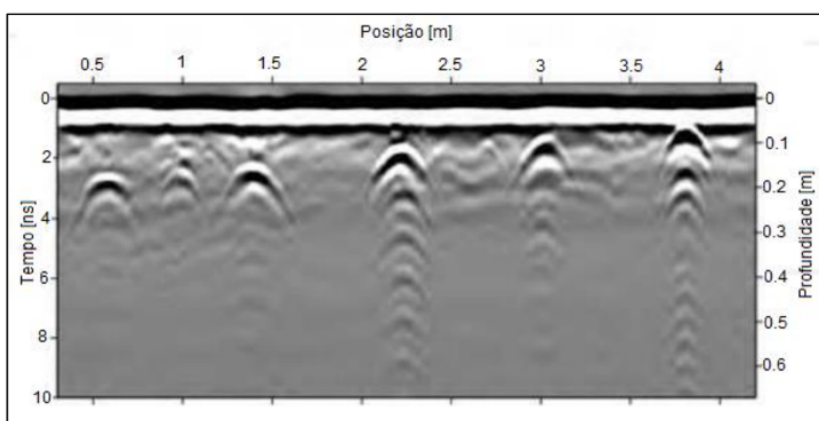
da emissão. Dentre essas, a frequência é o único parâmetro controlado pelo operador, geralmente dependendo do equipamento utilizado. Os demais parâmetros são dependentes do meio observado (TAKAHASHI, 2012). A Figura 2.20 ilustra a realização do ensaio com GPR em solo na pesquisa de Rocha, Santos e Borges (2017).

Figura 2.20 - Utilização do radar GPR (ROCHA; SANTOS; BORGES, 2017).



Durante a realização do ensaio, quando o sinal da antena intercepta um alvo, uma reflexão é gerada e registrada. Assim, todas as reflexões obtidas em cada direção de leitura, são plotadas em gráficos chamados de radargrama. No eixo das abscissas é marcada a posição na direção da leitura efetuada, enquanto no eixo das ordenadas são plotados os valores de profundidade das reflexões e do tempo percorrido pelo sinal até atingir o objeto refletido, conforme ilustra a Figura 2.21.

Figura 2.21 - Exemplo de resultado - radargrama (TAKAHASHI, 2012).



Apesar das funcionalidades que o equipamento se propõe, PARKER (2010) menciona que materiais úmidos absorvem mais do sinal emitido pelo GPR, o que faz com que uma quantidade

menor de energia seja refletida de volta à antena. Assim, a intensidade do sinal refletido torna-se menor, o que resulta em perda de resolução.

Já para os objetos metálicos, que têm a capacidade de refletir completamente o sinal do radar, os alvos situados atrás ou dentro do objeto metálico tornam-se despercebidos na leitura, devido a este efeito de “escudo” ou “sombra” gerado. Estruturas densamente armadas, com espaçamento entre as barras igual ou inferior a 5 cm, impossibilitam a análise por meio do GPR. Assim como na Tomografia Ultrassônica, um dos resultados gerados a partir da utilização da técnica de radar GPR é a representação tridimensional dos elementos internos detectados.

2.2.3 Análise da aplicabilidade dos ensaios não destrutivos em inspeções

A partir dos dados obtidos com a Revisão Sistemática da Literatura, pôde-se considerar várias técnicas não destrutivas, potencialmente aplicáveis à inspeção de estruturas de concreto armado. Uma revisão abrangente sobre vários métodos de ensaios não destrutivos com aplicabilidade às estruturas de concreto (um total de 18 métodos) foi realizada por Farhangdoust e Mehrabi (2019). Outro trabalho de destaque na literatura internacional é o de Rehman *et al.* (2016) que trata da aplicação de ensaios dinâmicos não destrutivos, infravermelho e tecnologia de radar às inspeções de pontes de concreto.

Os métodos de ensaios não destrutivos elegíveis para avaliação e monitoramento de estruturas de concreto foram selecionados e avaliados com base nos resultados fornecidos pela revisão da literatura. Para tanto foram selecionados os ensaios de eco de impacto (IE), radar de penetração (GPR), ultrassom (UT), termografia infravermelha (TERM), resposta ao impulso (IRT), ensaio radiográfico (RT) e vazamento de fluxo de magnético (MFL). A partir da percepção de uso das técnicas não destrutivas pelos trabalhos relacionados na RSL, os seguintes critérios foram considerados para classificar os métodos utilizados em inspeções de estruturas em concreto: velocidade do ensaio, detecção interna (capacidade de detectar defeitos internos), precisão da técnica, velocidade de análise, custo, facilidade de uso, segurança para o público e operador, habilidade exigida do operador e repetibilidade. Ao mesmo tempo, uma proposta de classificação em três níveis: bom (B), intermediário (I) e ruim (R) foi sugerida, baseando-se nos dados de percepção de uso das técnicas de ensaios identificadas na literatura. Os resultados são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Avaliação qualitativa preliminar do uso de ensaios não destrutivos.

CRITÉRIO	IE	GPR	UT	TERM	IRT	RT	MFL
Velocidade do ensaio	I	B	I	B	I	R	I
Deteção interna	B	B	B	R	I	B	I
Velocidade de análise	I	I	I	B	I	B	I
Custo	B	B	I	B	B	R	R
Precisão	B	I	B	I	I	B	I
Facilidade de uso	B	B	B	B	B	R	R
Segurança ao operador	B	B	B	B	B	R	I
Habilidade exigida	B	B	B	B	B	R	R
Repetibilidade	B	I	B	I	I	B	I

Legenda:

IE	Ensaio de eco de impacto
GPR	Ensaio de radar de penetração
UT	Ensaio de ultrassom
TERM	Ensaio de termografia infravermelha
IRT	Ensaio de resposta ao impulso
RT	Ensaio radiográfico
MFL	Ensaio de vazamento de fluxo magnético

Como resultado da avaliação mostrada na Tabela 2.4, estabelecendo como critério de pontuação, nota “1” para a avaliação ruim, “2” para intermediário e “3” para bom, classifica-se os métodos não destrutivos propostos com melhor potencial de aplicação para uso em inspeções, em ordem decrescente como IE (25 pontos), GPR (24 pontos), UT (24 pontos), TERM (23 pontos) e IRT (22 pontos), RT (17 pontos) e MFL (15 pontos).

O uso destas técnicas de forma conjunta ou complementar por um especialista, além de inspeções visuais, permite formar diagnósticos assertivos, históricos de inspeções e degradações, alimenta a elaboração de programas mais econômicos de manutenções preventivos e corretivos, diminuem o risco de intervenções emergenciais e danos graves às estruturas, além de minimizar transtornos ao proprietário e a população, como um todo. Elas podem também permitir correlações com intervenientes ambientais ou histórico de condições

climáticas, identificando locais ou situações de prioridades de reparo ou recuperação com programação de aporte financeiro e logística, caso necessário, acompanhar a evolução dos danos com sua modelagem e sua estimativa mais realística do fenômeno, dentre outros.

Com a finalidade de substanciar as análises acima com medidas quantitativas, foi realizada a avaliação dos 50 estudos encontrados na literatura internacional. Os defeitos considerados para esta avaliação, conforme descrito acima, foram delaminações, fissuras, vazios e corrosão nas armaduras de aço. O critério ou medida considerada para esta avaliação foi o número de citações de um método específico, considerado aplicável a um defeito específico. Em outras palavras, para obter uma medida quantitativa para comparação entre vários métodos de ensaios não destrutivos e sua aplicabilidade a cada tipo de defeito, os resultados da pesquisa bibliográfica foram analisados com o objetivo de encontrar o número de fontes que identificaram um método como sendo aplicável a um tipo de defeito.

As informações para cada tipo de defeito foram resumidas no Quadro 2.1. Neste quadro, a primeira coluna lista os quatro grupos de defeitos esperados. A segunda coluna lista os métodos não destrutivos reconhecidos como promissores para análises. Posteriormente, as referências bibliográficas que identificaram cada método para aplicabilidade a um determinado tipo de defeito são listadas na terceira coluna. Na quarta e quinta coluna têm-se o número total de fonte da literatura e sua porcentagem em comparação com o total de fontes citadas, respectivamente.

Quadro 2.1 - Levantamento da aplicabilidade dos métodos não destrutivos, mencionados pela literatura.

TIPO DE DEFEITO	ENSAIO	REFERÊNCIAS	Nº DE ARTIGOS	%
Delaminação ou perda de cobrimento do concreto	IE	LIN <i>et al.</i> , 2018; NO, 2002; SCOTT <i>et al.</i> , 2003; YEHA <i>et al.</i> , 2007; OH <i>et al.</i> , 2012; LIM; CAO, 2013; KRAUSE <i>et al.</i> , 2001; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2010, 2015, 2015a; ARNDT; JALINOOS, 2009; MEHRABI; FARHANGDOUST, 2019; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; ZHU <i>et al.</i> , 2008; RENS <i>et al.</i> , 2005; HUSTON <i>et al.</i> , 2011; BOGUE <i>et al.</i> , 2018.	17	34%
	GPR	SUN <i>et al.</i> , 2018; LIN <i>et al.</i> , 2018; WASHER <i>et al.</i> , 2009; MAIERHOFER, 2003; TARUSSOV <i>et al.</i> , 2013; HUSTON <i>et al.</i> , 2000; NO, 2002; SCOTT <i>et al.</i> , 2003; YEHA <i>et al.</i> , 2007; SBARTAĪ <i>et al.</i> , 2006; BÜYÜKÖZTÜRK, 1998; RHAZI, 2000, 2003; BARNES <i>et al.</i> , 2008; ALANI <i>et al.</i> , 2014; LIM; CAO, 2013; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2010, 2015, 2015a; MEHRABI; FARHANGDOUST, 2019; BUNGEY, 2004; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BELLI <i>et al.</i> , 2008; BUNGEY; GRANTHAM, 2014; ALANI <i>et al.</i> , 2013 ZHU <i>et al.</i> , 2008;	35	70%

		VAN DERWIELEN <i>et al.</i> , 2010; WASHER, 1998; HEARN; SHIM, 1998; RENS <i>et al.</i> , 2005; HUSTON <i>et al.</i> , 2011; MASER <i>et al.</i> , 1990; TOUTANJI, 2000; VAGHEFI <i>et al.</i> , 2011; XU; TURKAN, 2019.		
	UT	LIN <i>et al.</i> , 2018; LIM; CAO, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015; SHOKOUHI <i>et al.</i> , 2013; RENS <i>et al.</i> , 2005; TOUTANJI, 2000; BOGUE, 2018.	8	16%
	TERM	WASHER <i>et al.</i> , 2009; NO, 2002; SCOTT <i>et al.</i> , 2003; CHASE; WASHER, 1997 YEHIA <i>et al.</i> , 2007; OH <i>et al.</i> , 2012; RHAZI, 2000; KRAUSE <i>et al.</i> , 2001; ABDEL-QADER <i>et al.</i> , 2008; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BUNGEY; GRANTHAM, 2014; ZHU <i>et al.</i> , 2008; OMAR; NEHDI, 2017; WASHER, 1998; HEARN; SHIM, 1998; RENS <i>et al.</i> , 2005; MASER <i>et al.</i> , 1990; VAGHEFI <i>et al.</i> , 2011; CHEN <i>et al.</i> , 2019.	19	38%
	IRT	DAVIS, 2003; LIM; CAO, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BUNGEY; GRANTHAM, 2014.	4	8%
	RT	MAIERHOFER <i>et al.</i> , 2008.	1	2%
	MFL	-	0	0%
Corrosão em armaduras de aço	IE	NO, 2002; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015 ^a .	2	4%
	GPR	SUN <i>et al.</i> , 2018; LIN <i>et al.</i> , 2018; TARUSSOV <i>et al.</i> , 2013; NO, 2002; SCOTT <i>et al.</i> , 2003; SBARTAI <i>et al.</i> , 2006; BARNES <i>et al.</i> , 2008; RHAZI <i>et al.</i> , 2007; RHAZI <i>et al.</i> , 2003; ARNDT; JALINOOS, 2009; MEHRABI; FARHANGDOUST, 2019; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015; HUSTON <i>et al.</i> , 2011;	14	28%
	UT	AKHTAR, 2013; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015a.	2	4%
	TERM	SCOTT <i>et al.</i> , 2003.	1	2%
	IRT	-	0	0%
	RT	-	0	0%
	MFL	CHASE; WASHER, 1997.	1	2%
Fissuras	IE	SCOTT <i>et al.</i> , 2003; YEHIA <i>et al.</i> , 2007; AKHTAR, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015; RENS <i>et al.</i> , 2005.	6	12%
	GPR	SUN <i>et al.</i> , 2018; BARNES <i>et al.</i> , 2008; ALANI <i>et al.</i> , 2014; ALANI <i>et al.</i> , 2013; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015.	5	10%
	UT	LIN <i>et al.</i> , 2018; MAIERHOFER, 2003; NO, 2002; CHASE; WASHER, 1997; BÜYÜKÖZTÜRK, 1998; KOHL; STREICHER, 2006; MAIERHOFER <i>et al.</i> , 2008; LIM; CAO, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; ZHU <i>et al.</i> , 2008; GUCUNSKI <i>et al.</i> , 2015; SHOKOUHI <i>et al.</i> , 2013; HEARN; SHIM, 1998; RENS <i>et al.</i> , 2005; TOUTANJI, 2000.	15	30%
	TERM	LIN <i>et al.</i> , 2018; CHASE; WASHER, 1997; YEHIA <i>et al.</i> , 2007; AKHTAR, 2013;	8	16%

		REHMAN <i>et al.</i> , 2016; RENS <i>et al.</i> , 2005; VAGHEFI <i>et al.</i> , 2011; CHEN <i>et al.</i> , 2019.		
	IRT	AKHTAR, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BUNGEY; GRANTHAM, 2014.	3	6%
	RT	NO, 2002; AKHTAR, 2013.	2	4%
	MFL	KRAUSE <i>et al.</i> , 2002.	1	2%
Vazios internos	IE	LIN <i>et al.</i> , 2018; NO, 2002; CHASE; WASHER, 1997; YEHIA <i>et al.</i> , 2007; AKHTAR, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; ZHU <i>et al.</i> , 2008; RENS <i>et al.</i> , 2005; HUSTON <i>et al.</i> , 2011.	9	18%
	GPR	SUN <i>et al.</i> , 2018; LIN <i>et al.</i> , 2018; MAIERHOFER, 2003; NO, 2002; CHASE; WASHER, 1997; YEHIA <i>et al.</i> , 2007; BÜYÜKÖZTÜRK, 1998; KOHL; STREICHER, 2006; BUNGEY, 2004; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BELLI <i>et al.</i> , 2008; ZHU <i>et al.</i> , 2008; HEARN; SHIM, 1998; VAGHEFI <i>et al.</i> , 2011.	14	28%
	UT	LIN <i>et al.</i> , 2018; MAIERHOFER, 2003; NO, 2002; MAIERHOFER <i>et al.</i> , 2008; LIM; CAO, 2013; ZHU <i>et al.</i> , 2008; RENS <i>et al.</i> , 2005.	7	14%
	TERM	LIN <i>et al.</i> , 2018; NO, 2002; YEHIA <i>et al.</i> , 2007; ABDEL-QADER <i>et al.</i> , 2008; BUNGEY; GRANTHAM, 2014; AKHTAR, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; HEARN; SHIM, 1998.	8	16%
	IRT	DAVIS, 2003; AKHTAR, 2013; REHMAN <i>et al.</i> , 2016; BUNGEY; GRANTHAM, 2014.	4	8%
	RT	NO, 2002; BÜYÜKÖZTÜRK, 1998; AKHTAR, 2013; ZHU <i>et al.</i> , 2008.	4	8%
	MFL	-	0	0%

Os dados apresentados no Quadro 2.1 podem ser utilizados como um direcionador inicial aos profissionais e inspetores para seleção dos métodos de ensaios mais aplicáveis para detecção de cada tipo de dano ou defeito específico no concreto.

Para detecção de defeitos relacionados com delaminações ou deslocamento, 70% dos trabalhos estudados indicam a utilização da técnica de radar GPR para detecção. Ainda para esse tipo de defeito, a termografia infravermelha é considerada aplicável para 38% dos trabalhos estudados e o ensaio de eco de impacto para 34%. Já para a detecção de defeitos de corrosão de armaduras o ensaio de radar GPR mostrou-se com valor percentual significativo em relação aos outros métodos (28% dos trabalhos).

Para detecção de fissuras, destaca-se o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas com aplicação em 30% dos trabalhos estudados e, em segundo lugar, a termografia infravermelha com 16%. A utilização da ultrassonografia faz-se interessante para detecção de fissuras, uma vez que pode-se estabelecer correlação entre o tempo decorrido de movimentação da onda com

a profundidade da fissura em análise. Para a detecção de ninhos internos à estrutura, novamente o radar GPR mostra-se como a técnica mais aplicável, com recomendação em 28% dos trabalhos, seguido dos ensaios de eco de impacto (28%) e termografia infravermelha (16%).

Em linhas gerais, nota-se que para detecção de defeitos e falhas internas às estruturas de concreto o ensaio de radar GPR é o mais recomendado, uma vez que utiliza de pulsos elétricos de altíssima frequência (da ordem de 10 a 2500 MHz), e garante uma boa resolução por meio de sua antena dipolar transmissora. Quando se trata de defeitos superficiais, outras técnicas mais simples e que demandam menos tempo como a termografia infravermelha, ensaio de eco de impacto e ultrassonografia podem ser utilizadas e são consideradas viáveis (SULTAN; WASHER, 2018).

Gucunski *et al.* (2010) expõem que um dos problemas mais comumente encontrado em pontes é o deslocamento ou perda de cobrimento, provocado pela corrosão das armaduras. Em sua pesquisa eles reconhecem que as pesquisas em pontes com a utilização de uma única técnica não destrutiva isolada fornecem informações limitadas sobre as reais condições de deterioração da estrutura. Logo, a abordagem utilizada em sua pesquisa envolve um conjunto de tecnologias associadas, a saber, eco de impacto, ondas ultrassônicas superficiais, radar de penetração GPR e resistividade elétrica. Sua pesquisa também contou com avaliação das condições de resistência mecânica com a extração de testemunhos. Como resultado, os levantamentos GPR forneceram uma avaliação da deterioração do concreto com uma alta velocidade na coleta de dados. O ensaio de resistividade elétrica forneceu bons parâmetros para avaliar a probabilidade de corrosão e o ensaio de ultrassonografia proporcionou uma avaliação precisa dos processos de deterioração e pontos de defeitos relacionados às propriedades mecânicas.

No estudo desenvolvido por Sun, Pashoutani e Zhu (2018), foram avaliados tabuleiros de pontes de concreto por meio de dois métodos não destrutivos: um sistema de varredura acústica e o radar de penetração GPR. A partir dos resultados obtidos, pôde-se aferir que tanto a varredura acústica como o GPR fornecem informações importantes sobre as condições dos tabuleiros de pontes. Embora ambos os métodos possam detectar alguns defeitos comuns, a varredura acústica identifica principalmente delaminações superficiais, enquanto o GPR é capaz de avaliar a deterioração do concreto e a corrosão do vergalhão em estágios iniciais. Assim, os autores concluem expondo que o ensaio de GPR fornece uma detecção de falhas mais precisa em comparação com o método de varredura acústica.

Em sua pesquisa, Rehman *et al.* (2016) trazem uma RSL acerca de métodos de ensaios não destrutivos aplicáveis às inspeções de pontes de concreto. Dentre as conclusões apontadas, ressalta-se a importância dos ensaios dinâmicos, infravermelho e tecnologia de radar para estruturas não acessíveis. Também é relatado que os resultados provenientes de ensaios GPR, Eco de impacto e termografia infravermelha fornecem parâmetros bastante confiáveis para análise estrutural e os testes baseados em radiação fornecem boas informações sobre vazios e fissuras, mas os raios X, raios gama e raios de nêutrons são perigosos para o operador e a comunidade.

Com uma abordagem bem atual e tecnológica, o trabalho desenvolvido por Xu e Turkan (2019) objetivou o desenvolvimento de uma estrutura para inspeção e gerenciamento de pontes com a utilização de modelagem das informações e sistemas de veículos aéreos não tripulados de maneira integrada. Foram detectados diferentes tipos de defeitos automaticamente por algoritmos de visão computacional a partir das imagens capturadas pelos drones. A estrutura de gerenciamento também proporcionou aos inspetores e aos tomadores de decisão o acesso aos dados de inspeção de forma simultânea, aproveitando a tecnologia de computação em nuvem. Assim, a estrutura proposta pelos autores fornece uma abordagem sistemática de documentação com precisão dos dados de avaliação de condição estrutural, proporciona a redução do número de visitas ao local, evita a ocorrência de erros potenciais resultantes da transcrição de dados e permite uma abordagem mais eficiente, econômica e segura do processo de inspeção.

2.3 METODOLOGIAS/ ROTEIROS PARA INSPEÇÕES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Nos itens a seguir são apresentadas algumas metodologias e roteiros existentes na literatura nacional e internacional para inspeções e avaliações de OAE's e estruturas em concreto.

2.3.1 Metodologias internacionais

Internacionalmente, as metodologias existentes para inspeção ou roteiros de inspeção em estruturas de concreto estão geralmente relacionadas a importantes centros de pesquisa que dedicam-se ao estudo de métodos de ensaio, técnicas de inspeção e sistemáticas de monitoramento de OAE's. Em sua maioria, esses centros de pesquisa estão ligados a órgãos governamentais subordinados a departamentos de transportes que regulam e gerenciam pontes,

viadutos e passarelas do país. Também estão inseridos os centros de estudos criados em parcerias com universidades e governos. Nos parágrafos a seguir são citados alguns dos documentos e instituições encontrados na literatura de maior projeção internacional acerca do tema.

Nos Estados Unidos da América - EUA, foi produzido pela *American Association of State and Highway Transportation Officials - AASHTO*, uma importante associação voltada para o desenvolvimento dos meios de transporte rodoviários, o documento *Manual para Avaliação de Pontes* (AASHTO, 2018) que aborda os vários processos, métodos e materiais que são aplicados para manter o sistema de pontes e rodovias em funcionamento eficaz. Outro documento norte americano de relevância internacional para o tema, é o manual produzido por um grupo de pesquisa ligado ao *US Army Corps of Engineers – USACE*, cujo objetivo é fornecer orientação para inspeção e avaliação de pontes de propriedade do corpo de engenheiros do exército dos EUA (USACE, 2020).

Cabe mencionar, ainda, a *American Society of Civil Engineers - ASCE* e o *American Concrete Institute – ACI* como importantes entidades que publicam frequentemente trabalhos e boletins técnicos sobre inspeção, avaliação e recuperação de estruturas em concreto armado. Como exemplo têm-se o *Guide to Maintenance of Concrete Bridge Members* (ACI, 2016) produzido pelo Comitê nº 345 do ACI e aborda os problemas típicos e técnicas de manutenção de baixo custo para pontes rodoviárias e seus elementos, fornecendo orientações de inspeção e reparos para engenheiros e suas equipes de manutenção. Cabe destacar também o documento ACI 228.2R (ACI, 2013), em que é apresentada uma revisão de métodos de ensaios não destrutivos (END) para avaliação da condição de armaduras de concreto e aço em estruturas.

Na Europa, a *Fédération Internationale du Béton – FIB*, que possui importantes publicações relacionadas a inspeções e avaliação da durabilidade de estruturas em concreto de maneira geral, desenvolveu o documento técnico intitulado *Model Code 2010* (FIB, 2012), que inclui todo o ciclo de vida de uma estrutura de concreto, desde o projeto, construção e etapas de conservação (avaliação, manutenção e reforço).

Ademais, nota-se que a maioria das pesquisas desenvolvidas procuram identificar os danos em estruturas de forma mais global e, em muitos casos com a utilização de ensaios não destrutivos, em função da disponibilidade de tecnologia empregada, características geométricas e do

material da estrutura em análise, assim como da tipologia dos danos potencialmente detectáveis (MEHRABI; FARHANGDOUST, 2018).

Acerca da seleção de métodos de ensaios, o *Strategic Highway Research Program* (FHWA, 2017) expõe uma tabela que associa os ensaios recomendados para cada situação de problema detectado na obra. Os ensaios propostos variam desde avaliação da resistência do concreto até mapeamento de fissuras e deslocamento do concreto. Já o documento da ACI 228.2R (ACI, 2013) apresenta uma classificação mais abrangente acerca na diversidade e aplicação de métodos não destrutivos para inspeção de estruturas em concreto e assim como o documento anterior também apresenta tabelas que orientam o inspetor na seleção de métodos de ensaios para diagnóstico de determinadas manifestações patológicas. A norma brasileira NBR 9452 (ABNT, 2019a) e o manual da AASHTO mencionam brevemente a possibilidade de realização de ensaios adicionais à inspeção visual, porém não aprofundam quanto ao uso das técnicas. Apenas fazem uma breve referência de alguns ensaios possíveis.

Em relação aos critérios de amostragem, a ASCE propõe critérios de amostragem com base em um volume ou área dos elementos a serem analisados. Assim, têm-se uma quantidade mínima de coleta de amostras a ser realizada por unidade de área ou volume. Estes critérios baseiam-se na composição de lotes por tipos de elementos e volumes executados, realizado de maneira análoga ao controle tecnológico apresentado pela NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento (ABNT, 2022). Por um lado, os critérios estabelecidos oferecem a vantagem de fixar uma quantidade mínima de medidas a serem realizadas, garantindo representatividade e confiabilidade. Mas em outras situações podem ser insuficientes para determinar o que se pretende medir.

Ainda com relação aos critérios de amostragem, o ACI 228.2R (ACI, 2013) ilustra particularmente dois critérios para amostragem com a utilização de ensaios não destrutivos. O primeiro, que apresenta cunho estatístico, fundamenta-se no erro máximo admissível e amostragem aleatória. O segundo critério prevê a formação de lotes e, a partir disso, selecionam as amostras a serem ensaiadas. O documento cita também que na situação de mapear defeitos ocultos no interior do concreto, o controle estatístico de amostragem pode ser adaptado para que possa se formar uma malha de mapeamento superficial nos elementos a serem analisados. Já a norma brasileira NBR 9452 (ABNT, 2019a) e o documento DNIT 010 (DNIT, 2014) não definem as condições de amostragem para a realização dos ensaios.

Com relação aos elementos a serem vistoriados durante a inspeção, a norma NBR 9452 (ABNT, 2019a) e o manual da AASHTO expõem uma listagem sistemática com todos os elementos inspecionados e os problemas típicos a serem verificados. Por sua vez, o manual da AASHTO apresenta um breve roteiro de como e o que verificar em uma inspeção visual detalhada em cada parte da estrutura, em que são considerados os problemas mais comuns das OAE's. Assim, fica sob responsabilidade do engenheiro inspetor julgar qual verificação melhor se ajusta para o propósito de sua inspeção.

Cabe ressaltar também que algumas metodologias de inspeção existentes já dispõem de fichas de inspeção formatadas e que conseguem atender a maioria dos casos de OAE's em cada tipo de inspeção. Esse é o caso da maioria das normas e manuais brasileiros verificados como a NBR 9452 (ABNT, 2019a), DNIT 010 (DNIT, 2004) e a resolução ARTESP ET-C21/002 (ARTESP, 2007). Os manuais e normas internacionais consultados (europeus e norte-americanos) não apresentam uma ficha de inspeção pré-formatada, porém listam fatores a serem observados, verificados e medidos. Apesar disso, o FHWA e a AASHTO fazem referência em suas publicações do *National Bridge Inspection Standards* (NBIS) que padroniza os relatórios de inspeção de OAE's.

Do ponto de vista de registro dos elementos analisados, a norma brasileira recomenda a realização de registro fotográfico com quantidade mínima de fotos em cada tipo de inspeção. Também é necessário que seja realizado o registro fotográfico das manifestações patológicas verificadas. As normas internacionais seguem, de maneira análoga, o mesmo critério.

2.3.2 Metodologia proposta pela NBR 9452 (ABNT, 2019a)

A NBR 9452 - inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – procedimento (ABNT, 2019a) determina o roteiro para execução de inspeções em estruturas de pontes, viadutos e passarelas de concreto. A primeira versão da norma brasileira proveu a base normativa para dois importantes documentos técnicos para inspeção de pontes no Brasil: a norma DNIT 010 (DNIT, 2004) e a resolução ARTESP ET-C21/002 (ARTESP, 2007). Esses documentos técnicos acrescentaram aos procedimentos da primeira versão da norma brasileira algumas considerações que ocasionaram ao maior emprego deles em relação à outra (CRUZ *et al.*, 2017). Em sua última versão, a NBR 9452 (ABNT, 2019a) objetivou a atualização de seus procedimentos, baseando-se também em bibliografias contemporâneas. Assim, de acordo com Simões, Rodrigues e Pinheiro (2021), a partir de sua última revisão em 2019, a norma tornou-

se o documento de aplicação mais abrangente no território nacional para avaliação de OAE's, devido ao acréscimo e aprimoramento dos conceitos agregados das normas DNIT e ARTESP.

Quanto aos tipos de inspeção, a NBR 9452 (ABNT, 2019a) as classifica como: inspeção cadastral, inspeção rotineira, inspeção especial e inspeção extraordinária. Estas inspeções são peças fundamentais para uma gestão adequada das operações de manutenção, com a ressalva de que, na avaliação de OAE's, os dados coletados em inspeções anteriores são muito importantes e devem sempre ser considerados em uma análise global (ALMEIDA, 2013). A inspeção cadastral é a realizada no imediato uso da Obras de Arte Especiais – OAE's, logo após findar sua execução ou instalação. Também deve ser realizada quando houver alteração na configuração da estrutura, como alterações de uso, acréscimos, reforço ou mudança no sistema estrutural. Ela deve contemplar o registro de todas as informações gerais do contexto em que a obra está inserida, assim como a coleta de documentos e informes construtivos, como dados de projeto, desenhos, memoriais, registros da execução da obra, termo de recebimento de obra, registro de monitoramento da estrutura e demais itens como eventuais alagamentos, reforços, reparos, recuperações e também registro fotográfico de caracterização da estrutura (mínimo 8 fotos), desenhos esquemáticos, classificação da OAE de acordo com parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade e demais informações complementares importantes para a inspeção.

Já a inspeção rotineira é a de acompanhamento periódico da estrutura. Pode ser realizada apenas visualmente, com ou sem auxílio de equipamentos. Deve ser realizada no prazo máximo de um ano e deve ser verificada a evolução das anomalias ou manifestações patológicas identificadas em inspeções anteriores, assim como novas ocorrências. A norma orienta que deve conter uma introdução contendo informações básicas, como rodovia e trecho inspecionado, classificação da OAE, comentários quanto a eventuais alterações do estado geral da OAE em relação às inspeções anteriores, ficha de inspeção com registro de anomalias, registro fotográfico e demais informações que forem consideradas importantes. Em contrapartida, a inspeção especial deve ser realizada com uma periodicidade de cinco anos, podendo ser postergada para oito anos caso a obra seja classificada com intervenção de longo prazo (notas 4 e 5 na sua classificação). Também pode ser realizada quando têm-se acesso a todos os elementos constituintes durante a inspeção rotineira. Essa inspeção deve mapear e quantificar as anomalias de todos os elementos estruturais aparentes ou acessíveis da OAE, a fim de subsidiar o diagnóstico de problemas patológicos e o prognóstico da estrutura em face desses problemas. Antecipa-se a realização da inspeção especial quando a inspeção anterior indicar uma intervenção em curto prazo (notas de

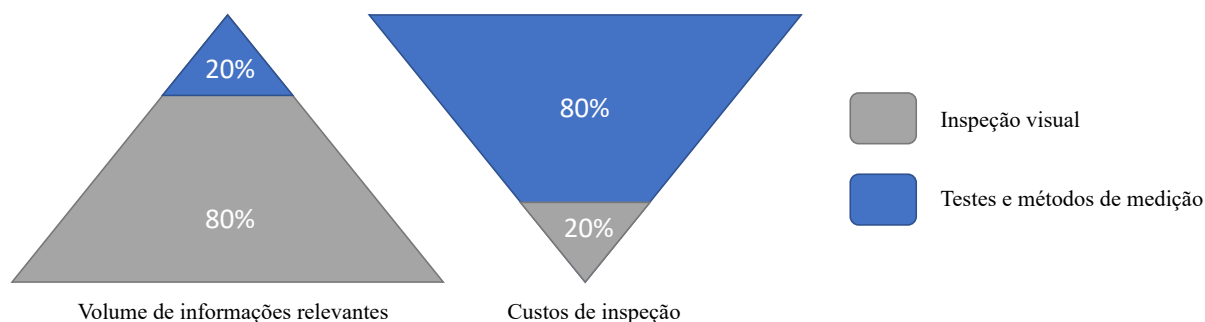
classificação 1 e 2) ou quando forem previstas adequações de grande porte na estrutura como alargamentos, prolongamentos ou reforços, conforme esclarece a NBR 9452 (ABNT, 2019a).

Por fim, a inspeção extraordinária é aquela promovida, a partir de demandas não programadas. É realizada quando há a necessidade de avaliar com mais critério um elemento ou parte da OAE, quando houver ocorrência de impacto de veículos, trens ou embarcações ou até mesmo em eventos de origem natural como inundações, vendavais, sismos etc. A inspeção extraordinária exige relatório específico e inclui a utilização de equipamentos especiais para sua realização (ABNT, 2019a).

Em suma, a metodologia proposta pela NBR 9452 inicia-se com uma inspeção visual e pode ou não contar com o uso de equipamentos especiais, ao seu final. A principal vantagem da predominância da inspeção visual nas operações de manutenção é a sua ótima relação custo/informação (FIB, 2002), pois é possível obter com certa facilidade uma perspectiva global das condições da estrutura, assim como mapear a evolução dos danos identificados em inspeções anteriores.

A Figura 2.22 apresenta a relação de custos com resultados obtidos a partir das inspeções visuais. Nota-se que 80% das informações relevantes são obtidas com apenas 20% dos custos de inspeção. O restante do custo (80%) é normalmente atribuído à realização de ensaios e testes especiais, quando necessário. Menciona-se que essa estimativa é, portanto, geral e não especifica um tipo de obra de arte.

Figura 2.22 - Relação entre custo e informações relevantes na Inspeção Visual. (Adaptado de FIB, 2002)



Cabe ressaltar, porém, que há uma variável significativa nas inspeções visuais: o inspetor. Não é incomum que haja diferentes interpretações de dados obtidos em vistorias de um mesmo elemento, quando diferentes avaliadores participam da análise. A NBR 9452 (ABNT, 2019a) destaca que as OAE's devem ser classificadas de acordo com as condições dos elementos, baseando-se na gravidade dos problemas detectados, seguindo parâmetros estruturais, de

funcionais e de durabilidade. Os parâmetros estruturais referem-se à segurança estrutural e à capacidade portante da OAE. Em situações em que a obra apresente sintomatologia visualmente detectável de anomalias associadas ao desempenho estrutural, é natural e recomendável que o parâmetro estrutural seja objeto de maior atenção. Com relação aos parâmetros funcionais, é avaliado se a obra atende aos fins para os quais se destina. Neste contexto, a obra deve atender aos parâmetros geométricos e propiciar segurança e habitabilidade aos usuários durante a sua utilização (incluindo atendimento aos requisitos de conforto ambiental: desempenhos acústico, térmico e lumínico). Quanto aos parâmetros de durabilidade relacionam-se diretamente à vida útil das OAEs e referem-se à sua resistência contra os ataques de agentes ambientais agressivos. Por exemplo, têm-se as anomalias relacionadas à insuficiência de cobrimento da armadura, corrosão, fissuração, deformação excessiva, processos de retração do concreto, entre outras.

Os critérios de avaliação da condição da OAEs relatados pela NBR 9452 (ABNT, 2019a) consistem na associação de sua condição (excelente, boa, regular, ruim ou crítica) a uma nota que varia de 1 a 5, refletindo a maior ou menor gravidade dos problemas detectados, levando-se em conta os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade, conforme apresenta o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Classificação da condição da OAE (Adaptado de ABNT NBR 9452, 2019a).

Nota de classificação	Condição	Caracterização estrutural	Caracterização funcional da OAE	Caracterização de durabilidade da OAE
5	Excelente	A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados	Apresenta segurança e conforto aos usuários	Apresenta-se em perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	A estrutura apresenta danos pequenos em algumas áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	Apresenta danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	Apresenta pequenas e poucas anomalias que comprometem sua vida útil em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que podem ocasionar alguma deficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos	Apresenta desconforto ao usuário com defeitos que requerem ações de médio prazo.	Apresenta pequenas e poucas anomalias que comprometem sua vida útil em região de moderada a alta agressividade ambiental ou a OAE apresenta moderadas e

		problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.		muitas anomalias que comprometem sua vida útil em região de baixa agressividade ambiental.
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo.	Funcionalidade visivelmente comprometida com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	Apresenta anomalias moderadas a abundantes, que comprometam sua vida útil em região de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	Há danos que promovem grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita de intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramento provisório e associada instrumentação ou não.	Não apresenta condições funcionais de utilização.	Encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

A nota final da estrutura deve ser a menor atribuída ao parâmetro analisado. E a classificação final deve ser apresentada, conforme o modelo apresentado na Tabela 2.5, por componente estrutural, seguindo uma classificação para cada um dos parâmetros (estrutural, funcional e de durabilidade).

Tabela 2.5 - Modelo de ficha de classificação da OAE (Adaptado de ABNT NBR 9452, 2019a)

Parâmetro	Elementos						Pista	Nota Final
	Super estrutura	Meso estrutura	Infra estrutura	Elementos complementares				
				Estrutura	Encontro			
Estrutural								
Funcional		Não se aplica	Não se aplica					
Durabilidade								

Vale ressaltar que em situações de inspeções relacionadas em sistemas prediais têm-se outras normas de referência, como a NBR 16747 – Inspeção predial - diretrizes, conceitos,

terminologia e procedimento (ABNT, 2020) que fornecem diretrizes, conceitos e procedimentos relativos à inspeção predial com a finalidade de uniformizar as metodologias e estabelecer os critérios mínimos para a atividade de inspeção. Já com relação aos procedimentos inerentes ao sistema de gestão de manutenção em edificações, têm-se a NBR 5674 – manutenção de edificações – requisitos para o sistema de gestão de manutenção (ABNT, 2012).

Outro importante documento nacional relacionado com as ações de durabilidade e manutenção de sistemas das edificações é a NBR 14037 – diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações - requisitos para elaboração e apresentação os conteúdos (ABNT, 2011), cujo objetivo é estabelecer o conteúdo mínimo a ser incluído no manual de uso, operação e manutenção das edificações.

2.3.3 Metodologia GDE/UnB

A metodologia GDE/UnB é um dos métodos mais empregados no Brasil para verificação da condição de estruturas em concreto, tornando-se assim uma importante ferramenta para a proposição de planos de manutenção. Essa metodologia teve como ponto de partida a metodologia desenvolvida por Klein *et al.* (1991)) e vêm evoluindo por meio dos estudos de Castro (1994);, Lopes (1998), Boldo (2002), Fonseca (2007), Euqeres (2011), Rosa (2014), Verly (2015) e Lauria (2018).

Em sua versão inicial, proposta por Castro (1994), a metodologia foi aplicada em duas edificações de diferentes ocupações. Mais tarde, em 1998, a metodologia foi adaptada e utilizada em seis prédios comerciais do Banco do Brasil S.A. na pesquisa de Lopes (1998); em quarenta edificações do Exército Brasileiro por Boldo (2002); nas edificações do ICC-UnB por Fonseca (2007). Em sequência foi adaptada para utilização em inspeção de pontes do estado de Goiás por Euqeres (2011) e de OAEs do Distrito Federal por Verly (2015). Lauria (2018), por sua vez, aplicou a metodologia GDE/UnB na avaliação de 24 viadutos da cidade de Brasília.

Castro (1994) elaborou em sua pesquisa, um documento intitulado “Caderno de Inspeções para Estruturas de Concreto”, que contém uma relação dos danos de maior incidência associados a cada família de elementos e as recomendações para a definição dos valores dos fatores intensidade do dano (F_i).

Lopes (1998) utilizou esse caderno em sua pesquisa que visava a complementação do sistema de vistoria predial adotado pelo Banco do Brasil S.A. O autor propôs algumas modificações na

metodologia original com o objetivo de aumentar a abrangência do método e facilitar a sua aplicação. As principais modificações apresentadas foram: a retirada da família de juntas de dilatação; a alteração na relação de danos dos quesitos identificados como recalques e deslocamentos da estrutura; a mudança do dano de corrosão; a inserção de novos danos como fluência, sobrecarga e agressão ambiental.

Boldo (2002) atualizou o antigo “Caderno de Inspeções para Estruturas de Concreto”, mudando seu nome para “Roteiro de Inspeção para Estruturas de Concreto”, reforçando a importância do uso em rigor do documento nas inspeções. Seu trabalho consistiu na avaliação da deterioração estrutural de 40 edificações de propriedade do exército brasileiro. As modificações agregadas ao roteiro foram sugeridas com o objetivo de torná-lo um documento com informações suficientes para execução de vistorias sem consultas a outros documentos.

Em sua pesquisa, Fonseca (2007) apresentou uma adaptação ao documento sugerindo alguns pontos para o aperfeiçoamento da metodologia GDE/UnB. A conceituação dos danos relacionados à contaminação por cloretos, carbonatação e cobrimento foram alteradas no Roteiro de Inspeção, de modo a avaliar o dano relacionado à corrosão de armaduras. Além disso, devido a atualização em 2003 da NBR 6118 (ABNT, 2003), os conceitos relacionados a cobrimento, fissuração e flecha foram modificados. Adicionalmente, Fonseca (2007) também apresentou uma adaptação nas fórmulas de cálculo do grau de deterioração da família (G_{df}) e do grau do dano (G_d), de modo a melhor representar a situação real da estrutura, uma vez que o equacionamento existente supervalorizava o estado de um elemento crítico.

Análogo aos demais, Euqeres (2011) aplicou a metodologia GDE/UnB considerando as últimas adaptações propostas por Fonseca (2007), mas adequando às particularidades das estruturas de pontes. Em função da modificação dos elementos estruturais em relação a aplicação em edifícios convencionais, realizou-se a adaptação dos danos e seus respectivos fatores de ponderação. Assim, em sua pesquisa, Euqeres (2011), modificou a classificação dos níveis de deterioração estrutural, assim como os prazos para intervenções relativas à manutenção, em função da natureza dos elementos analisados (estruturas de pontes). O novo roteiro de inspeções aplicado à pontes recebeu a denominação “Roteiro de Inspeções para Estruturas e Pontes de Concreto Armado”, e assim também foi utilizado por Verly (2015).

Verly (2015), por sua vez, comparou a metodologia GDE/UnB adaptada de Euqeres, com a metodologia SGO/DNIT, na caracterização estrutural de 22 Obras de Arte Especiais (OAEs)

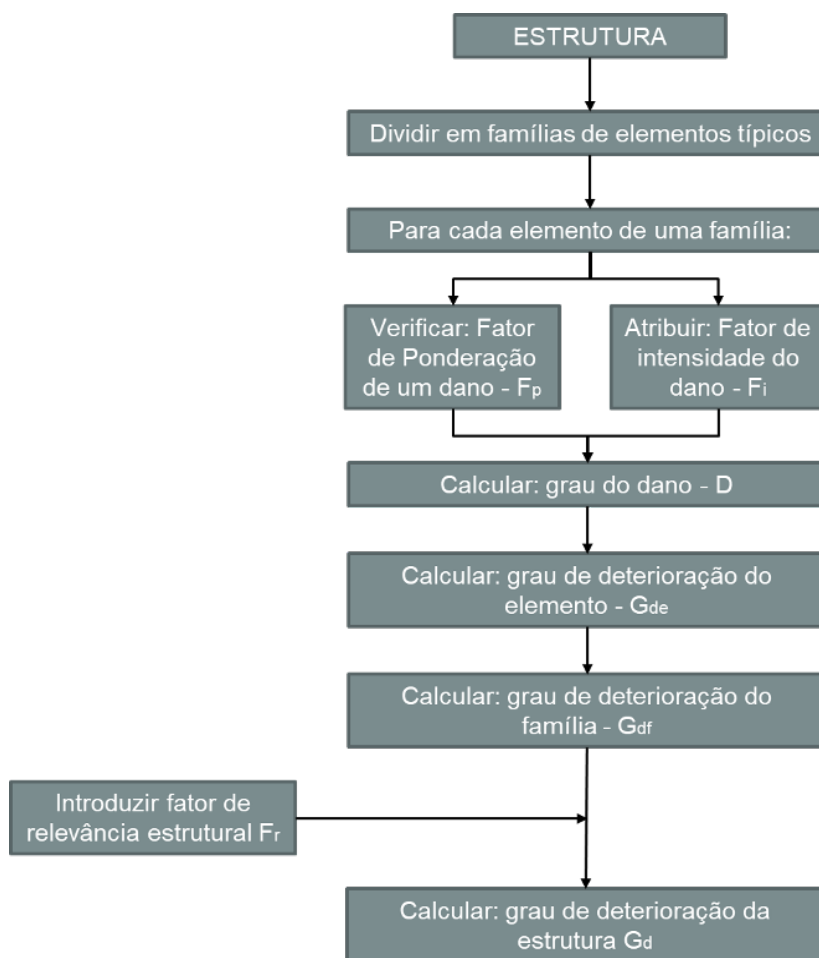
da cidade de Brasília e realizou as devidas alterações para as singularidades das estruturas de viadutos. Em seu trabalho, Verly (2015) propôs algumas adaptações à formulação do grau de deterioração da estrutura (G_d), e apresentou tabelas para classificação para Fatores de intensidade (F_i), de modo a favorecer a aplicação da metodologia pelo responsável técnico pela inspeção. Após as contribuições advindas de seu trabalho, intitulou o “Roteiro de Inspeções para Estruturas e Pontes de Concreto Armado” trazido por Euqeres (2011) como “Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB em OAEs”, sendo o material mais utilizado em inspeções de OAEs até os dias atuais.

Um importante estudo também foi realizado por Rosa (2014) em que apresentou uma comparação entre a aplicação da metodologia GDE/UnB com a metodologia DNIT. A partir dos resultados, Rosa (2014) constatou a diferença no conceito de aplicação dessas duas metodologias. Enquanto a metodologia GDE/UnB têm foco avaliação do grau de deterioração estrutural, a metodologia DNIT avalia as condições estabilidade estrutural, com base em elementos padronizados. Revelando assim, o caráter mais conservador, segundo o autor, da metodologia GDE/UnB em relação às condições da estrutura.

O trabalho de Lauria (2018) consistiu na aplicação das últimas versões da metodologia GDE/UnB na avaliação de 24 viadutos da cidade de Brasília. Entre as considerações propostas por Lauria (2018), cabem ressaltar a proposição da adição da abrasão do concreto na ficha de inspeção. A justificativa para inserção do referido dano vale-se da natureza do uso dos elementos estruturais analisados (viadutos) e da recorrência de abalos e arrastos no tabuleiro causado pelo tráfego de veículos.

A metodologia GDE/UnB tem como objetivo a quantificação do grau de deterioração de uma estrutura de concreto. Essa metodologia leva em consideração parâmetros de análise de elementos isolados para a família desses elementos e, por fim, para estrutura como um todo. O fluxograma apresentado na Figura 2.23, traduz as etapas de aplicação da metodologia GDE/UnB, concebido por Castro (1994) e adaptado de acordo com a evolução do método.

Figura 2.23 - Fluxograma da aplicação da Metodologia GDE/UnB (Adaptado de CASTRO, 1994).



a) Fator de Ponderação do Dano (F_p)

O fator de ponderação de um dano considera o provável grau de comprometimento estrutural ou desempenho causado por manifestações patológicas identificadas no elemento de uma mesma família. Em sua definição são considerados os problemas mais relevantes quanto aos aspectos de durabilidade e segurança estrutural. Assim, para cada problema identificado, em função da família do elemento analisado, é atribuído uma nota, de 1 a 5, conforme exemplifica a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Exemplos de Fatores de Ponderação (F_p) para famílias de elementos estruturais - pilares. (Adaptado de VERLY, 2015)

Nome do elemento:	
Local:	
Danos	F_p
Carbonatação do concreto	3
Cobrimento deficiente	3
Contaminação por cloretos	4
Corrosão de armaduras	5

Desagregação	3
Desplacamento	3
Desvio de geometria	4
Eflorescência	2
Falha de concretagem	3
Fissuras	2 a 5
Manchas	3
Recalque	5
Sinais de esmagamento	5
Umidade excessiva na infraestrutura	4

b) Fator de intensidade do dano (F_i)

Ao contrário do F_p , o fator de intensidade (F_i) não considera a família do elemento estrutural, mas sim à classificação do dano existente quanto à sua gravidade, sendo atribuída uma nota que varia de 0 a 4, progredindo de acordo com a gravidade do dano, onde 0 é o valor atribuído para o elemento que não apresenta lesão e 4 o valor atribuído ao elemento em estado crítico.

Devido a subjetividade dessa escala, Castro (1994) propõe uma tabela com exemplificações da classificação de intensidade dos danos em função dos tipos de danos para guiar o profissional inspetor. A Tabela 2.7 apresenta alguns exemplos de classificação de F_i de acordo com Castro (1994).

Tabela 2.7 - Exemplos de Fatores de Intensidade (F_i) para famílias de elementos estruturais (Adaptado de VERLY, 2015)

Tipos de danos	Valores do Fator de Intensidade do Dano - F_i
Flechas	1: não perceptíveis a olho nu
	2: perceptíveis a olho nu, dentro dos limites previstos na norma
	3: superiores em até 40% às previstas na norma
	4: excessivas
Infiltração de água	1: indícios de umidade.
	2: pequenas manchas.
	3: grandes manchas.
	4: generalizada.
Recalques	2: indícios de recalque pelas características das trincas na alvenaria.
	3: recalque estabilizado com fissuras em peças estruturais.
	4: recalque não estabilizado com fissuras em peças estruturais.

Na determinação de F_i devem ser considerados os apontamentos realizados por observação visual, abrangendo desde testes simples até análises do ambiente onde o dano é identificado (VERLY, 2015).

c) Grau do Dano (D)

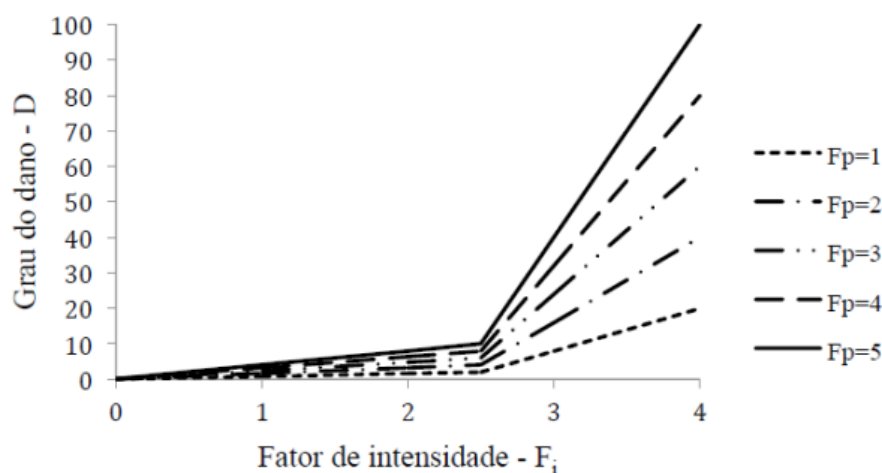
O grau do dano é definido na metodologia a partir de uma analogia ao modelo proposto por Tuuti (1982) em que é retratado a evolução da deterioração do concreto ao longo do tempo, inicialmente pensado para o processo de corrosão das armaduras, mas que pode representar a deterioração da estrutura de uma forma geral, pois descreve a progressão da deterioração no interior da estrutura de concreto (CASTRO, 1994).

Análogo ao modelo de Tuuti (1982), o processo de deterioração pode ser dividido em duas fases, a saber:

- fase de iniciação: período em que pouco ou nenhum dano é apresentado, porém a deterioração encontra-se ativada em função dos ação dos agentes agressivos do meio. Nessa fase não há sinais de comprometimento da estrutura e muito menos necessidade de intervenção (CASTRO, 1994; VERLY, 2015)
- fase de propagação: intervalo compreendido entre o processo de desenvolvimento e propagação dos danos para o interior da estrutura. A velocidade de degradação é aumentada, exigindo ações de intervenção imediata para correção (CASTRO, 1994).

A Figura 2.24 exibe o ponto de inflexão em que ocorre a divisão entre as fases de iniciação e propagação da deterioração.

Figura 2.24 - Formulação do grau do dano (D) (VERLY, 2015)



O valor de D é determinado a partir das equações 2.1 e 2.2:

$$D = 0,8 * Fi * Fp \quad (\text{para } Fi \leq 2,0) \quad (2.1)$$

$$D = (12 * Fi - 28) * Fp \quad (\text{para } Fi > 2,0) \quad (2.2)$$

d) Grau de deterioração do elemento (G_{de})

Com base no grau de cada dano isolado obtido, realiza-se a análise de todos os danos existentes no elemento por meio do cálculo do grau de deterioração do elemento (G_{de}), conforme equação 2.3.

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^n D_i) - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right] \quad (2.3)$$

Onde:

G_{de} : Grau de deterioração do elemento;

D_i : Grau de dano de índice “i”;

$D_{m\acute{a}x}$: Maior grau do dano encontrado no elemento;

n: Número de danos encontrados no elemento.

Assim, conforme é mostrado na Tabela 2.8 para cada valor de G_{de} obtido, o elemento é classificado em cinco níveis de deterioração. Também é acompanhado das ações recomendadas, de acordo com a classificação.

Tabela 2.8 - Classificação dos níveis de deterioração do elemento (Adaptado de VERLY, 2015).

Nível de deterioração	G_{de}	Ações recomendadas
Baixo	0 – 15	Estado aceitável Manutenção preventiva
Médio	15 – 50	Definir prazo e natureza de nova inspeção Planejar intervenção em longo prazo (máx. 2 anos)
Alto	50 – 80	Definir prazo para inspeção especializada Planejar intervenção em médio prazo (máx. 1 ano)
Sofrível	80 – 100	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa Planejar intervenção em curto prazo (máx. 6 meses)
Crítico	> 100	Inspeção realizada imediata e medidas emergenciais (alívio de cargas, escoramento, etc.) Planejar intervenção imediata.

e) Grau de deterioração da família de elementos (G_{df})

Na etapa de avaliação do grau de deterioração da família dos elementos, utiliza-se os valores de G_{de} obtidos para cada elemento anteriormente e é obtido a partir da Equação 2.4.

$$G_{df} = G_{de,máx} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^m G_{de,i}) - G_{de,máx}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right] \quad (2.4)$$

Onde:

$G_{de,max}$: Maior grau de deterioração encontrado em uma família de elementos.

$G_{de,i}$: Grau de deterioração dos elementos da família.

m : Número de dados encontrados na família.

Cabe ressaltar que na formulação proposta por Castro (1994) são utilizados no cálculo de G_{df} apenas valores de G_{de} iguais ou superiores a 15. Na adaptação realizada por Euqeres (2011), é considerado que todos os valores de G_{de} maiores que zero devem ser analisados e incluídos no cálculo de G_{df} . O intuito é fazer que todos os elementos da estrutura influenciem na avaliação global da estrutura.

f) Fator de relevância estrutural (F_r)

O fator de relevância estrutural tem a finalidade de definir o grau de importância relativa das famílias de elementos no comportamento e desempenho da estrutura como um todo. Os fatores de relevância trazidos por Castro (1994) são mostrados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Fatores de relevância estrutural (F_r) (Adaptado de CASTRO, 1994).

Família de elementos	Fr
Elementos de composição arquitetônica	1,0
Reservatório superior	2,0
Escadas/Rampas, Reservatório inferior, Cortinas, Lajes secundárias	3,0
Lajes, Fundações, Vigas secundárias, Pilares secundários	4,0
Vigas e Pilares principais	5,0

g) Grau de deterioração da estrutura (G_d)

O cálculo do grau de deterioração da estrutura é a última etapa de aplicação da metodologia GDE/UnB. Uma vez calculado o valor de G_d , a partir da Equação 2.5, classifica-se o nível de deterioração da estrutura conforme a Tabela 2.10.

$$G_d = \frac{K_{m\acute{a}x}}{7,07} \left[1 + \frac{(\sum_{i=1}^k K_i) - K_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^k G_i} \right] \quad (2.5)$$

Onde:

k: Número de famílias da estrutura;

K: Produto do G_{df} pelo respectivo F_r ;

$K_{m\acute{a}x}$: Maior valor do produto do G_{df} pelo respectivo F_r .

Tabela 2.10 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura e ações recomendadas (Adaptado de VERLY, 2015).

Nível de deterioração	G_d	Medidas a serem adotadas
Baixo	0 – 15	Estado aceitável Manutenção preventiva
Médio	15 – 50	Definir prazo e natureza de nova inspeção Planejar intervenção em longo prazo (máx. 2 anos)
Alto	50 – 80	Definir prazo para inspeção especializada Planejar intervenção em médio prazo (máx. 1 meses)
Sofrível	80 – 100	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa Planejar intervenção em curto prazo (máx. 6 meses)
Crítico	> 100	Inspeção realizada imediata e medidas emergenciais (alívio de cargas, escoramento, etc.) Planejar intervenção imediata.

2.4 COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo abordou aspectos relevantes relacionados à engenharia diagnóstica, sobretudo aplicáveis às inspeções de estruturas em concreto, em que puderam ser apresentadas técnicas e ensaios não destrutivos para aplicação em campo, assim como equipamentos, princípios básicos, normatização existente, aplicações e limitações. Neste sentido, a partir da RSL apresentada, pôde-se contribuir com dados bibliométricos e dados de engenharia sobre o uso de

ensaios não destrutivos e sua relação com a indicação confiável, baseado na percepção dos autores consultados, na detecção de danos e defeitos mais recorrentes em estruturas de concreto. Assim, destaca-se o quanto a ferramenta de RSL pode apresentar-se como uma ferramenta útil de análise e delineamento da pesquisa, uma vez que proporciona o agrupamento, a organização e a posterior avaliação de informações técnicas disponíveis, a partir de pesquisas já realizadas, em sequência, a consolidação desse conhecimento. No presente capítulo também foi apresentada uma síntese das principais metodologias e roteiros de vistoria e inspeção em obras e edificações, a nível nacional e internacional existentes, e notou-se que as metodologias internacionais existentes para inspeção em estruturas de concreto estão geralmente relacionadas aos centros de pesquisa e órgãos governamentais que dedicam-se ao estudo de métodos de ensaio, técnicas de inspeção e sistemáticas de monitoramento de OAE's. Nacionalmente, destacam-se duas metodologias principais, mais comumente utilizadas para inspeções de estruturas de concreto: a metodologia proposta pela NBR 9452 (ABNT, 2019a), aplicável à OAE's, e que parte de uma simples inspeção visual e pode ou não contar com o uso de equipamentos especiais, a depender do tipo e nível de inspeção; e a GDE/UNB que tem como objetivo a quantificação do grau de deterioração de uma estrutura de concreto, levando em consideração parâmetros de análise individuais de cada elemento estrutural isoladamente, na sequência a análise da deterioração de um grupo de elementos (famílias) e, por fim, a avaliação da estrutura como um todo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o delineamento da pesquisa: as variáveis da pesquisa, a metodologia empregada, os concretos estudados, as idades de análise, ensaios realizados e corpos de prova adotados. Dessa forma, ele foi dividido em três macro etapas, sendo a primeira etapa de caracterização básica dos materiais e dos concretos C25 e C45 por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, nas condições de cura seca ao ar e úmida, bem como as curvas de correlação entre os métodos selecionados. Adiante, a segunda etapa foi de verificar a potencialidade do uso das técnicas não destrutivas na identificação dos defeitos de fissuração, vazios internos, diferença de densidade e delaminações nos dois concretos. Em uma terceira etapa, foi proposta uma metodologia de inspeção aplicável às grandes obras de infraestrutura, baseada na detecção de danos e com a utilização dos métodos não destrutivos tradicionais, como esclerometria e ultrassom, e métodos contemporâneos como tomografia ultrassônica e radar GPR.

Menciona-se que o programa experimental foi realizado no LABITECC – Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, situado na EECA – UFG. As variáveis da pesquisa foram: a classe de resistência de concretos com finalidade estrutural e a condição de cura dos concretos. Assim, nas classes de resistência mecânica à compressão característica (F_{ck}^2) de concretos comerciais na idade de 28 dias, foram escolhidas C45 MPa e C25 MPa, conforme NBR 8953 (ABNT, 2015). Além disso, a cura em câmara úmida (em câmara climatizada com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 95%) e cura ao ar em ambiente de laboratório (com temperatura de aproximadamente $28 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 50%) também foram estudadas.

Além disso, com a finalidade de reduzir fontes de variabilidade que poderiam impactar na leitura e interpretação dos resultados, foram fixados: a classe de abatimento S-160 - abatimento maior que 160 mm e menor que 220 mm, conforme NBR 8953 (ABNT, 2015), o consumo de agregados por metro cúbico de concreto (variando o consumo de cimento e a relação água/cimento dos concretos).

² F_{ck} - resistência característica do concreto à compressão.

Menciona-se também que a presente pesquisa caracteriza-se por ser do tipo aplicada, pois objetiva produzir conhecimentos para aplicações práticas com objetivo de solucionar problemas específicos e de abordagem quali-quantitativa para aliar a explicação de um fenômeno, utilizando-se de números para subsidiar análises. Quanto aos seus objetivos, a pesquisa pode ser considerada como exploratória, pois tem foco em proporcionar uma maior familiaridade com a questão-problema. Por fim, quanto aos procedimentos metodológicos, pode ser classificada como de natureza experimental (GIL, 1994).

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos itens seguintes são descritas as etapas do programa experimental que se dividiu em caracterização dos materiais; proporcionamento, produção, moldagem e cura dos concretos, corpos de prova, caracterização básica dos concretos nos estados fresco e endurecido e os métodos de ensaios não destrutivos, utilizados na pesquisa.

3.1.1 Materiais

Para produção dos concretos do estudo, foram utilizados materiais disponíveis na região metropolitana de Goiânia-GO, a saber: cimento CP II - F 40, agregados miúdo e graúdo, aditivo químico superplastificante e água potável, proveniente de concessionária local. Toda a caracterização dos materiais foi realizada pelos laboratórios de ELETROBRAS Furnas.

3.1.1.1 Cimento

O cimento CP II-F 40 foi escolhido em função da disponibilidade local e os resultados de caracterização química e físico-mecânica estão apresentados nas Tabela 3.1 e Quadro 3.1.

Tabela 3.1 - Resultados de caracterização física e mecânica do cimento CP II F-40 utilizado.

Norma	Título do Ensaio	Referência / unidade	Resultado	Limites NBR 16.697/2018
NBR 16606 (ABNT, 2018) e NBR 16607 (ABNT, 2017)	Água de consistência - Pasta	%	29,0	-
		Início (h:min)	1:30	≥0:60
NBR 7215 (ABNT, 2019c)	Resistência à compressão do cimento (MPa)	Fim (h:min)	2:50	≤10:00
		3 dias	23,1	≥15,0
		7 dias	27,7	≥25,0
		28 dias	37,1	≥40,0

Quadro 3.1 - Resultados de caracterização química do cimento CP II F-40 utilizado.

IT.QA.100	Componentes Químicos	Teor de umidade	(%)	-	-
		Perda ao fogo	(%)	8,26	≤ 4,5
		Perda ao fogo Corrigido	(%)	-	-
		Resíduo Insolúvel	(%)	5,84	≤ 5,0
		Sulfato de Cálcio (CaSO ₄)	(%)	5,05	-
		Óxido de Cálcio (CaO) Livre	(%)	2,35	-
IT.QA.101	Componentes Químicos	Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	(%)	2,97	≤ 4,5
		Óxido de Magnésio (MgO)	(%)	0,63	≤ 6,5
		Dióxido de Silício (SiO ₂)	(%)	19,53	-
		Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	(%)	2,34	-
		Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	(%)	4,21	-
		Óxido de Cálcio (CaO)	(%)	60,28	-
		Óxido de Titânio (TiO ₂)	(%)	0,19	-
		Sulfeto em cimento (S ²⁻)% por FRX	(%)	-	-
		Pentóxido de difósforo (P ₂ O ₁₀)	(%)	0,12	-
		Óxido de estrôncio (SrO)	(%)	0,27	-
		-	(%)	-	-
		-	(%)	-	-
		-	(%)	-	-
		Fechamento Σ =		(%)	99,11
Álcalis Totais	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	(%)	0,00	-	
	Óxido de Potássio (K ₂ O)	(%)	0,31	-	
	Equivalente Alcalino	(%)	0,20	-	

Os ensaios realizados demonstraram que o cimento utilizado atendeu aos requisitos físicos, químicos e mecânicos, estabelecidos pela NBR 16.697 (ABNT, 2018).

3.1.1.2 Agregados

Nesta pesquisa, como agregado miúdo utilizou-se uma areia natural quartzosa, oriunda de leito de rio e, como agregado graúdo, pedra britada de rocha granítica, proveniente da região de Anápolis/GO. A caracterização dos agregados e as curvas de distribuição granulometria estão apresentadas na Tabela 3.2 e Figuras 3.1 e 3.2.

Tabela 3.2 - Caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa.

	Propriedade	Método	Resultado
Agregado miúdo	Massa Específica (g/cm^3)	NBR 16916:2021	2,62
	Absorção (%)	NBR 16916:2021	0,40
	Dimensão máxima característica (mm)	NBR 17054:2022	2,34
	Módulo de finura	NBR 17054:2022	1,96
	Zona Granulométrica considerada	NBR 7211:2022	Zona utilizável
	Impurezas orgânicas: índice de cor	NBR 17.053:2022	Mais clara que a solução padrão
Agregado graúdo	Massa Específica (g/cm^3)	NBR 16916:2021	2,68
	Absorção (%)	NBR 16916:2021	0,40
	Dimensão máxima característica (mm)	NBR 17054:2022	19
	Módulo de finura	NBR 17054:2022	6,86
	Zona Granulométrica considerada	NBR 7211:2022	9,5 / 25

Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural de origem quartzosa.

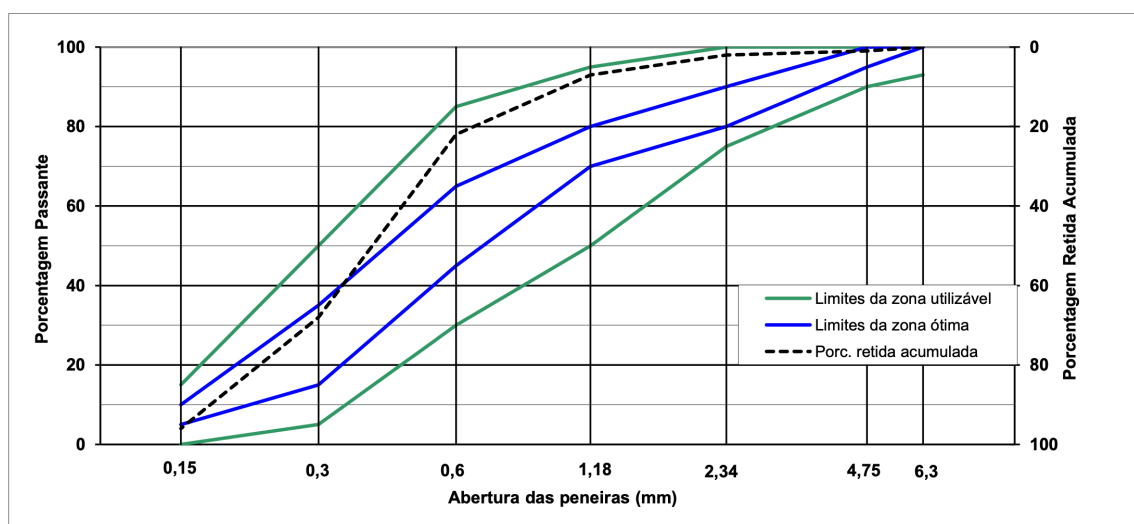
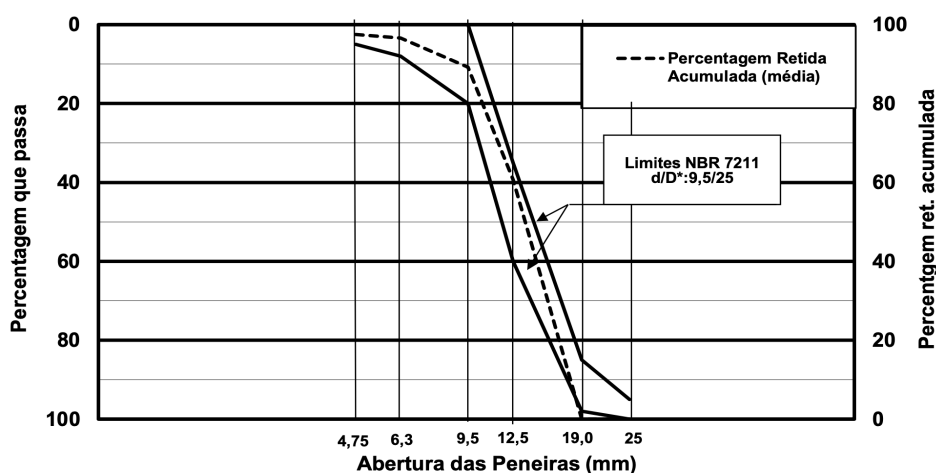


Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado graúdo de pedra britada de rocha granítica.



3.1.1.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado na pesquisa foi do tipo redutor de água tipo 2 (RA2), conforme classifica a NBR 11768-1 (ABNT, 2019d), conhecido como superplastificante, de base química éter policarboxílico modificado. De acordo com a NTC Brasil (s.d.), o aditivo tem viscosidade líquida, coloração branco turvo e não apresenta cloretos.

O uso do aditivo deu-se apenas para alcance da consistência mínima requerida para concretos estruturais bombeáveis com abatimento entre 160 mm e 220 mm, conforme NBR 8953 (ABNT, 2015). Na Tabela 3.3, apresenta-se a caracterização física do aditivo utilizado.

Tabela 3.3 - Caracterização do aditivo superplastificante.

Propriedade	Unidade	Resultado
Aparência	Visual	Líquido branco turvo
Densidade	g/cm ³	1,09
pH	-	5,89
Sólidos	%	29,75
Viscosidade	g (m*s)	135

3.1.2 Dosagem dos concretos

A dosagem dos concretos utilizados na pesquisa (Tabela 3.4) foi baseada no histórico de concretos utilizados em barragens de usinas hidrelétricas e obras acessórias, com resistência característica à compressão (F_{ck}) de 25 MPa e 45 MPa aos 28 dias de idade e também em dosagens utilizadas em pesquisas anteriores do GEDUR (JUNGBLUT, 2019; HILÁRIO, 2019; FAGUNDES, 2022). Além disso, foi adotado abatimento classe S-160, tido como concreto bombeável (ABNT, 2015) e com aplicação típica para produção de elementos estruturais. Optou-se pela não utilização de adições minerais nos concretos em função dos efeitos de ganho de resistência e alteração das condições de porosidade que essas adições poderiam ocasionar. Além disso, tentou-se isolar as variáveis relacionadas à seleção e proporcionamento dos materiais, a fim de não impactar nos resultados obtidos, principalmente pelas técnicas não destrutivas. Sendo assim, manteve-se o mesmo consumo de agregados miúdos e graúdos por metro cúbico na mistura nos dois concretos. Dessa forma, a escolha da variável classe de resistência derivou apenas da variação do consumo de cimento por metro cúbico de concreto e da relação água/cimento.

Tabela 3.4 - Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos estudados: classe C45 e C25 MPa.

Concreto C45		
Descrição	Traço unitário (kg)	Consumo (kg/m ³)
Cimento Portland CP II-F 40	1,00	350
Areia média natural	2,04	714
Brita 1 de origem granítica	3,09	1.082
Aditivo superplastificante	0,0015	0,525
Relação água/cimento (a/c)	0,5	175
Concreto C25		
Descrição	Traço unitário (kg)	Consumo (kg/m ³)
Cimento Portland CP II-F 40	1,00	310
Areia média natural	2,30	714
Brita 1 de origem granítica	3,49	1.082
Aditivo superplastificante	0,0010	0,310
Relação água/cimento (a/c)	0,6	186

3.1.3 Produção, moldagem e cura dos concretos

Para a realização dos ensaios, procedeu-se a moldagem de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm (30 CP's) e 15x30 cm (03 CP's), além de 2 prismas com dimensões de 20x30x55 cm, 1 placa de 90x90x15 cm, 1 bloco de 100x45x50 cm e 1 laje de 160x70x10 cm para cada um dos dois concretos em estudo.

O Quadro 3.2 resume as idades de ensaio, as dimensões e as quantidades de corpos de prova utilizados no estudo para cada concreto. A moldagem dos concretos foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Quadro 3.2 – Resumo do programa experimental: técnicas, idades de ensaio, quantidade de leituras e dimensões de corpos de prova utilizados para cada concreto.

Ensaio	Norma de referência	Idades de ensaio	Leituras realizadas	Dimensão do corpo de prova
Resistência à compressão axial	NBR 5739: 2018	1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de 3 resultados por idade	CP's cilíndricos 10x20 cm (cura úmida)
Módulo de elasticidade	NBR 8522: 2021	1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de 3 resultados por idade	CP's cilíndricos 15x30 cm (cura úmida)
Absorção e índice de vazios	NBR 9778: 2005	28 dias	Média de 3 resultados	CP's cilíndricos 10x20 cm (cura úmida)
Velocidade de onda ultrassônica - método de leitura direto	NBR 8802: 2019	1 a 28 dias de diariamente	Média de 3 leituras em alturas diferentes do corpo de prova	CP prismático 20x30x55cm (cura úmida e cura ao ar)

Índice esclerométrico (IE)	NBR 7584: 2012	3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de 16 leituras por idade	CP prismático 20x30x55cm (cura úmida e cura ao ar)
Resistividade elétrica superficial aparente	ASTM G57: 2020	1 a 28 dias diariamente	Média de 5 leituras (uma em cada face) por idade	CP prismático 20x30x55cm (cura úmida e cura ao ar)
Resistividade elétrica volumétrica	NBR 9204: 2012	1 a 28 dias diariamente	Média de 3 leituras por idade	CP cilíndrico 10x20cm (cura úmida e cura ao ar)
Tomografia ultrassônica	-	1 a 28 dias diariamente	1 imagem gerada por idade	CP prismático 20x30x55cm (cura úmida e cura ao ar)
Detecção de defeitos e elementos internos por Tomografia ultrassônica e radar GPR	-	Aos 28 dias	Varredura no elemento estrutural	Placas de 90x90x15cm (cura úmida)
				Blocos de 100x45x50cm (cura úmida)
Detecção de danos de fissuração por tomografia ultrassônica e resistividade elétrica superficial aparente	-	Aos 28 dias	42 leituras na face superior da laje	Laje de 160x70x10cm (cura úmida)

Para cada um dos ensaios listados no Quadro 3.2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com exceção dos ensaios básicos de caracterização e da detecção de defeitos internos, também foi analisada a influência do tipo de cura, a saber: cura úmida em câmara climatizada (com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 95%) e cura ao ar em ambiente de laboratório (com temperatura de aproximadamente $28 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 50%).

Para a produção do volume de concreto total necessário para moldagem de todos os corpos de prova da pesquisa foram necessárias 7 betonadas com aproximadamente 125 litros cada. Para isso, foi utilizada uma betoneira com capacidade nominal de 400 litros. Na tentativa de aleatorizar o experimento, a Tabela 3.5 apresenta a rastreabilidade nas produções de concreto.

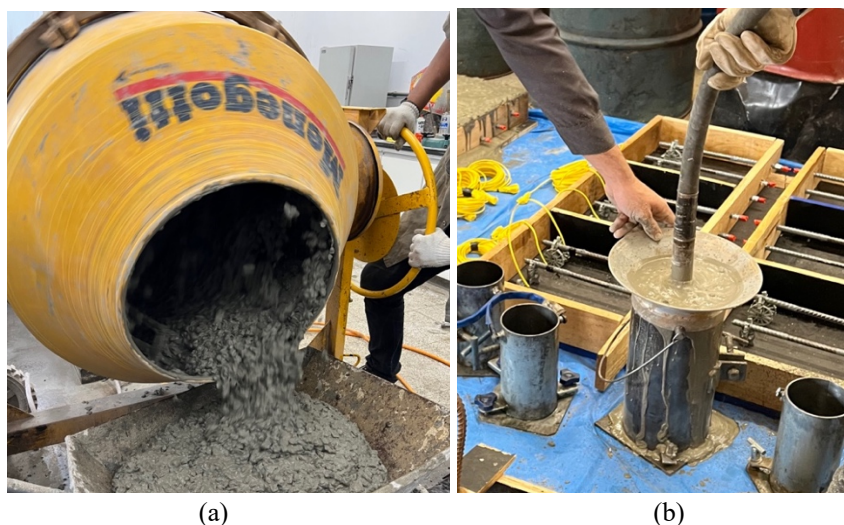
Tabela 3.5 - Rastreabilidade da produção dos corpos de prova de concreto.

Concreto C45	
Corpo de prova	Rastreabilidade
Cilíndricos 10x20cm	Produção 1, 3 e 6
Cilíndricos 15x30cm	Produção 1, 3 e 6
Placa 90x90x15cm – com simulação de danos	Produção 2 e 3
Placa 90x90x15cm – junta fria	Produção 5 e 6
Laje 170x60x10cm	Produção 4
Prisma 20x30x55cm	Produção 7
Bloco 100x45x50cm	Produção 6 e 7
Concreto C25	
Corpo de prova	Rastreabilidade
Cilíndricos 10x20cm	Produção 1, 3 e 6
Cilíndricos 15x30cm	Produção 1, 3 e 6
Placa 90x90x15cm – com simulação de danos	Produção 3 e 4
Placa 90x90x15cm – junta fria	Produção 2
Laje 170x60x10cm	Produção 7
Prisma 20x30x55cm	Produção 4
Bloco 100x45x50cm	Produção 5 e 6

A produção, moldagem e cura dos corpos de prova foi realizada nas dependências do LABITECC. Para o processo de produção e mistura dos concretos foi utilizado o procedimento fornecido por Furnas, citado por Fagundes (2022). Dessa forma, primeiro realizou-se a imprimação das paredes internas da betoneira com aproximadamente 4 litros do mesmo material da dosagem. Em sequência, o material da imprimação foi descartado.

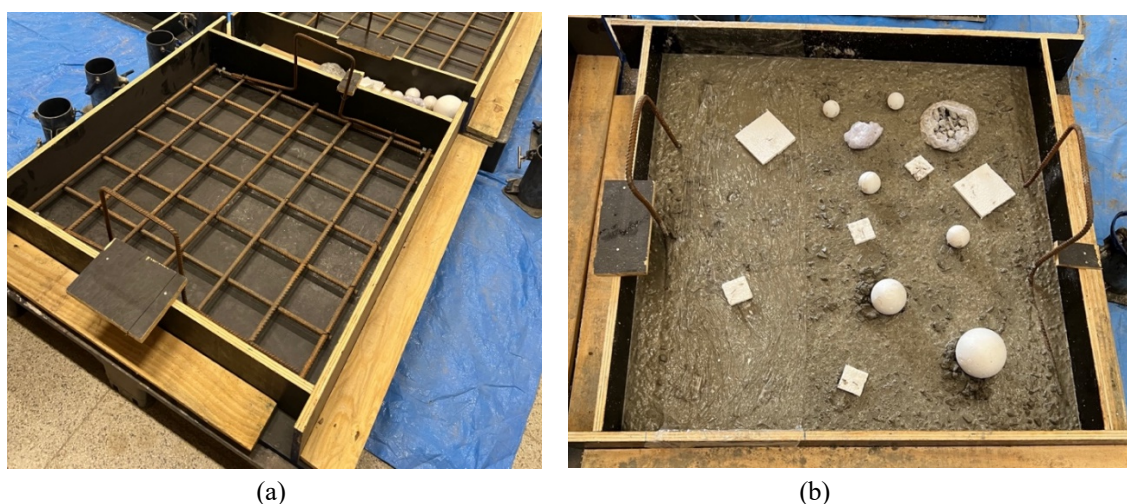
Após isso, com a betoneira parada, foram acrescentados os agregados miúdo, graúdo e um terço da água total de amassamento. Ligou-se a betoneira por 3 minutos para homogeneização do material. Depois, com ela parada, foi acrescentado todo o cimento e o restante da água de amassamento com o aditivo superplastificante diluído. Misturou-se por 1 minuto e deixou a mistura em repouso por mais 1 minuto. Durante esse 1 minuto de repouso procedeu-se com limpeza das laterais e do fundo da betoneira com a finalidade de desfazer os grumos de cimento. Em seguida, misturou-se o concreto por mais 3 minutos de forma ininterrupta e fazendo-se movimentos com o tambor da betoneira para cima e para baixo para auxiliar na homogeneização. Nesse momento, a consistência do concreto foi verificada, por meio de ensaio do abatimento do tronco de cone (*Slump test*) – NBR 16.889 (ABNT, 2020). Caso necessário, ocorreu o ajuste da consistência por acréscimo de aditivo superplastificante. Todas as produções de concreto, seguiram o mesmo procedimento de mistura. A Figura 3.3 exibe a mistura e a moldagem dos CP's.

Figura 3.3 - Concretagem: (a) concreto no estado fresco e (b) moldagem de CP cilíndrico.



Durante a moldagem de todos os CP's da pesquisa, o procedimento de adensamento adotado foi com o uso de vibrador de imersão do tipo agulha. Os cilindros de 10x20 cm foram moldados em uma única camada e os cilindros 15x30 cm em duas camadas, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). Ademais, as placas de concreto de 90x90x15 cm foram moldadas em duas camadas, sendo inseridas entre as camadas os defeitos de delaminação com uso de plástico filme, simulação de defeitos de concretagem com porções localizadas de agregados e materiais de diferentes densidades como fragmentos de placas, bolas de isopor e bolas de *ping-pong*, conforme ilustra a Figura 3.4-b.

Figura 3.4 – Montagem e concretagem da placa para simulação de defeitos na peça de concreto.



Os defeitos de delaminação nos corpos de prova em formato de placas foram simulados pela inserção de um filme plástico com 25 cm de largura por 0,1 mm de espessura. O filme foi colocado ao longo de uma das laterais da placa entre as duas camadas da concretagem com aproximadamente 8 cm de altura. Placas de isopor com dimensões de 5x5x1 cm e 10x10x1 cm

também foram inseridos para simulação de pequenos vazios internos. Também foi inserida uma porção de brita de 19 mm, envolvidas por plástico filme para simular defeitos de vazios internos (ninhos de concretagem). Por fim, bolas maciças de EPS de 5 e 10 cm de diâmetro e bolas de *ping pong* de 4 cm de diâmetro também foram inseridas nas placas durante a concretagem (Figura 3.4-b)

Adicionalmente, os corpos de prova em formato de placas ainda contaram com uma armadura positiva em formato de malha. Esta malha foi composta por barras com diâmetro de 12,5 mm espaçadas a cada 14 cm (Figura 3.4-a) e serviu para validação de detecção de armadura pelo tomógrafo ultrassônico e radar GPR.

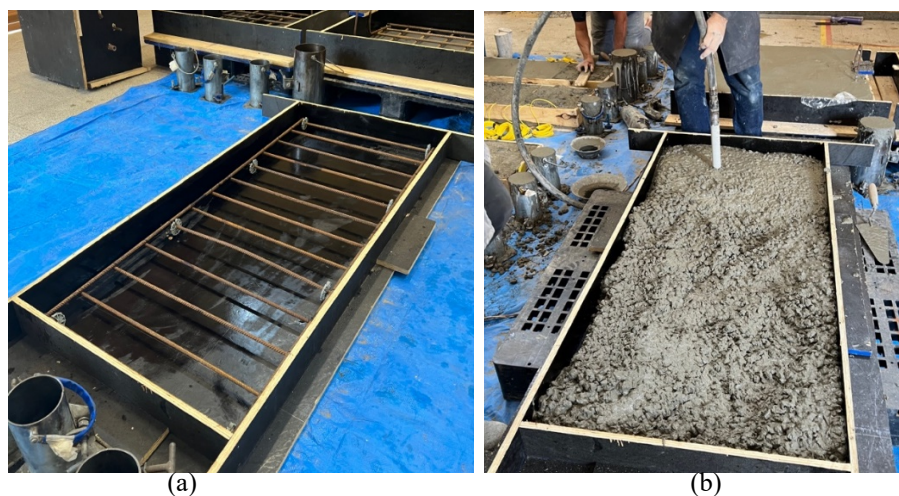
Com o objetivo de verificar a sensibilidade dos equipamentos tomógrafo ultrassônico e radar GPR, foi produzida uma placa de concreto com as mesmas especificações dimensionais e de armadura mencionadas anteriormente, porém com uma junta fria dividindo dois concretos: C25 e C45 (Figura 3.5)

Figura 3.5 – Corpos de prova de concreto com junta fria de concretagem: (a) C45 e (b) C45 e C25.



As lajes de concretagem com dimensões 170x60x10 cm (Figura 3.6) foram moldadas em apenas uma camada, com uma única produção. As lajes foram compostas por armaduras com diâmetro de 10 mm, espaçadas a cada 13 cm. A armadura foi dimensionada para suportar a movimentação dos elementos estruturais, assim como para garantir segurança durante a realização dos ensaios de danos por fissuração na laje por flexão a 3 pontos.

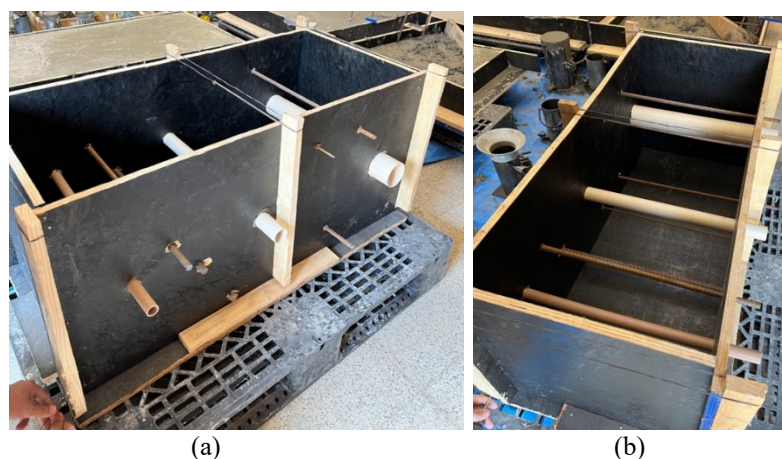
Figura 3.6 – Corpo de prova de concreto com dimensões de 170x60x10 cm: (a) formas e armadura e (b) concretagem.



Já a moldagem dos blocos de concreto com dimensões de 100x45x50 cm e prismas de 20x30x55 cm foi realizada em 3 camadas de mesma altura em função das dimensões e volumes desses elementos. Para facilitar a movimentação e manuseio dos elementos estruturais no laboratório, eles foram moldados sobre *pallets*.

No interior dos blocos, foram inseridas barras de aço com diâmetros de 25 mm, 16 mm, 10 mm, 5 mm e tubos de PVC de 75 mm, 32 mm e 25 mm. As barras e tubos foram posicionados em alturas diferentes para checar a precisão dos equipamentos na detecção de elementos de diferentes dimensões em diferentes profundidades. Para validação e checagem dos resultados, as extremidades dessas barras e tubos foram projetadas para o lado externo dos blocos, conforme ilustra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Fôrmas dos blocos de concreto (a) vista lateral e (b) vista superior.



Conforme citado anteriormente, foram utilizados dois procedimentos de cura para os CP's cilíndricos e prismáticos moldados: cura úmida em câmara e cura ao ar em ambiente de

laboratório. Os corpos de prova de dimensões maiores (placas, blocos e lajes) foram mantidos sob cura úmida, por meio de molhagem frequente sobre as peças.

3.1.4 Caracterização dos concretos no estado fresco e endurecido

No estado fresco, os concretos estudados foram caracterizados por meio da determinação da massa específica conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008) e consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, conforme NBR 16.889 (ABNT, 2020) (Figura 3.8). A Tabela 3.6 apresenta os resultados obtidos por esses dois ensaios no estado fresco.

Figura 3.8 – Ensaio de consistência (*slump test*): (a) concreto C45 e (b) detalhe C45.



(a)

(b)

Tabela 3.6 – Resultados de ensaio de massa específica e consistência (*slump test*).

Concreto	Massa Específica (Kg/dm ³)	Abatimento (mm)
C25	2,37	160
C45	2,39	185

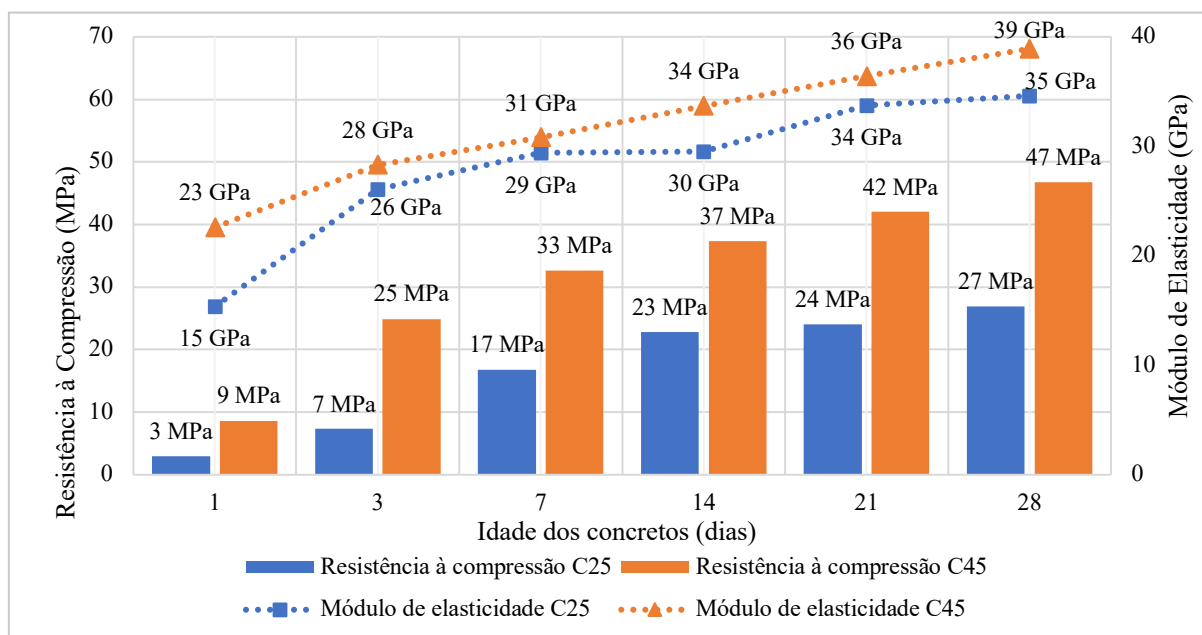
Já no estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade para caracterização mecânica dos concretos estudados. Os ensaios foram realizados em prensa EMIC, modelo DL30.000, classe I de precisão, com capacidade máxima de 2000 kN, sob uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. Os resultados médios obtidos

(F_{cm} e $E_{ci,m}$), bem como os desvios padrões (Sd) e coeficientes de variação (CV) encontram-se discriminados na Tabela 3.7 e Figura 3.9.

Tabela 3.7 – Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.

Concreto	Idade (dias)	F_{cm} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	$E_{ci,m}$ (GPa)	Sd (GPa)	CV (%)
C25	01	9,55	0,58	6,1	15,36	0,89	5,8
	03	13,91	1,10	7,9	26,05	0,45	1,7
	07	23,41	0,08	0,3	29,39	0,46	1,6
	14	29,41	2,77	9,4	29,51	2,46	8,3
	21	30,59	1,73	6,6	33,73	0,15	0,4
	28	33,50	1,30	3,9	34,61	0,45	1,3
C45	01	15,20	0,89	5,9	22,60	3,78	16,7
	03	31,39	1,76	5,6	28,32	1,52	5,4
	07	39,22	1,15	2,9	30,83	1,86	6,0
	14	43,90	5,35	12,2	33,70	3,76	11,2
	21	48,62	3,45	7,1	36,40	3,10	8,5
	28	53,31	2,58	4,8	38,91	0,23	0,59

Figura 3.9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.



Como esperado, houve acréscimo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o avanço da idade nos dois concretos estudados. Para o concreto C45 verificou-se que aos 3 dias obteve-se 55% da resistência a compressão esperada para 28 dias (45 MPa), 73% aos 7 dias e 82% aos 14 dias. Já no concreto C25, observou-se um percentual de 28% da resistência à compressão aos 3 dias, 68% aos 7 dias e 92% aos 14 dias. O consumo de cimento por metro cúbico do concreto C45 é maior que o C25 e isso pode explicar o maior acréscimo de resistência nos três primeiros dias. Nota-se também a semelhança desse crescimento inicial com os resultados de resistência à compressão do cimento (Tabela 3.1), que, nas primeiras idades, apresentou valores de resistência à compressão bem acima dos requisitos mínimos estipulados pela NBR 16.697 (ABNT, 2018)

Outra observação são que os valores de módulo de elasticidade elevados ainda em idades precoces nos dois concretos. A explicação para esse fenômeno pode ser atribuída à tipologia (granítica) e quantidade de agregados graúdos presentes na mistura (SANTOS *et al.*, 2017). O ganho progressivo do valor de módulo ao decorrer das idades a partir de 7 dias se dá devido ao ganho de resistência da pasta de cimento hidratada (POMPEU NETO; OLIVEIRA; RAMOS, 2011; BENETTI, 2012)

Do ponto de vista de desempenho, o concreto C25 apresenta um ganho de resistência aos 14 dias próximo da resistência esperada para os 28 dias, porém seu valor de módulo de elasticidade não demonstrou um ganho significativo entre o 7° e o 14° dia. Já o concreto C45 demonstra um crescimento de resistência acelerado aos 3 dias (55%), mas que cresce com uma intensidade menor entre o 7° e o 14° dia, com ganho absoluto de apenas 9%.

Após os 28 dias de cura também realizou-se, em 3 CP's, o ensaio de absorção e índice de vazios, conforme preconiza a NBR 9778 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultados de ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios NBR 9778 (ABNT, 2005).

Concreto	Absorção			Índice de vazios		
	Média (%)	Sd (%)	CV (%)	Média	Sd	CV (%)
C25	5,8	0,3	4,6	13,0	0,5	4,0
C45	4,5	0,4	7,8	10,5	0,7	7,1

Também conforme esperado, os valores de absorção e índice de vazios do concreto C25 demonstram-se maiores em relação ao concreto C45. Isso se dá pelo fato do concreto C25 possuir uma relação água/cimento maior que o concreto C45, o que proporciona um maior volume de poros capilares na pasta de cimento hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Assim, à medida que a relação água/cimento aumenta, os coeficientes relacionados a absorção e vazios também aumentam, conforme já havia sido demonstrado pelos trabalhos de Zhang e Zong (2014), Castro e Ferreira (2016), Gans (2017), Pinto *et al.* (2018), Medeiros-Júnior *et al.* (2019) e Hilário (2019).

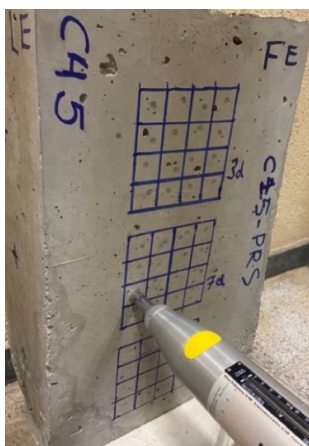
A partir da classificação proposta por Helene (1983) para concretos estruturais sem aditivos, em função dos resultados de absorção de água e porosidade, os concretos C25 e C45 podem ser tidos como concretos normais e com boa qualidade, uma vez que possuem valores de absorção de água compreendidos entre 4,2 e 6,3% e índice de vazios entre 10 e 15%. Adicionalmente, os baixos coeficientes de variação (CV) obtidos, menores que 10%, validam a confiabilidade dos resultados.

3.1.5 Métodos não destrutivos convencionais

a) Esclerometria

Os ensaios de esclerometria foram realizados nas faces dos CP's prismáticos de 20x30x55 cm, C25 e C45, nas duas condições de cura, de acordo com as orientações da NBR 7584 (ABNT, 2012) e com o uso do esclerômetro de reflexão Schmidt PROCEQ modelo N-34. Em cada uma das idades de realização do ensaio estipuladas no Quadro 3.1 foram efetuados 16 impactos sobre a superfície dos prismas na direção horizontal. A Figura 3.10 ilustra a realização do ensaio.

Figura 3.10 – Ensaio de esclerometria em prisma de concreto C45.



Optou-se pela não realização do ensaio de esclerometria no 1º dia de idade, pois, em idades muito precoces, o ensaio poderia causar micro fissuração e danos indesejados próximos à superfície do concreto. Os resultados obtidos foram registrados e aqueles que diferiram mais que 10% da média aritmética foram desconsiderados e uma nova média aritmética foi calculada, conforme recomendação da NBR 7584 (ABNT, 2012).

b) Propagação da onda ultrassônica

O ensaio de propagação da onda ultrassônica foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019b), por meio do equipamento PROCEQ Pundit Lab +, com o uso de transdutores com frequência de 54 kHz (Figura 3.11).

Foi utilizada a metodologia direta nas laterais (30 cm de espessura) do corpo de prova prismático, sendo realizadas três leituras em cada ponto de medição e em três pontos de alturas diferentes, distantes entre si aproximadamente 15 cm. A opção pela realização de variação de alturas de medição de onda ultrassônica deu-se, principalmente, para homogeneizar os resultados e atenuar um possível efeito de adensamento do concreto nos valores de velocidade de onda obtidos, uma vez que o CP prismático possui uma altura de 55 cm. Foram realizados ensaios nos CP's C25 e C45, nas duas condições de cura.

Figura 3.11 – Ensaio de ultrassom em prisma de concreto C25.



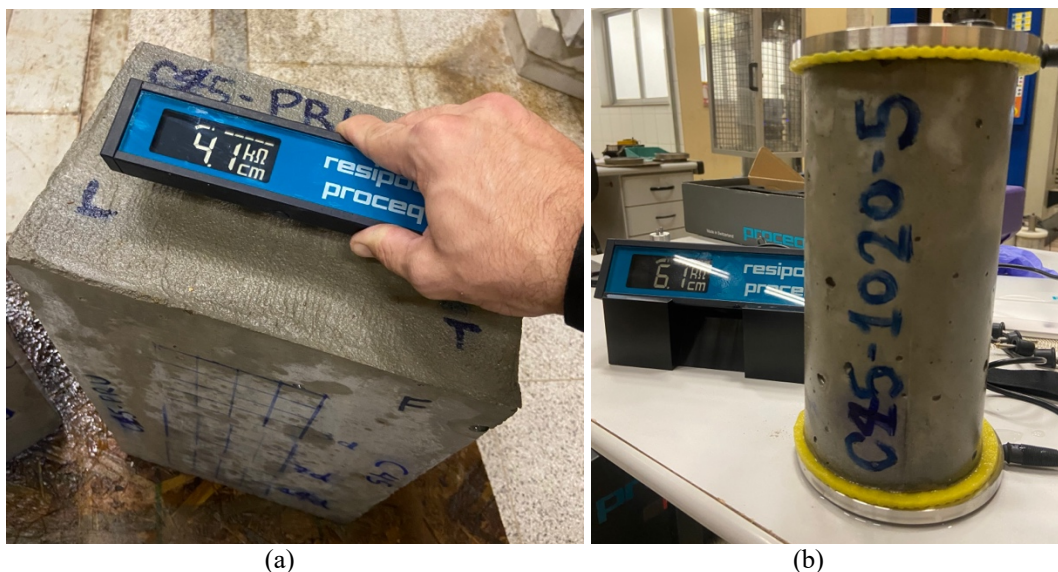
c) Resistividade elétrica superficial aparente (R_e) e Resistividade elétrica volumétrica (R_v)

Para a realização dos ensaios de resistividade elétrica superficial e resistividade volumétrica, utilizou-se o equipamento fabricante PROCEQ, modelo Resipod. O método superficial foi realizado por meio da sonda com espaçamento entre eletrodos de 38 mm e leituras realizadas em corpos de prova prismáticos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 3.12-a) nas curas ao ar e úmida.

Optou-se por realizar medidas de R_e em corpo de prova prismáticos para eliminar uma eventual influência de geometria e dimensão de corpo de prova, uma vez que há “efeito de borda” que o corpo de prova cilíndrico pode causar nos resultados de R_e em função da curvatura do CP e do comprimento de apenas 20 cm. Além disso, o prisma de concreto também propicia uma maior área possível de se realizar medições. Como o prisma foi moldado também para outros ensaios não destrutivos, preferiu a utilização do mesmo para resistividade elétrica superficial.

Já os ensaios de R_v foram realizados nos corpos de prova cilíndricos 10x20cm dos concretos C25 e C45, submetidos a cura úmida e cura seca ao ar. Na execução dos ensaios também foi utilizado o equipamento Resipod, porém com a adaptação das sondas para placas metálicas, que proporciona medição de forma volumétrica nos corpos de prova cilíndricos (Figura 3.12-b). Para garantir o correto contato das placas metálicas com o corpo de prova, foram utilizadas duas espumas umedecidas em água.

Figura 3.12 – Ensaio de resistividade elétrica superficial (a) e volumétrica (b)



Os dados obtidos nas leituras de resistividade foram registrados no equipamento e salvos posteriormente em um computador, por meio do software *ResipodLink* que permite a visualização, manipulação e exportação dos dados obtidos.

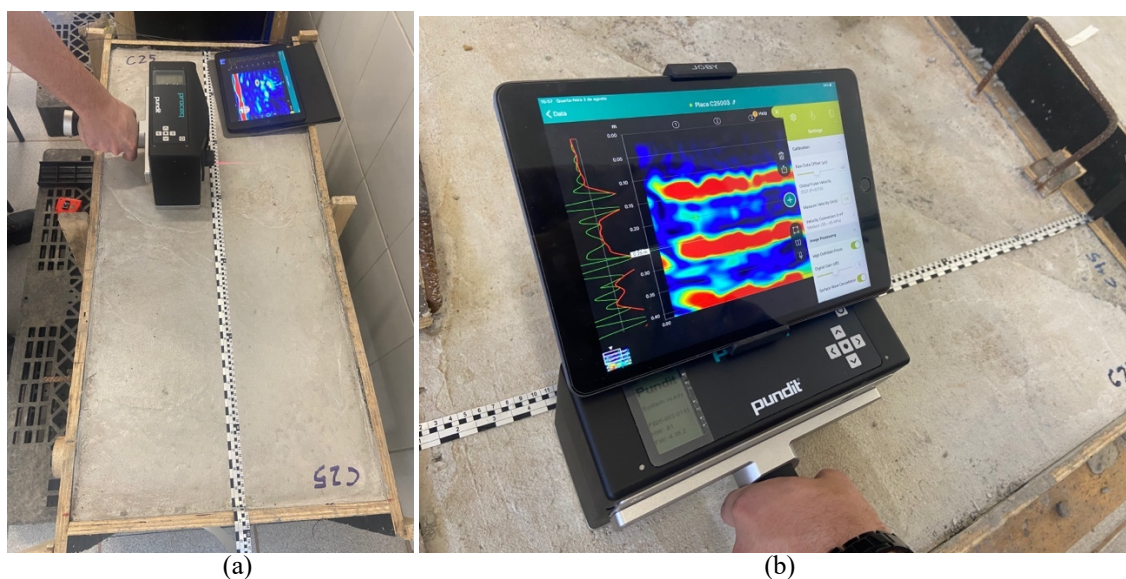
Para a situação dos corpos de prova cilíndricos e prismático submetidos a cura seca ao ar, em tentativa de realização dos ensaios de resistividade, procurou-se umedecer com um pano úmido a superfície a ser ensaiada cerca 20 minutos antes de sua realização.

3.1.6 Métodos não destrutivos mais contemporâneos

d) Tomografia ultrassônica

Os ensaios de tomografia ultrassônica foram realizados com o uso do equipamento Pundit PD8000, que utiliza da tecnologia multi-canal de pulso eco e transdutores com frequência nominal de 40 kHz. Os ensaios foram realizados com 28 dias de cura dos blocos e placas de concreto, por meio de uma varredura contínua na superfície (topo) do elemento estrutural (Figura 3.13). As imagens produzidas foram posicionadas e sobrepostas por inteligência artificial, por meio de um recurso fornecido pelo próprio equipamento, promovendo assim a geração de tomogramas contínuos da varredura ao longo de todo o comprimento das peças. Como citado anteriormente, o objetivo das leituras no bloco foi verificar a aplicabilidade e sensibilidade da técnica para detecção de barras e tubos, posicionadas ao longo de uma seção transversal. Já nas placas, o objetivo principal era a detecção dos defeitos internos.

Figura 3.13 – Ensaio de tomografia ultrassônica por varredura no topo dos elementos bloco (a) e placa (b).



Para verificação dos danos relacionados à fissuração nas lajes C25 e C45, realizou-se a demarcação de 42 pontos (quadrantes) de leitura, divididos em linhas nomeadas de “A” a “G” e colunas de 1 a 6 (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Divisão dos pontos de leitura de tomografia ultrassônica para detecção de danos em laje de concreto.



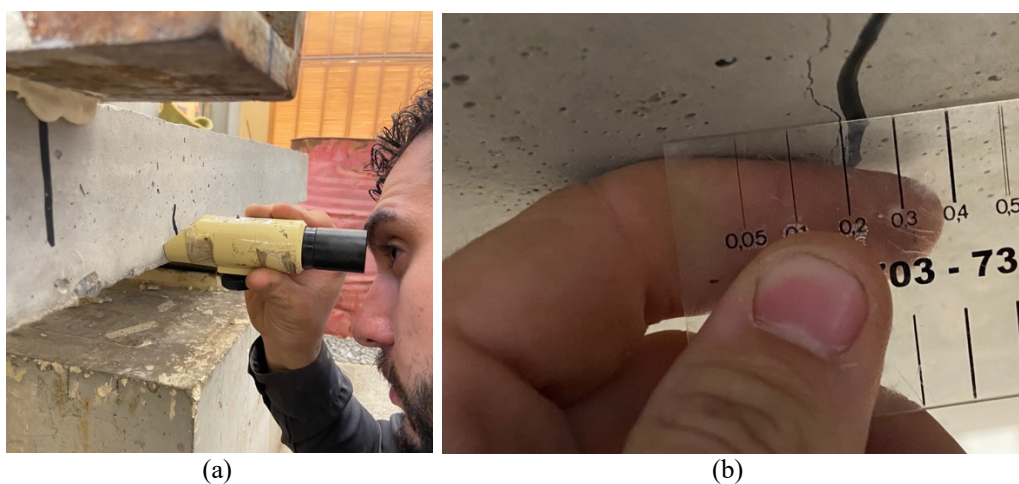
Em cada um desses quadrantes foram realizadas leituras de tomografia ultrassônica antes, durante e depois da aplicação de carga na laje por flexão simples. Os ensaios foram realizados logo após os 28 dias de cura dos concretos (Figura 3.15). O carregamento foi aplicado em passos de carga de tal forma a se obter leituras de tomografia ultrassônica para cada 0,2 mm de abertura de fissura no elemento. As leituras de abertura de fissura foram realizadas com fissurômetro óptico (Figura 3.16-a) e com régua gabarito (Figura 3.16-b). O registro da aplicação das cargas foi feito por meio de célula de carga do tipo S com capacidade de 50 KN acoplada ao sistema de aquisição de dados da Prensa EMIC DL30000.

Figura 3.15 – Esquema de realização do ensaio de flexão (a) e leitura de tomografia ultrassônica na laje (b).



Como critério de parada do ensaio foi considerado o instante em que as lajes se encontravam com fissuras de flexão de aproximadamente 0,8 mm e que não havia nenhum ganho de resistência após movimentação do pistão atuador de carga. A partir disso, considerou-se insegura a condição de realização do ensaio e leitura da abertura das fissuras em função da ruptura brusca eminente do elemento estrutural.

Figura 3.16 – Medição de abertura de fissuras por fissurômetro óptico (a) vista lateral e (b) detalhe régua gabarito e fissuras.



Adicionalmente, 48 horas antes e após o ensaio de flexão, as lajes C25 e C45 também foram levadas à saturação em água (Figura 3.17-a) e submetida ao ensaio de resistividade elétrica superficial com o equipamento ResiPod nos mesmos 42 pontos em que foram realizados os ensaios de tomografia ultrassônica (Figura 3.17-b). O objetivo do ensaio foi verificar a ocorrência de variação nas medições de resistividade elétrica superficial em função dos danos de fissuração gerados nas lajes submetidas à flexão.

Figura 3.17 – Saturação da laje (a) e realização do ensaio de resistividade elétrica superficial aparente (b)



e) Radar GPR

Os ensaios com a utilização do radar GPR nos blocos e placas de concreto foram realizados de maneira análoga aos ensaios de tomografia ultrassônica. Para tanto, foi utilizado o radar de penetração portátil GP8000 da marca PROCEQ, que trabalha em uma frequência entre 200 MHz e 4000 MHz e possibilita leituras de até 80 cm de profundidade.

Os ensaios foram realizados com 28 dias de cura dos elementos estruturais e com uma varredura contínua em sua superfície (Figura 3.18). Assim como na tomografia, objetivou-se verificar a sensibilidade do equipamento para detecção de barras, tubos e defeitos internos à estrutura dos blocos e placas.

Figura 3.18 – Ensaio com radar GPR fazendo varredura no topo dos elementos bloco (a) e placa (b).



3.2 PROPOSTA DE METODOLOGIA DE INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

A metodologia tomada como base é a Metodologia GDE/UnB, em sua última reformulação realizada por Verly (2015), intitulado de Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB à Obras de Arte Especiais, cujo roteiro é exibido no Anexo A. A escolha por esta metodologia e devido a seu extenso uso no Brasil (MEDEIROS *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a opção de não utilização da metodologia proposta pela NBR 9452 (ABNT, 2019a) deve-se ao seu elevado grau de subjetividade e imprecisão das inspeções exclusivamente visuais que podem contribuir para uma notada falta de objetividade nos resultados obtidos (ALMEIDA, 2013; OLIVEIRA, 2019; VERLY *et al.*, 2020).

Aliado a isso, os resultados do estudo de Rosa (2014) também expõe evidências que a metodologia proposta pelo manual do DNIT (DNIT, 2004), que é trazida na NBR 9452 (ABNT,

2019a), proporciona uma maior dificuldade em sua realização. Neste sentido, a metodologia GDE/UnB avança nas tabelas de referência que auxiliam o inspetor no momento da quantificação dos fatores de intensidade do dano nos elementos estruturais.

Somado a isso e com base nos resultados obtidos pela RSL realizada, que relacionaram os ensaios não destrutivos aos danos mais comuns em estruturas de concreto, optou-se pela incorporação dos ensaios de radar GPR e tomografia por ultrassom à metodologia de inspeção supracitada. A utilização desses dois ensaios será com o objetivo de identificar uma provável descontinuidade da estrutura ou presença de vazios internos.

Conforme mencionado nas pesquisas de Joshaghani e Shokrabadi (2021), Sun, Pashoutani e Zhu (2018), Lin *et al.* (2018), Gucunski *et al.* (2010) e Rehman *et al.* (2016) dentre as técnicas existentes, essas são recomendadas para aplicação na avaliação de danos internos à estrutura, descobrir possíveis erros de execução internos, produzidos durante a concretagem; criar um histórico das variações no comportamento e nas características do concreto ao longo dos anos, decorrentes de ataques químicos, especialmente carbonatação e reação com sulfatos, segundo descreve a NBR 8802 (ABNT, 2019b).

Além desses dois ensaios, também propõe-se a incorporação dos ensaio complementar de esclerometria (ABNT, 2012) e o uso de indicadores de durabilidade: potencial de corrosão (ASTM, 2022) e resistividade elétrica superficial aparente (ASTM, 2020). Eventualmente, a técnica de pacometria será mencionada para mapear a posição da armadura no interior do concreto, seja para a delimitação dos quadrantes do ensaio de esclerometria ou para pontos de conexão no ensaio de potencial de corrosão.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio do programa experimental, com sua análise e discussão, dividido basicamente em três macro etapas, sendo a primeira etapa de caracterização dos concretos C25 e C45, nos primeiros 28 dias de idade, por meio de ensaios não destrutivos, nas condições de cura seca ao ar e úmida, bem como a proposição de curvas de correlação entre os métodos destrutivos e não destrutivos. Na segunda etapa têm-se os resultados concernentes à avaliação do uso das técnicas não destrutivas na identificação de barras e tubos internos aos elementos em concreto, defeitos de fissuração, vazios internos, diferença de densidade e delaminações. Por fim, em uma terceira etapa, propõe-se novos parâmetros a serem inseridos na metodologia de inspeção pré-existente, tendo em vista a aplicabilidade das técnicas não destrutivas para detecção dos danos e quantificação do grau de dano das estruturas.

4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NOS PRIMEIROS 28 DIAS DE IDADE

Nesta seção são apresentados os resultados de caracterização dos concretos estudados por meio de ensaios não destrutivos de esclerometria, ultrassom e resistividade elétrica com o objetivo de conhecer o comportamento dos concretos frente à essas grandezas físicas e identificar as correlações existentes entre elas, assim como com as propriedades mecânicas dos concretos. Estabelecer essas correlações é de extrema relevância pois esses ensaios podem fazer parte do escopo de análise do inspetor, a fim de localizar e estabelecer a formação dos lotes de concretagem e verificação da homogeneidade do concreto analisado (ABNT, 2012, 2015).

4.1.1 Esclerometria

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de Índice Esclerométrico nos concretos C25 e C45, assim como os desvios padrão (Sd) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 4.1 – Resultados de índice esclerométrico dos concretos estudados

Concreto	Idade (dias)	IE méd	Sd	CV (%)
C25 (cura seca ao ar)	03	27,4	1,8	6,7
	07	28,9	1,0	3,6
	14	33,6	1,6	4,8
	21	36,1	1,9	5,3
	28	38,9	1,8	4,6
C45 (cura seca ao ar)	03	31,4	1,8	5,8
	07	35,0	1,7	4,9
	14	35,2	1,2	3,5
	21	38,4	2,2	5,8
	28	39,2	2,6	6,6
C25 (cura úmida)	03	22,9	1,0	4,2
	07	28,8	1,4	5,0
	14	32,6	1,5	4,6
	21	33,1	1,7	5,2
	28	35,2	1,4	3,9
C45 (cura úmida)	03	31,2	1,6	5,1
	07	33,7	1,6	4,9
	14	36,4	2,0	5,6
	21	40,5	2,3	5,7
	28	41,5	2,1	5,1

Foram observados baixos coeficientes de variação nos ensaios, sendo os maiores valores da ordem de 6,7% para C25 e 6,6% para C45. Assim, os resultados de esclerometria podem ser considerados confiáveis em função de um coeficiente de variação menor que 10%. Fato este já esperado para este ensaio, uma vez que a NBR 7584 (ABNT, 2012) estabelece que são desprezados os valores que diverjam em mais de 10% do valor médio obtido.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas a evolução dos valores de Índice Esclerométrico (IE) médios obtidos nos concretos C25 e C45, respectivamente, nas duas condições de cura analisadas: cura seca ao ar e cura úmida.

Figura 4.1 - Evolução dos resultados de Índice Esclerométrico do concreto C25 para cura seca ao ar e cura úmida.

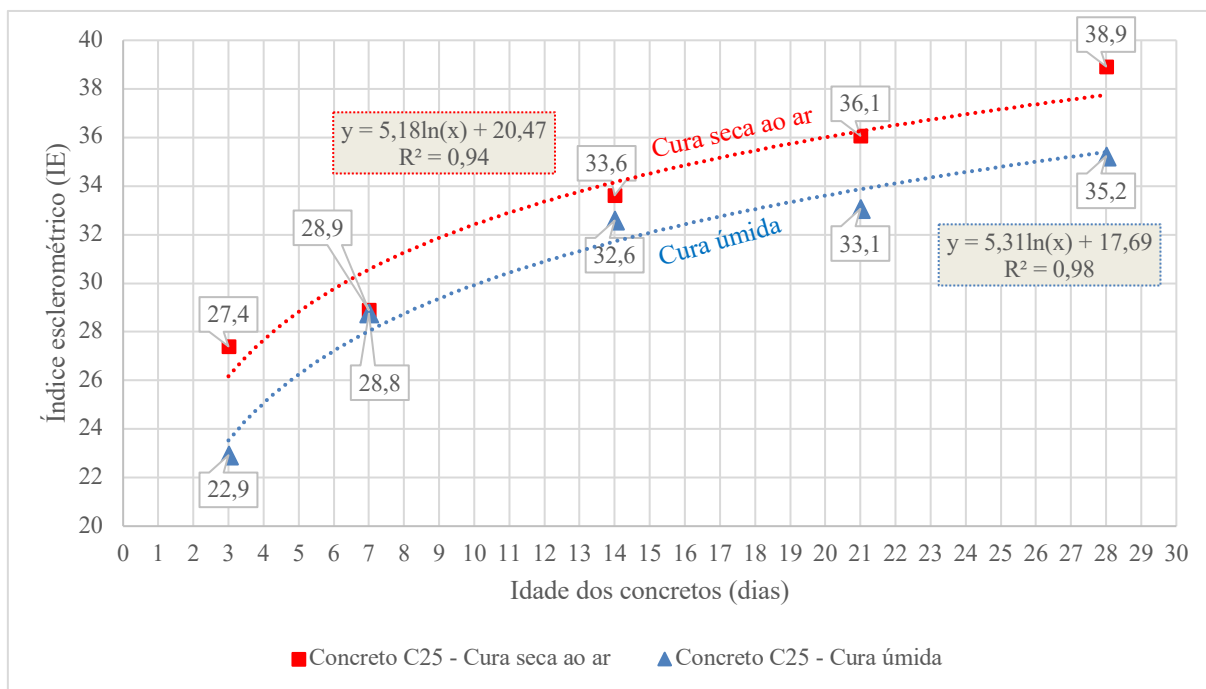
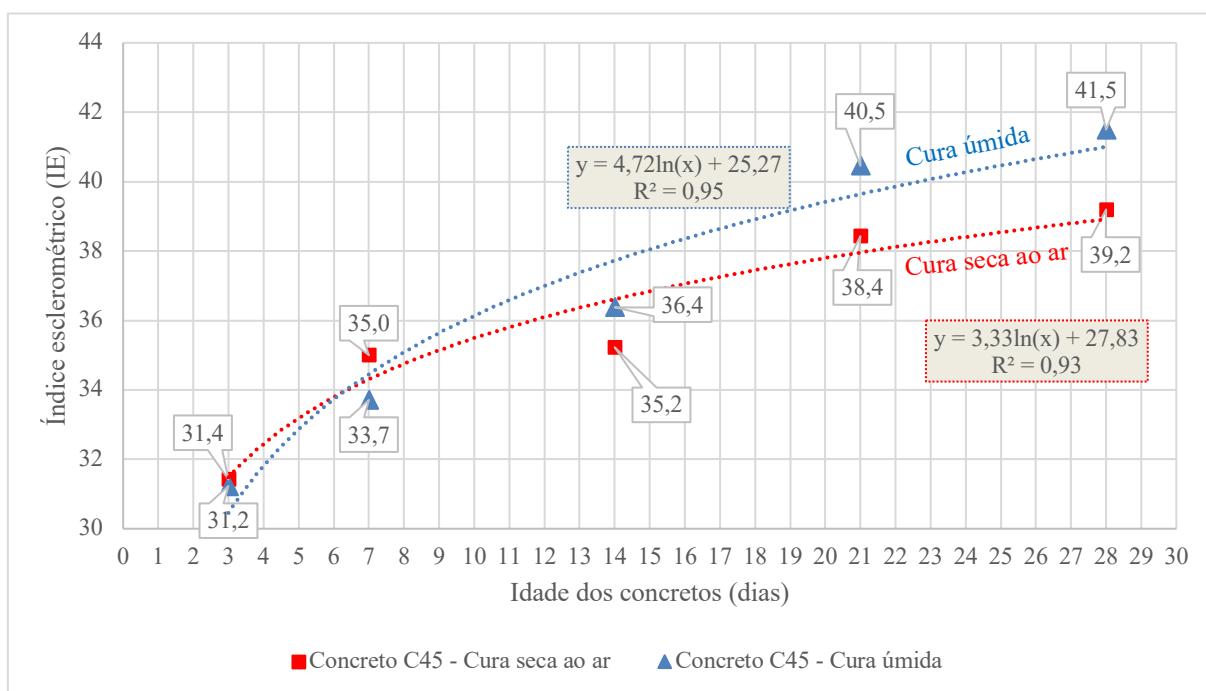


Figura 4.2 - Evolução dos resultados de Índice Esclerométrico do concreto C45 para cura seca ao ar e cura úmida.



Como esperado, nota-se uma tendência de crescimento nos IE com o acréscimo da idade, sendo um aumento de aproximadamente 24,7% entre 3 e 28 dias no concreto C45 para cura seca ao ar, e 32,9% para cura úmida. Já no C25, obteve-se um crescimento de 42,0% para cura seca ao ar e 53,7% para cura úmida.

Quando se compara a diferença percentual no concreto C45 para as duas situações de cura, nota-se que os valores de IE encontram-se bem próximos para a idade de 3 dias (0,6%), e essa diferença vai aumentando e chega a 5,9% aos 28 dias de idade. Por outro lado, no concreto C25, essa diferença nos valores de IE entre as duas situações de cura mostra-se com 19,5% aos 3 dias de idade, 9,1% aos 21 dias e chega em 10,5% aos 28 dias.

Adicionalmente, nota-se que no concreto C25 o formato da linha de tendência logarítmica de crescimento do IE ao longo das idades nas duas situações de cura é bastante parecido. As curvas apresentam um certo grau de paralelismo, o que indica um comportamento semelhante de crescimento ao longo das idades. Já no concreto C45, as duas curvas apresentam valores iniciais (aos 3 dias) muito próximos, porém à medida que a idade cresce, as curvas distanciam-se entre si de seus valores. Cabe ressaltar que a análise foi feita para os dois concretos somente até 28 dias de idade. Em idades mais avançadas é de se esperar que o efeito da carbonatação possa impactar nos resultados de dureza superficial e os concretos que estão em contato com o ar apresentem maiores valores de IE.

Os coeficientes de determinação R^2 obtidos e apresentados Figura 4.1 e 4.2 de IE *versus* idade dos concretos sob cura seca ao ar foram de 0,94 para o C25 e 0,93 para o C45. Sob cura úmida os valores de R^2 apresentam-se ligeiramente maiores, sendo de 0,98 para o C25 e 0,95 para o C45. Espera-se que a dureza superficial do concreto aumente ao longo do tempo, não só pelo ganho de resistência em função de sua hidratação, mas também ação do fenômeno da carbonatação no concreto, principalmente àqueles que estiveram sob condição de cura seca.

A literatura apresenta que a carbonatação é um dos fatores que pode influenciar na superestimação do IE, uma vez que os elementos constituintes do cimento vão sendo substituídos por carbonatos, como resultado das reações entre o dióxido de carbono e outros gases. Esse fenômeno altera propriedades na superfície do concreto como alcalinidade, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e dureza superficial (CASCUDO, 1997; RIBEIRO, 2018; SENA *et al.*, 2020; ABNT, 2012). Isso explica o fato de o concreto C25 possuir maiores valores de IE sob cura seca, comportamento este diferente do concreto C45.

Concretos com menores valores de resistência à compressão, como o C25, apresentam também maior porosidade e facilidade de penetração de CO_2 , promovendo uma carbonatação e, conseqüentemente, uma maior dureza superficial em idades mais precoces. No concreto C45, devido sua menor porosidade (vide menores valores de absorção e índice de vazios), o efeito

da carbonatação não é tão significativo para o ganho de dureza superficial quanto o efeito do ganho de resistência da pasta de cimento hidratada. Este fato pode ser constatado devido aos valores de IE para o C45, a partir de 7 dias, apresentar-se maior sob condição de cura úmida.

Outra situação notada é que os corpos de prova na condição de cura úmida foram ensaiados com sua superfície também na condição úmida, o que favorece a tendência dos resultados de IE serem mais baixos. Por outro lado, em concretos com maior resistência, como o C45, o efeito da cura úmida na resistência da pasta de cimento hidratada mostra-se como um fator mais significativo para sua dureza superficial, do que a condição de umidade superficial.

4.1.2 Velocidade de onda ultrassônica

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos C25 e C45, respectivamente, ao longo da idade (1 a 28 dias), nas duas condições de cura.

Figura 4.3 - Evolução dos resultados de Velocidade de Propagação de onda ultrassônica do concreto C25 para cura seca ao ar e cura úmida.

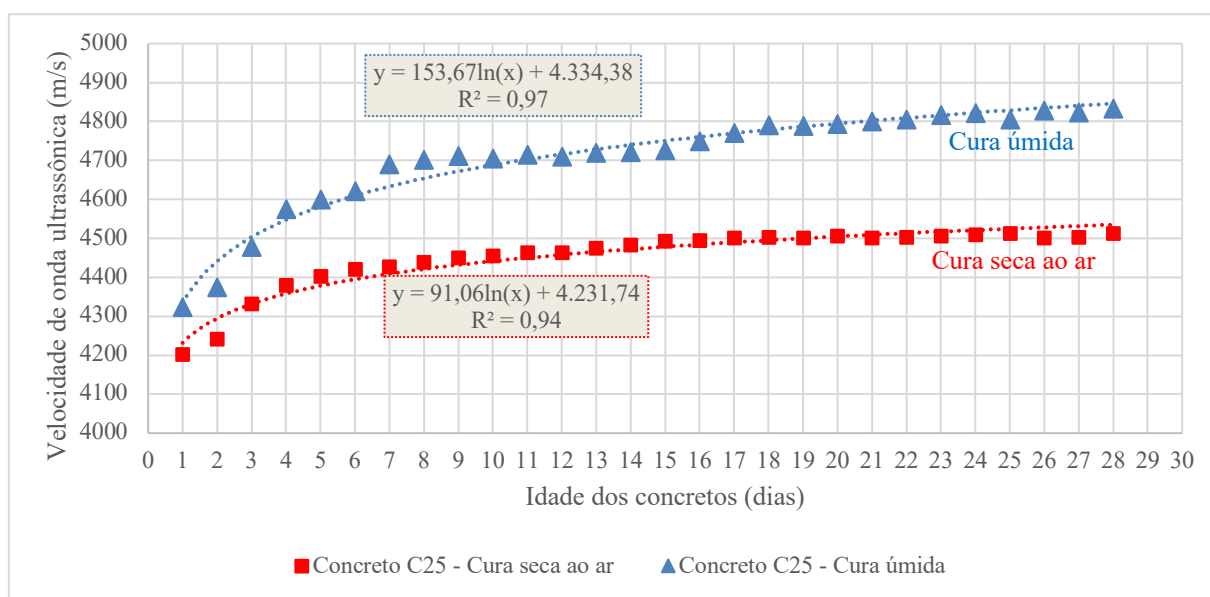
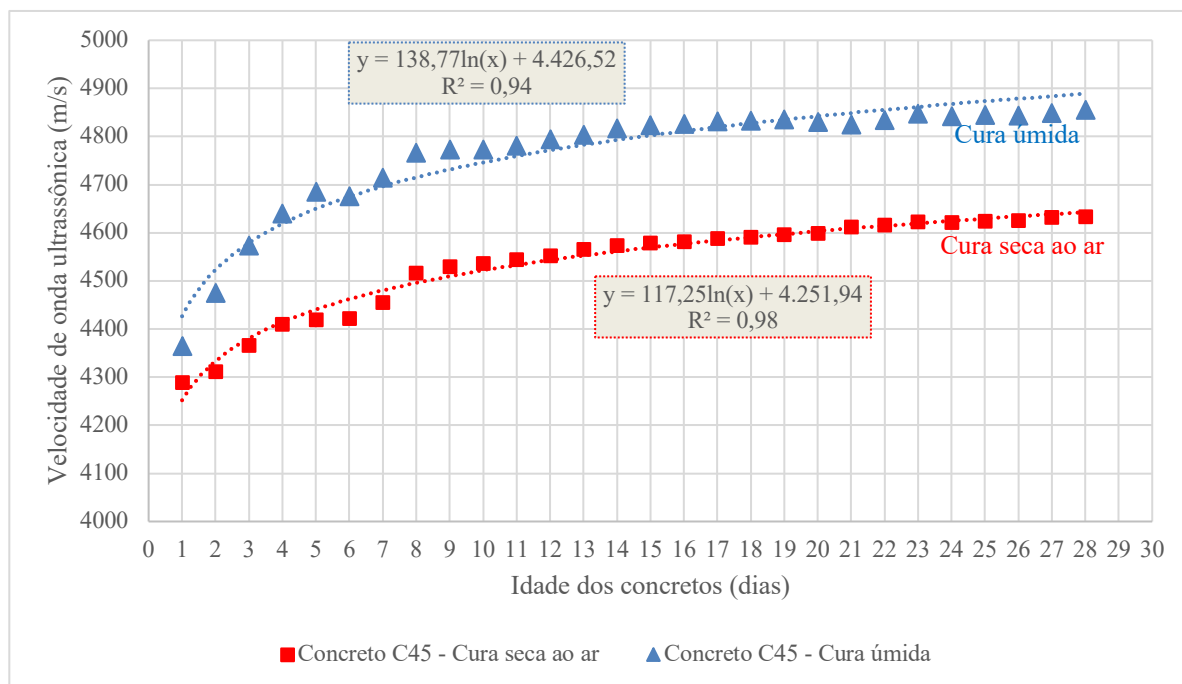


Figura 4.4 - Evolução dos resultados de Velocidade de Propagação de onda ultrassônica do concreto C45 para cura seca ao ar e cura úmida.



Como esperado, as velocidades de propagação de onda ultrassônica no concreto com maior resistência à compressão apresentam valores ligeiramente mais elevados, sendo, aos 28 dias de 4.833,60 m/s para o C25 e 4.855,38 m/s para o C45 na condição de cura úmida. Já na condição de cura seca ao ar, aos 28 dias, essa diferença apresenta-se ainda maior, sendo de 4.512,01 m/s para o C25 e 4.633,87 m/s para o C45. Fatores como menor consumo de cimento e maior relação a/c no concreto C25 em relação ao C45, sugerem que ele possua uma maior porosidade e menor densidade. Assim, além de menor resistência característica, o concreto C25 tende a apresentar um maior tempo de propagação e, portanto, menor velocidade de onda.

Para os ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica observou-se baixos coeficientes de variação nas medidas realizadas, sendo em média de 1,2% para o concreto C25 e 0,7% para o C45. Os maiores valores de coeficiente de variação obtidos foram de 1,6% para o concreto C25 e 0,9% para o C45.

Cabe ressaltar, ainda, que do ponto de vista da durabilidade, de acordo com a classificação da qualidade do concreto da BS 1881-203 (1986) - que expressa a condição do concreto, os dois concretos em análise podem ser classificados como de excelente qualidade, pois após 28 dias de cura apresentam valores acima de 4.500 m/s de velocidade de propagação de onda, independentemente do tipo de cura.

Além disso, o efeito da cura é notoriamente verificado nos resultados de ultrassom nos dois concretos analisados. Tanto no concreto C25 quanto no concreto C45, os resultados demonstram que os concretos sob cura úmida detêm maiores valores de velocidade de propagação de onda, o que implica em concretos com melhor qualidade, com maior densidade e menos porosos. Essa diferença trazida pelos dois procedimentos diferentes de cura mostra-se menor nas primeiras idades e a partir do endurecimento da pasta de cimento, essa diferença tende a permanecer constante, principalmente após os 14 dias de idade.

É preciso, contudo, ponderar sobre os valores obtidos com cura úmida. Não há dúvida que a cura exerce um efeito que qualifica a pasta de cimento e melhora a microestrutura do concreto. No entanto, o fato de se medir a propagação da onda ultrassônica numa condição de saturação plena dos poros (caso dos concretos com cura úmida) gerou algum efeito no resultado final, possivelmente contribuindo para acrescer os valores de velocidade de propagação. Este efeito concorreu para uma “normalização” dos resultados, ou seja, para uma aproximação dos valores de velocidade de propagação nos concretos C25 e C45, os quais, do ponto de vista de suas estruturas internas, são bem diferentes. Dentro dessa perspectiva, os resultados de cura seca parecem ser mais significativos, uma vez que possibilitam a verificação de diferenças entre os referidos concretos.

Por fim, obtém-se a partir das curvas de aumento da velocidade de propagação de onda ultrassônica, coeficientes de correlação R^2 de 0,97 para o concreto C25 a condição de cura úmida e 0,94 para a condição seca ao ar. Já para o concreto C45 têm-se R^2 de 0,94 para a condição de cura úmida e 0,98 para a condição seca ao ar.

4.1.3 Resistividade elétrica

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial aparente (R_e) e resistividade elétrica volumétrica (R_v), obtidos na condição de cura úmida e cura seca ao ar nas idades de 1 a 28 dias, referentes aos concretos C25 e C45.

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica

Idade (dias)	Concreto C25				Concreto C45			
	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)		Resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm)		Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)		Resistividade elétrica volumétrica (kΩ.cm)	
	Cura úmida	Cura seca ao ar	Cura úmida	Cura seca ao ar	Cura úmida	Cura seca ao ar	Cura úmida	Cura seca ao ar
1	2,60	3,10	2,50	3,50	2,50	3,00	2,70	4,80
2	2,30	3,70	3,10	4,70	3,10	4,20	2,70	7,40
3	2,40	4,20	3,10	6,50	3,30	5,70	3,30	10,30
4	3,10	5,20	3,30	8,90	4,20	6,10	3,70	12,90
5	2,90	5,40	3,50	9,60	4,10	10,60	4,20	15,00
6	3,10	6,50	4,00	11,50	4,60	7,40	4,40	14,30
7	3,30	7,10	4,20	11,80	4,50	7,20	4,60	14,60
8	3,90	6,50	4,60	12,50	4,90	8,20	4,70	15,10
9	3,90	7,70	4,60	14,70	4,90	8,50	5,00	16,30
10	3,80	8,60	4,90	15,20	4,70	9,60	5,40	18,40
11	4,20	7,70	5,10	16,50	4,80	11,40	5,60	19,20
12	4,10	9,20	5,30	17,50	5,80	11,30	5,80	23,00
13	4,20	11,10	5,60	18,20	5,00	9,90	5,80	21,30
14	3,90	10,30	5,60	18,50	5,40	14,90	5,90	21,90
15	4,20	10,60	6,00	20,30	5,40	11,80	5,80	21,80
16	4,20	11,20	6,20	22,10	5,70	14,15	6,20	23,40
17	4,30	13,90	6,40	24,00	6,20	15,70	6,20	22,70
18	4,30	14,10	6,90	22,40	5,90	21,70	6,30	23,70
19	4,30	13,70	6,80	21,80	5,80	21,90	6,40	25,50
20	4,40	13,90	6,80	22,60	5,90	22,00	7,10	26,70
21	4,80	12,70	6,90	21,10	5,50	19,60	7,00	27,80
22	4,70	14,60	7,00	22,30	6,30	25,20	7,30	28,00
23	4,50	17,20	7,00	23,90	7,00	23,30	7,60	29,90
24	4,70	15,90	7,30	25,30	6,10	22,90	7,30	29,60
25	4,70	17,90	7,00	26,80	6,70	23,90	7,50	32,90
26	4,80	11,10	7,30	28,10	6,50	25,70	7,70	33,80
27	4,60	12,80	7,30	25,40	6,30	30,90	7,90	34,80
28	4,20	10,00	7,40	22,80	6,30	30,70	8,50	33,00

Como resultado geral, nota-se que há uma tendência crescente dos valores nas propriedades de resistividade elétrica avaliadas com as idades do concreto, independentemente do tipo de cura realizada, nos dois concretos. Porém, cabe ressaltar que após 21 dias os valores obtidos em cura

úmida tendem a se manter constantes. Curas ao ar apresentaram valores de resistividades mais elevados (principalmente em idades mais avançadas) em função da condição mais seca do concreto durante a realização do ensaio, conforme ilustrado nas Figuras 4.5 e 4.6, em que são exibidas, por meio da evolução dos parâmetros de resistividade elétrica superficial e volumétrica, respectivamente, a diferença entre as medições realizadas nas duas condições de cura, para os dois concretos.

Ao mesmo tempo, a partir dos dados apresentados, infere-se que tanto para os valores de resistividade elétrica superficial, quanto volumétrica que a condição de cura nos dois concretos é significativa para a realização dos ensaios. Na condição de cura úmida, aos 28 dias, os concretos apresentam valores de resistividade coerentes com o apresentado na literatura, sendo $R_e = 4,20 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ e $R_v = 7,40 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ para o concreto C25. Já para o concreto C45 têm-se $R_e = 6,30 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ e $R_v = 8,50 \text{ k}\Omega.\text{cm}$.

Figura 4.5 - Evolução dos resultados de resistividade elétrica superficial dos concretos C25 e C45 nas condições de cura seca ao ar e cura úmida.

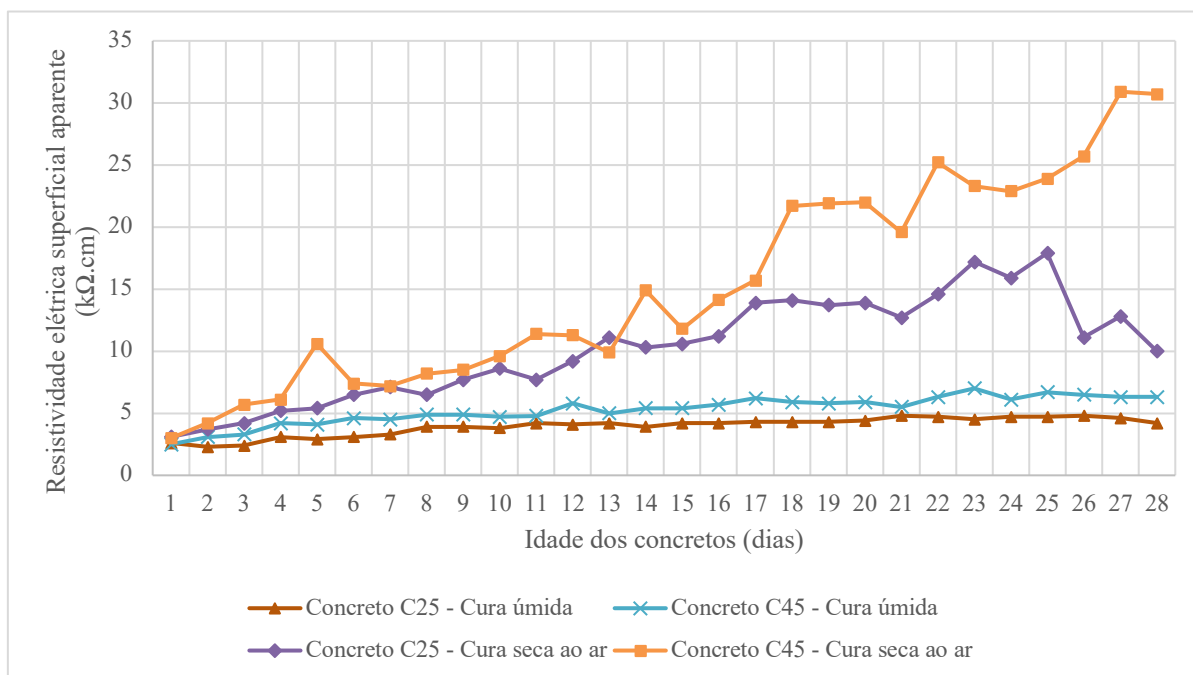
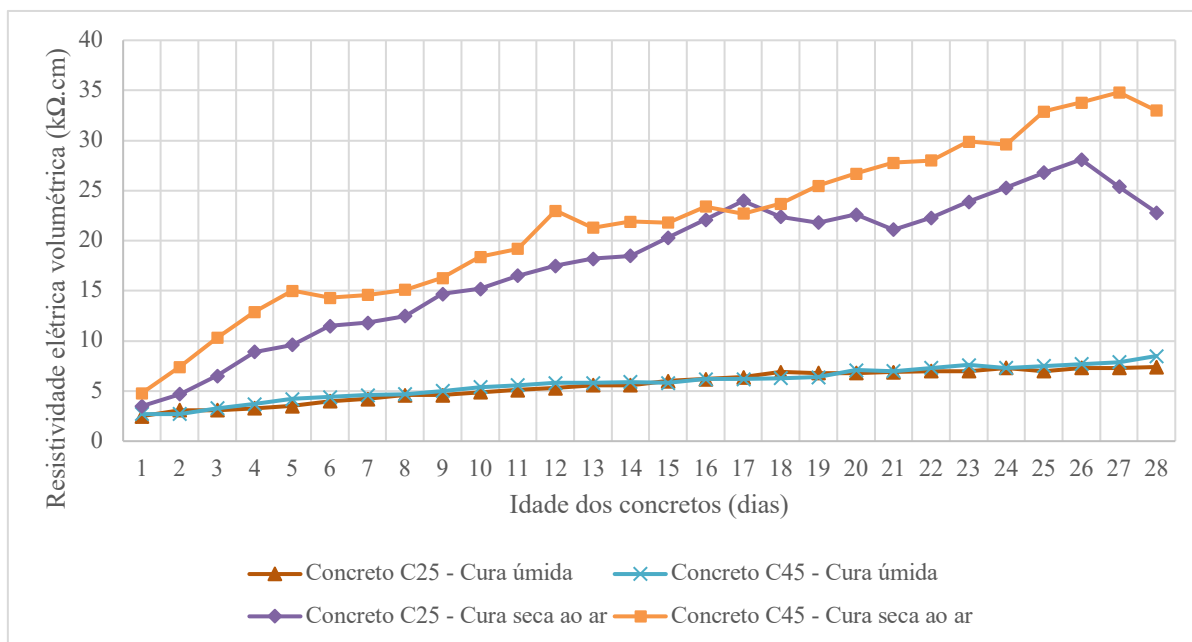


Figura 4.6 - Evolução dos resultados de resistividade elétrica volumétrica dos concretos C25 e C45 nas condições de cura seca ao ar e cura úmida.



Já na condição de cura seca ao ar, o concreto C25, apresenta valor de R_e , aos 28 dias, cerca de 2,38 vezes maior que o valor de R_e sob cura úmida. Já para o concreto C45, essa diferença é ainda maior: o valor de R_e sob cura seca ao ar é cerca de 4,87 vezes maior que sob cura úmida. Essa mesma análise feita em relação aos valores de R_v , para o concreto C25 têm-se uma diferença de 3,08 vezes, e para o concreto C45 essa diferença é de 3,88 vezes.

Este fato corrobora com a hipótese de que o ensaio de resistividade, tanto superficial quanto volumétrico, precisa ser realizado em amostras com condição de umidade próxima a 100% de saturação dos poros. O simples umedecimento da superfície ensaiada (conforme foi feito) não reproduz com fidelidade as mesmas condições de ensaio em relação aos corpos de prova em condições de cura úmida com saturação dos poros.

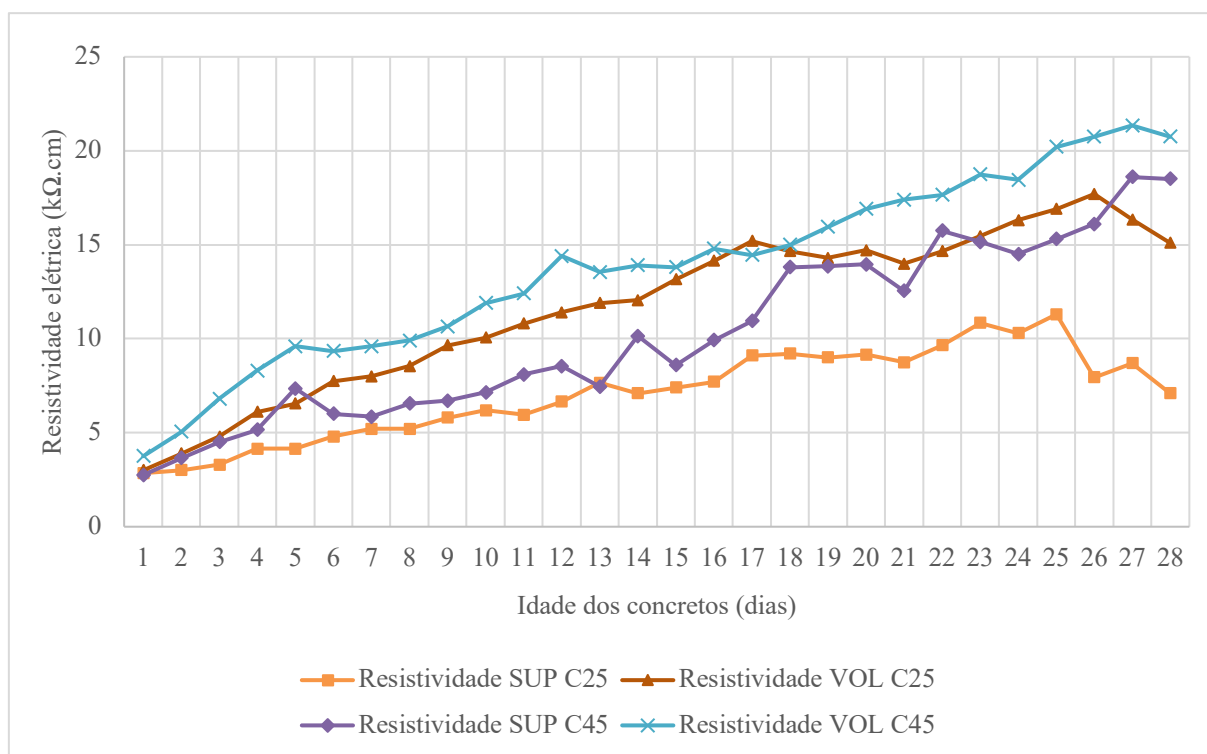
Em análise às Figuras 4.5 e 4.6, também pode-se perceber que as curvas relacionadas à cura seca ao ar possuem pontos de picos que remetem a imprecisões nas medidas, principalmente após 14 dias de idade. O efeito da condição mais seca do concreto causa interferências nas medidas, principalmente na resistividade elétrica superficial, em que essas medições oscilam bastante.

Como a resistividade é fortemente afetada pela umidade interna (grau de saturação), além do grau de ionização do eletrólito (íons na solução do poro) e de aspectos da porosidade e permeabilidade dos concretos (CASCUDO, 1997), uma forma de abordar a questão é adotar o

procedimento da NBR 9204 - Concreto Endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de Ensaio (ABNT, 2012), que faz uma média de resistividade entre dois extremos de umidade: com o concreto seco e saturado. Matematicamente essa média não teria significância, uma vez que ela seria um valor intermediário entre dois extremos, mas fisicamente esse dado tem um valor importante, pois ele representa, basicamente, a microestrutura do concreto em análise, eliminando-se o efeito da umidade. Como o grau de ionização não muda (porque não houve ataque externo aos concretos) e o efeito do grau de saturação é, desta feita, eliminado, pode-se com esses dados médios de resistividade realizar melhor as avaliações comparativas entre as variáveis do estudo. Este é um procedimento complementar às análises com 100% de umidade, com uma vantagem: ele acentua um pouco mais as diferenças entre os concretos, permitindo assim produzir melhor inferência nas avaliações comparativas.

Considerando, então, a argumentação anterior, tem-se, na Figura 4.7, um gráfico com esses dados médios de resistividade ao longo do tempo, que permite a comparação dos dois tipos de concreto (C25 e C45), quando sujeitos aos dois diferentes métodos de resistividade.

Figura 4.7 - Evolução dos resultados médios de resistividade elétrica superficial (Re) e volumétrica (Rv) dos concretos C25 e C45.



De um modo geral, observa-se que os valores médios R_e dos dois concretos estudados (C25 e C45) variam, aos 28 dias, em aproximadamente 161% entre si. Já quando se avaliam os valores de R_v entre esses dois concretos, essa diferença percentual cai para cerca de 37%.

Analisando a diferença percentual para cada concreto entre os valores obtidos pelas duas técnicas de resistividade, observa-se que tanto no C25 quanto no C45 os valores de R_v são maiores que R_e . No C25, R_v é maior em cerca de 113%. No C45 essa diferença é de 12%, aproximadamente.

Conforme comentado em tópicos anteriores, as diferentes condições de porosidade e densificação da pasta de cimento hidratada existentes nos dois concretos em estudo promovem essa diversificação nos resultados, principalmente na condição superficial. Acredita-se que essa menor diferença percentual, observada na resistividade volumétrica, dá-se pelo fato de que esta técnica (R_v) promove uma análise mais fidedigna da propriedade do material como um todo, pois minimiza a ação dos defeitos superficiais e considera, também, a interferência dos agregados (principalmente grãos) nesta determinação. Assim, como os dois concretos foram dosados com o mesmo consumo de agregados por metro cúbico de concreto, essa diferença percentual de cerca de 37% é basicamente em função das variáveis consumo de cimento, que é cerca de 13% menor no concreto C25; e relação a/c , que é 20% maior neste mesmo concreto. Se, todavia, o objetivo é avaliar as características do concreto de cobrimento, item essencial para a durabilidade da estrutura (notadamente quanto à questão dos riscos em relação à corrosão das armaduras), então a análise da resistividade elétrica aparente superficial ganha muita relevância.

Por fim, a partir dos resultados obtidos, os concretos em análise sob cura úmida podem ser classificados, aos 28 dias, sob o ponto de vista da durabilidade como de alta probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras de acordo com os critérios propostos por Polder (2000), assim como pelos critérios de avaliação propostos pelo CEB 192 e apresentados por Cascudo (1997), Abreu (1998), Hoppe (2005) e Rosa (2005).

Os estudos de Hoppe (2005) destacam a alta sensibilidade da técnica de resistividade em relação aos fatores intrínsecos relacionados à produção do concreto como relação água/cimento, consumo e tipo de cimento e agregados, aditivos e adições minerais. Assim sendo, os resultados obtidos em relação à durabilidade dos concretos em análise frente à corrosão de armaduras denotam que para a produção de estruturas em concreto mais duráveis faz-se necessário um

melhor estudo destes fatores, pois eles resultam em alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, sensibilidade à cura, entre outros.

4.1.4 Correlações entre as grandezas medidas

A partir dos resultados apresentados nos itens anteriores, foram realizadas correlações dos dados de IE, velocidade de onda ultrassônica e resistividade elétrica com os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos sob cura úmida com a finalidade de se prever, a partir de ensaios não destrutivos, os principais parâmetros de resistência do concreto e sua evolução nas idades de 1 a 28 dias.

Destaca-se que os dados apresentados foram obtidos para apenas 2 tipos de concretos e sem adições minerais. Ensaios adicionais com outros tipos de concreto, com adições minerais, com porosidades diferentes e em idades mais avançadas são necessários para uma maior amostragem, representatividade dos ensaios, extrapolação e validação das correlações obtidas neste tópico. As curvas obtidas são apresentadas nas Figuras 4.8 a 4.23 sob cura úmida.

Figura 4.8 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e resistência a compressão de concretos C25 e C45.

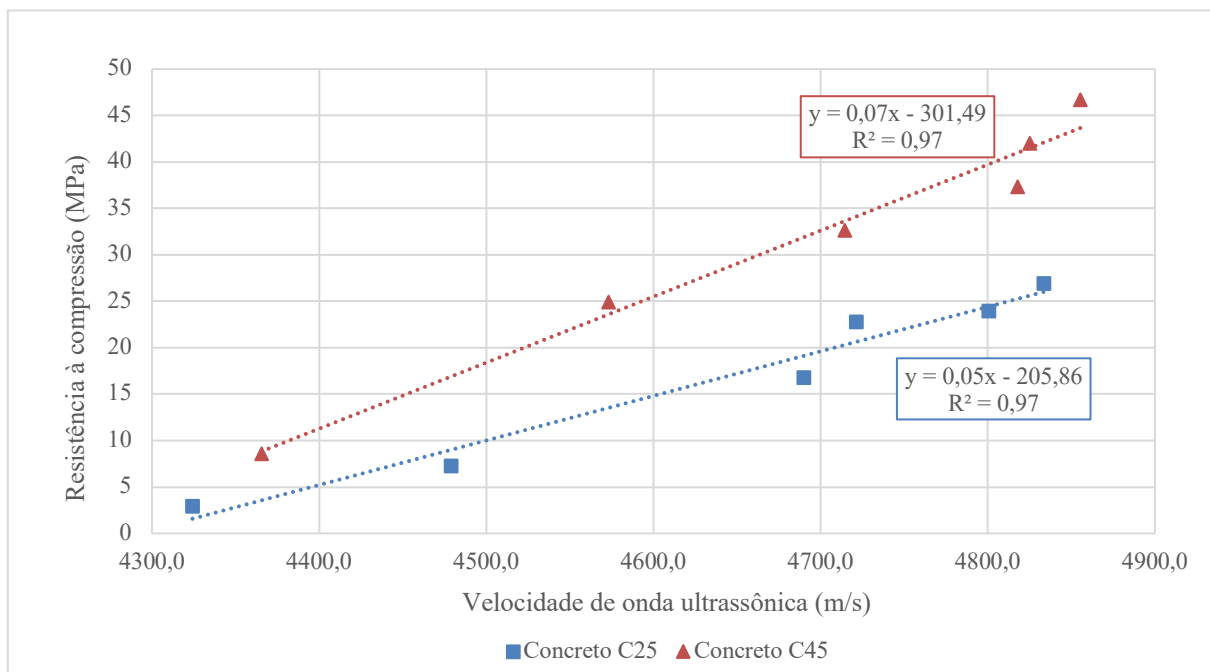


Figura 4.9 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e módulo de elasticidade estático de concretos C25 e C45.

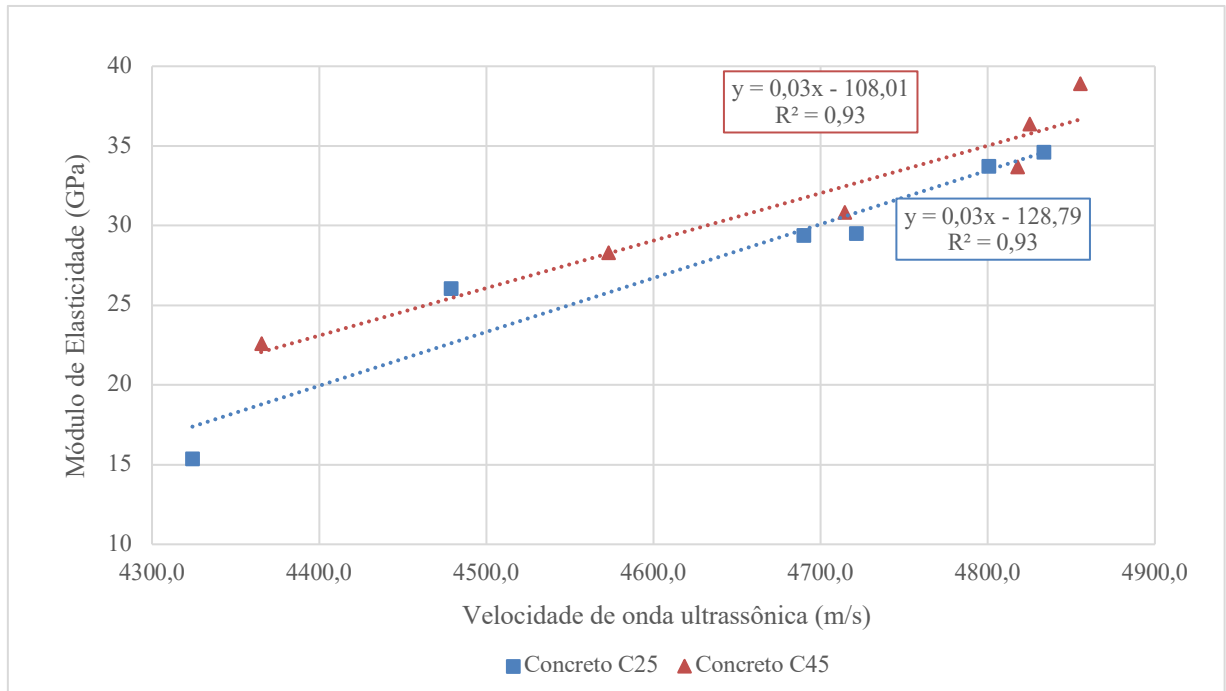


Figura 4.10 - Correlação entre índice esclerométrico e resistência a compressão de concretos C25 e C45.

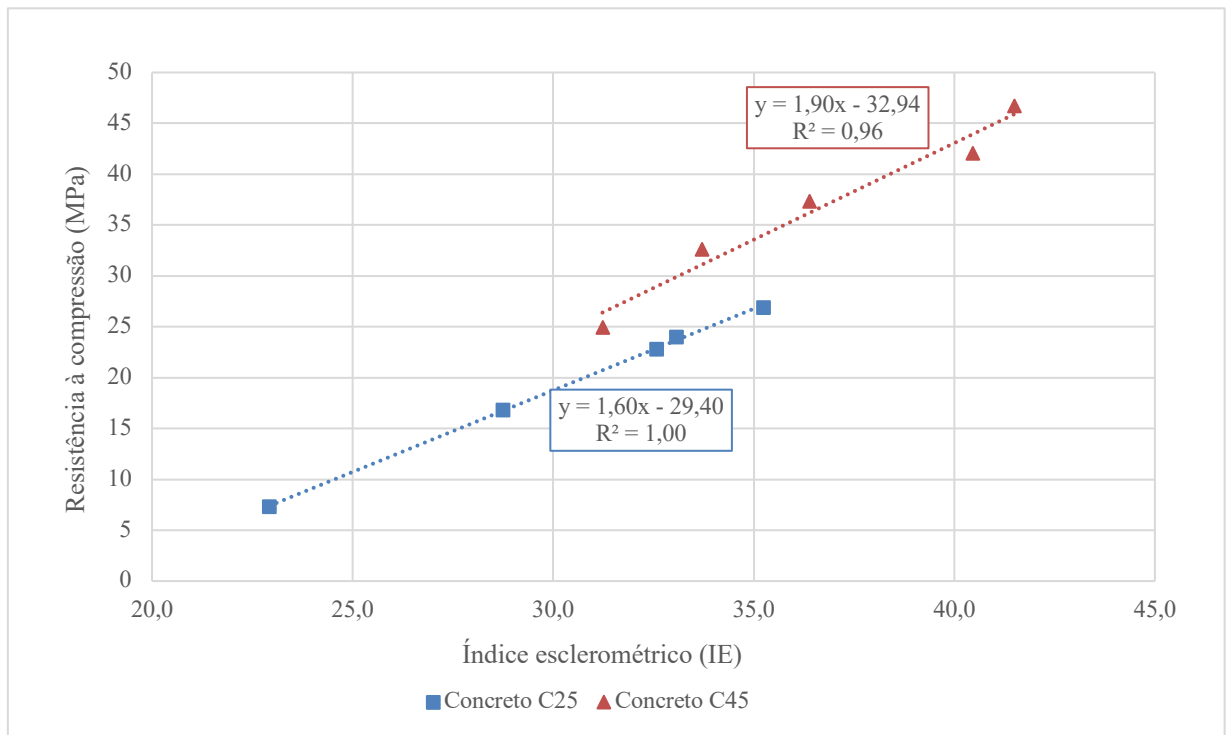
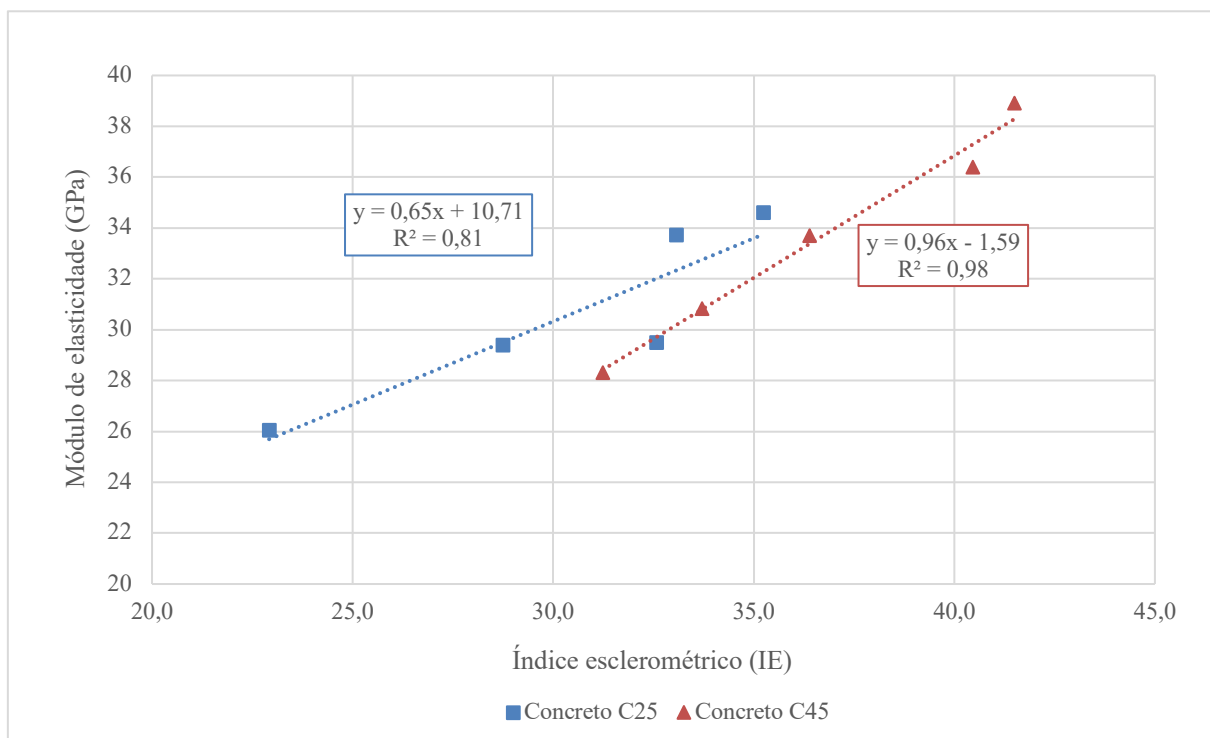


Figura 4.11 - Correlação entre índice esclerométrico e módulo de elasticidade estático de concretos C25 e C45.



As curvas de correlação entre o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica e os parâmetros de resistência mecânica sob cura úmida (Figuras 4.8 e 4.9) apresentam bons coeficientes de determinação R^2 , sendo de 0,97 para a resistência a compressão e 0,93 para o módulo de elasticidade, nos dois concretos. Esses dados corroboram a hipótese de que o ensaio de ultrassom, principalmente a metodologia direta, pode ser um bom aliado para verificação de parâmetros de resistência e homogeneidade em elementos de concreto (ABNT, 2019b), resguardadas as devidas considerações relacionadas à variabilidade inerente à execução do ensaio.

Nas Figuras 4.10 e 4.11, também são observados bons coeficientes de determinação entre IE e resistência à compressão, sendo $R^2 = 1,00$ para C25 e $R^2 = 0,96$ para C45. Nas primeiras idades ou quando se têm garantidas as condições reais das características de dureza superficial do concreto, nota-se que o ensaio de esclerometria pode estabelecer fortes correlações com a resistência a compressão do concreto.

Com relação ao parâmetro de módulo de elasticidade, todavia, observa-se o coeficiente de determinação da curva do concreto C25 menor que o do concreto C45 (0,81 e 0,98, respectivamente). Esta situação pode ser explicada em função da imprecisão da máquina de ensaio na aquisição dos baixos valores de aplicação carga e deformação dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto C25 nas primeiras idades de cura, conforme sinalizam os

coeficientes de variação de E_{cim} apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Mesmo assim, a correlação ainda pode ser considerada boa para o C25.

A partir dos resultados apresentados dos concretos em análise, pode-se inferir que os ensaios não destrutivos de IE e velocidade de propagação de onda ultrassônica apresentam boas correlações com a resistência à compressão e módulo de elasticidade nos dois concretos analisados. Em geral, na literatura, os coeficientes de determinação (R^2) obtidos com ensaios não destrutivos para concretos sem adições são da ordem de 0,8 a 1,0. Entretanto, é necessário observar que, na realidade, o concreto não é um material isotrópico. Logo, as curvas de correlação apresentadas devem ser usadas apenas para capturar uma tendência e não para se fazer o cálculo exato desses parâmetros de resistência.

Ressalta-se também que os parâmetros externos de degradação do concreto no meio em que ele está inserido também podem modificar suas condições superficiais e acabar mascarando os resultados. Como exemplo, tem-se o fenômeno da carbonatação que altera a dureza superficial e fornece valores de IE mais elevados e acabam superestimando os valores de resistência à compressão obtidos por correlação.

Levando em consideração os dois procedimentos de cura realizados, são apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.13 as correlações entre as grandezas de IE e velocidade de propagação de onda ultrassônica nos dois concretos em análise.

Figura 4.12 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.

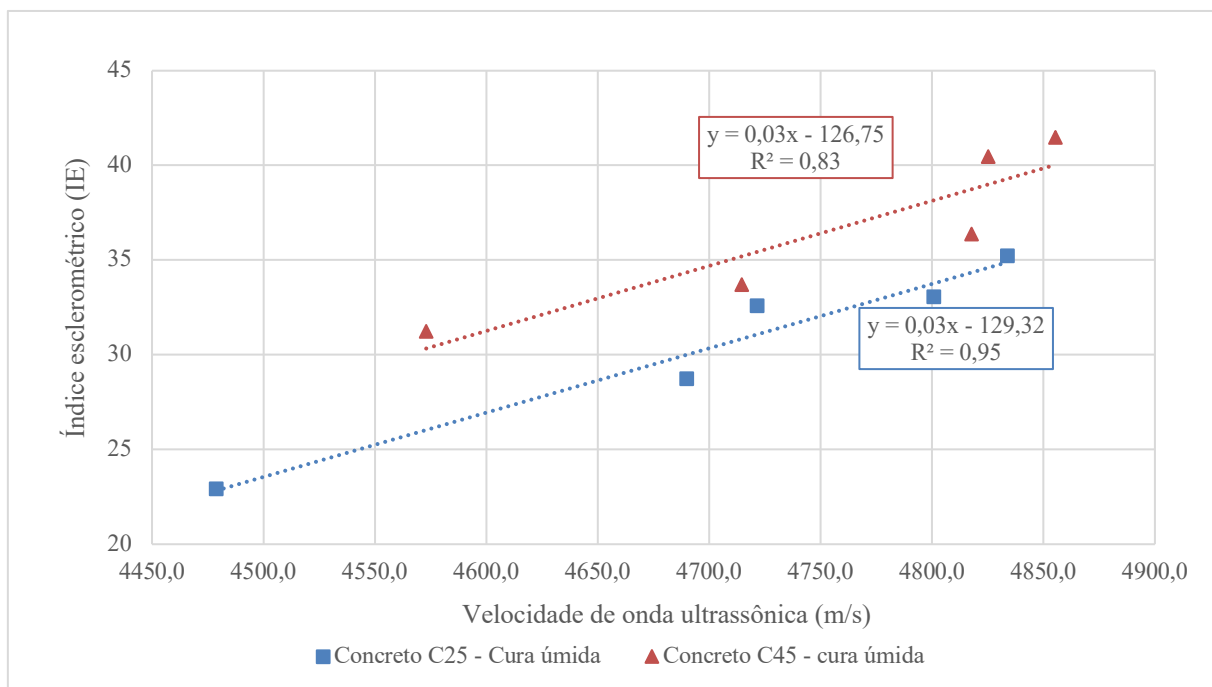
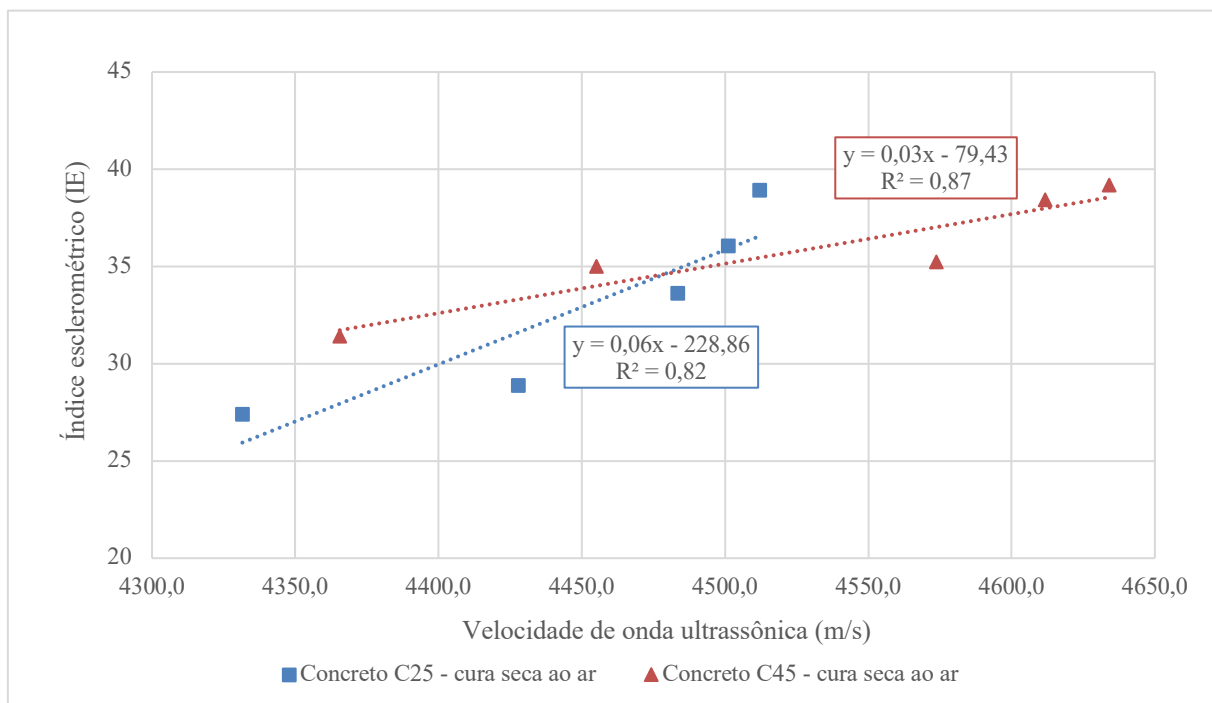


Figura 4.13 - Correlação entre velocidade de onda ultrassônica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.



Notadamente, pode-se se dizer que as grandezas de IE e Ultrassom medidas podem ser associadas entre si, uma vez que se obtiveram para o concreto C25 coeficientes de determinação R^2 de 0,95 e 0,82 e, para o concreto C45, R^2 de 0,83 e 0,87, sob as situações de cura úmida e

cura seca ao ar, respectivamente. Assim, uma grandeza poderá ser associada a outra a critérios comparativos em situações em que se pretende avaliar características do concreto sob o ponto de vista qualitativo, como a homogeneidade, formação de lotes, detecção de falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras anomalias e monitoramento de variações do concreto, decorrentes do meio de agressividade em que está inserido (ABNT, 2013).

Nas Figuras 4.14 e 4.15, são mostradas as correlações obtidas para os concretos C25 e C45 entre os ensaios não destrutivos de resistividade elétrica superficial e volumétrica *versus* resistência à compressão do concreto, sob condição de cura úmida. Essas curvas apresentam grande aplicabilidade na construção civil quando se pretende verificar, por exemplo, a evolução de parâmetros de resistência mecânica do concreto em suas idades iniciais a partir de sua resistividade elétrica

Figura 4.14 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e resistência à compressão de concretos C25 e C45.

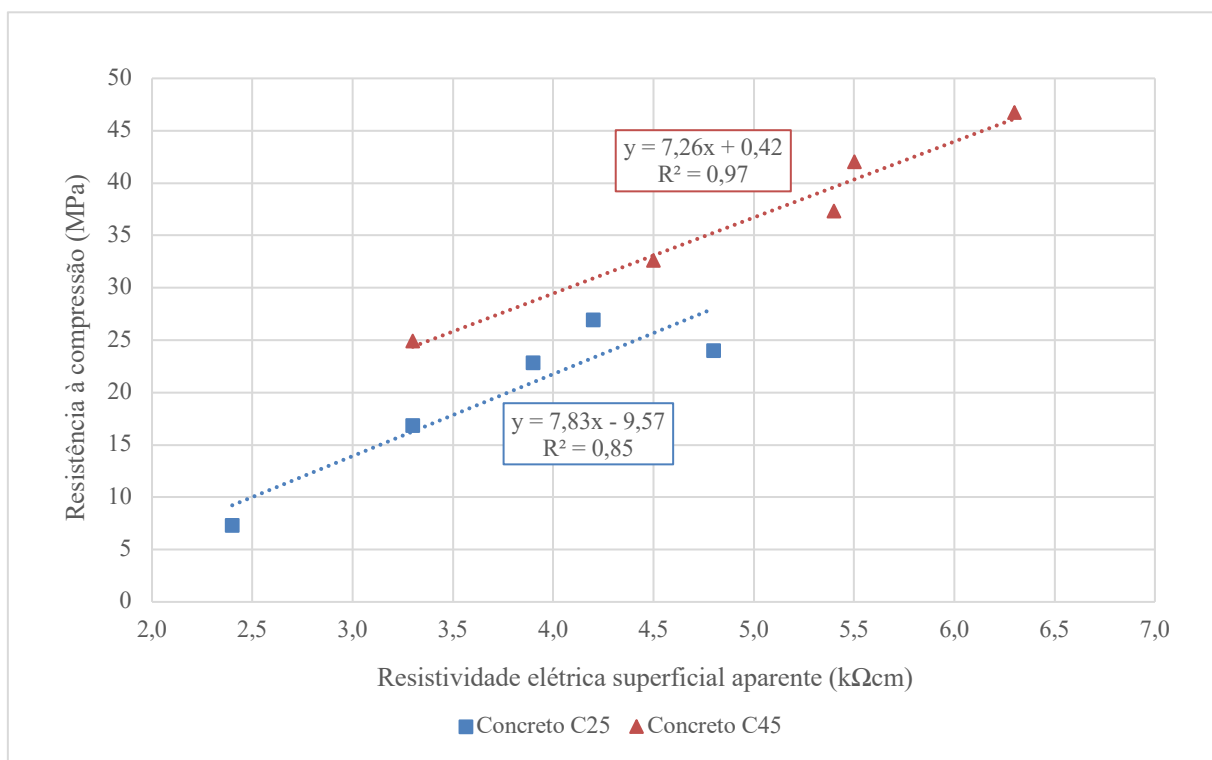
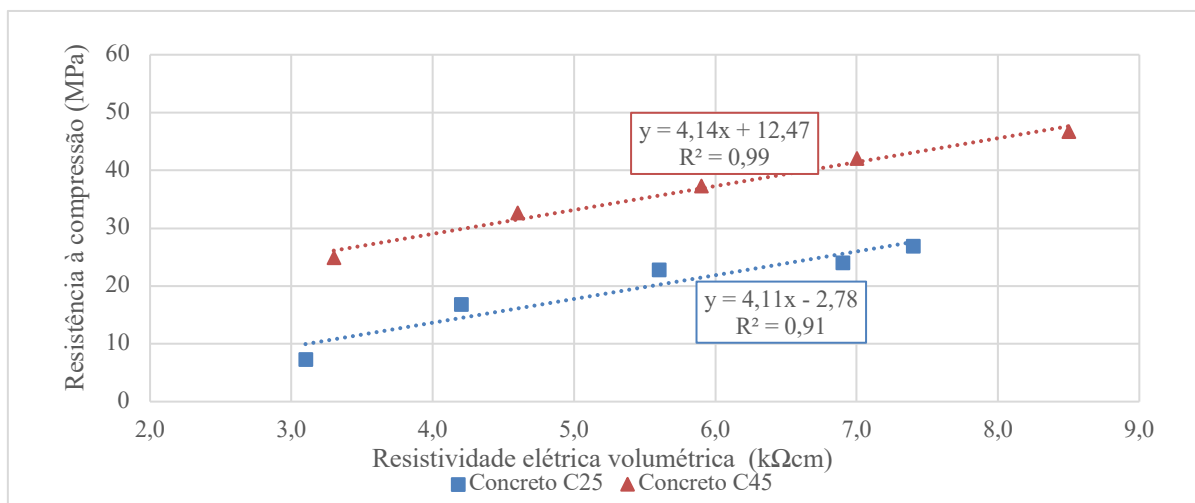


Figura 4.15 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e resistência à compressão de concretos C25 e C45.



A partir das curvas de correlação obtidas, observa-se coeficiente de determinação R^2 maior entre resistência à compressão e resistividade elétrica volumétrica nos dois concretos. Isso se deve ao fato de que, no ensaio de R_v , a corrente elétrica gerada pelo transdutor passa por todo o corpo de prova em análise. Assim, os valores obtidos referem-se não só a uma porção superficial do concreto como na R_e , mas a todo o volume do corpo de prova analisado, obtendo assim valores mais fidedignos e que estabelecem melhor correlação com outras grandezas, conforme também é demonstrado nas Figuras 4.16 a 4.19. No caso particular da correlação da resistividade com a resistência à compressão (Figuras 4.14 e 4.15), as diferenças são pequenas, já que os valores de R^2 no caso da resistividade superficial se mantêm ainda em patamares muito elevados, fato que acentua a confiabilidade das medidas de R_e .

Figura 4.16 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.

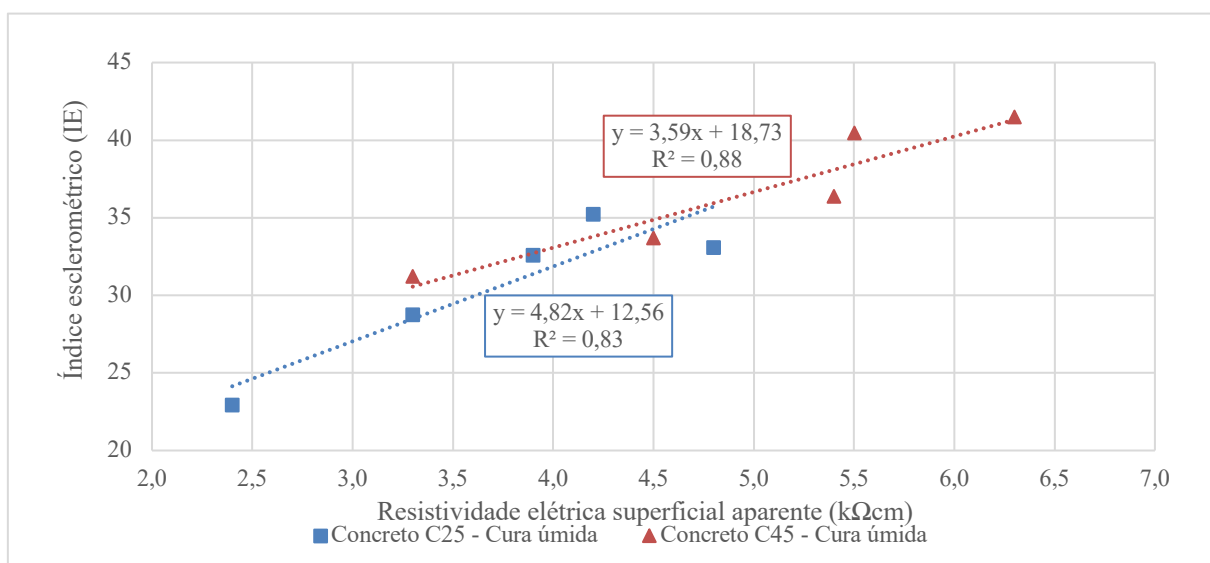
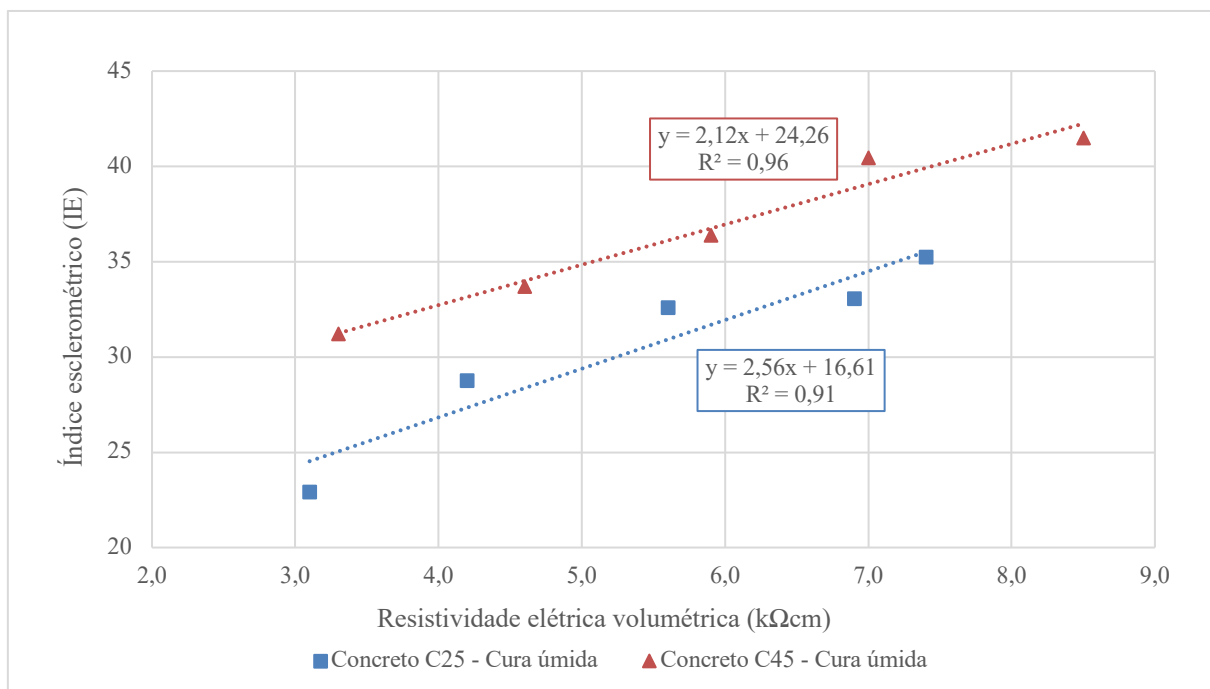


Figura 4.17 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura úmida.



Para a condição de cura úmida, os valores obtidos de R^2 entre IE e Re foram de 0,83 para o concreto C25 e 0,88 para o C45 (Figura 4.16). Já para IE e Rv obteve-se R^2 de 0,91 para o C25 e 0,96 para o C45 (Figura 4.17).

Figura 4.18 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.

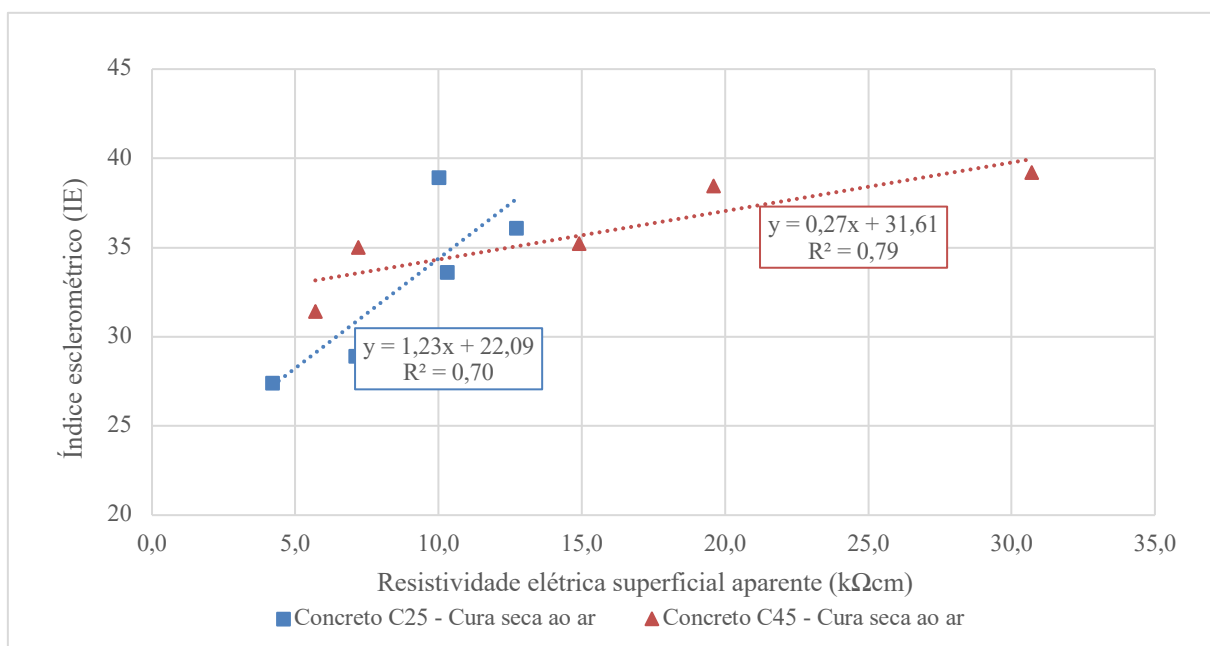
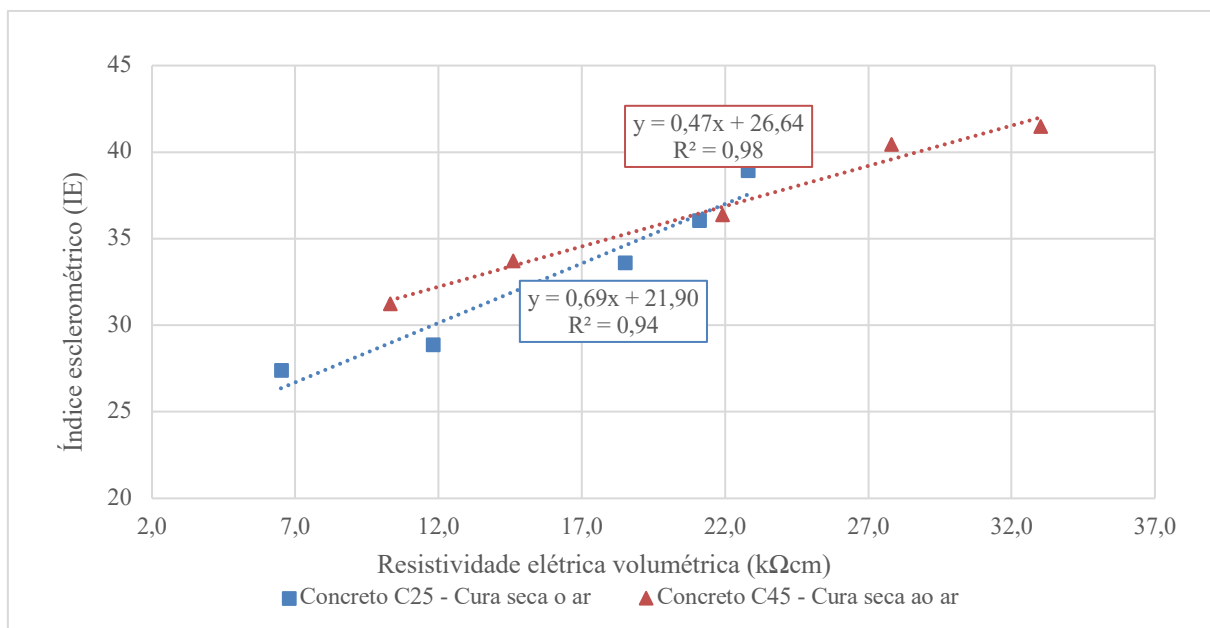


Figura 4.19 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e índice esclerométrico de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.



Assim como para a condição de cura úmida, quando se analisam os valores de R^2 obtidos entre IE e os dois tipos de resistividade elétrica, conforme apresentado nas Figuras 4.18 e 4.19 na condição de cura seca ao ar, nota-se a vantagem do método volumétrico em relação ao superficial. Tal evidência também é percebida nas curvas de correlação apresentadas nas Figuras 4.22 e 4.23, em que se obtêm maiores valores de coeficientes de determinação entre velocidade de onda ultrassônica e resistividade elétrica sob a condição de cura seca ao ar, quando feito pelo método volumétrico.

Figura 4.20 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura úmida.

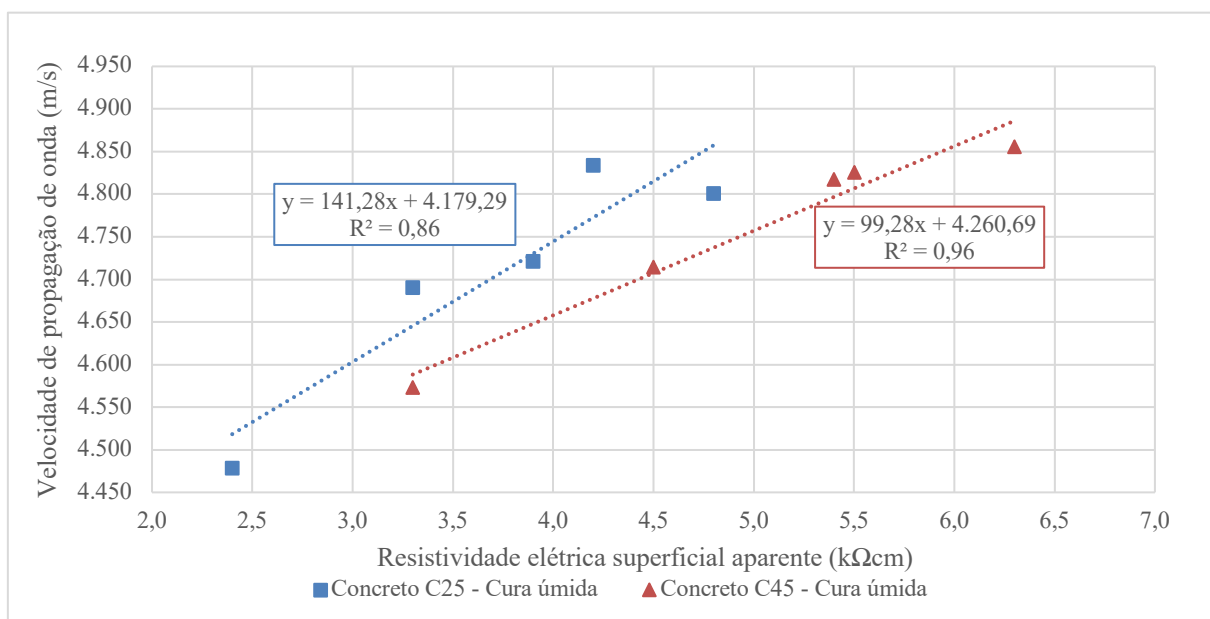


Figura 4.21 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura úmida.

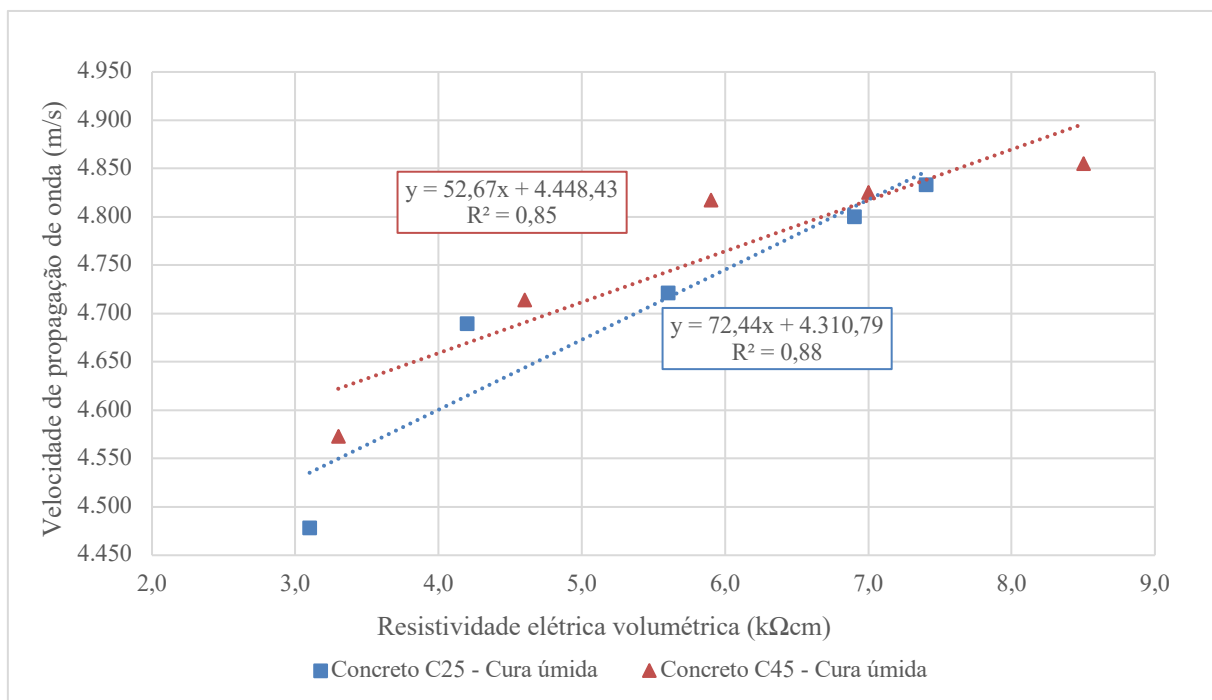


Figura 4.22 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.

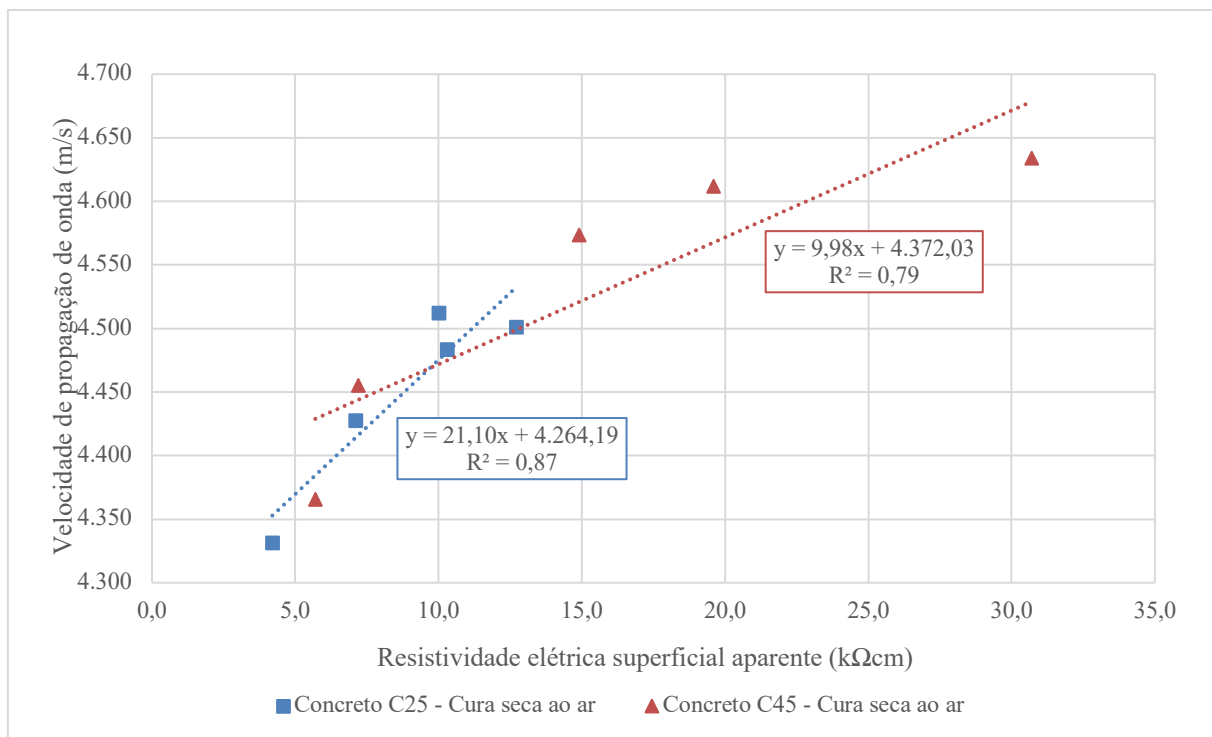
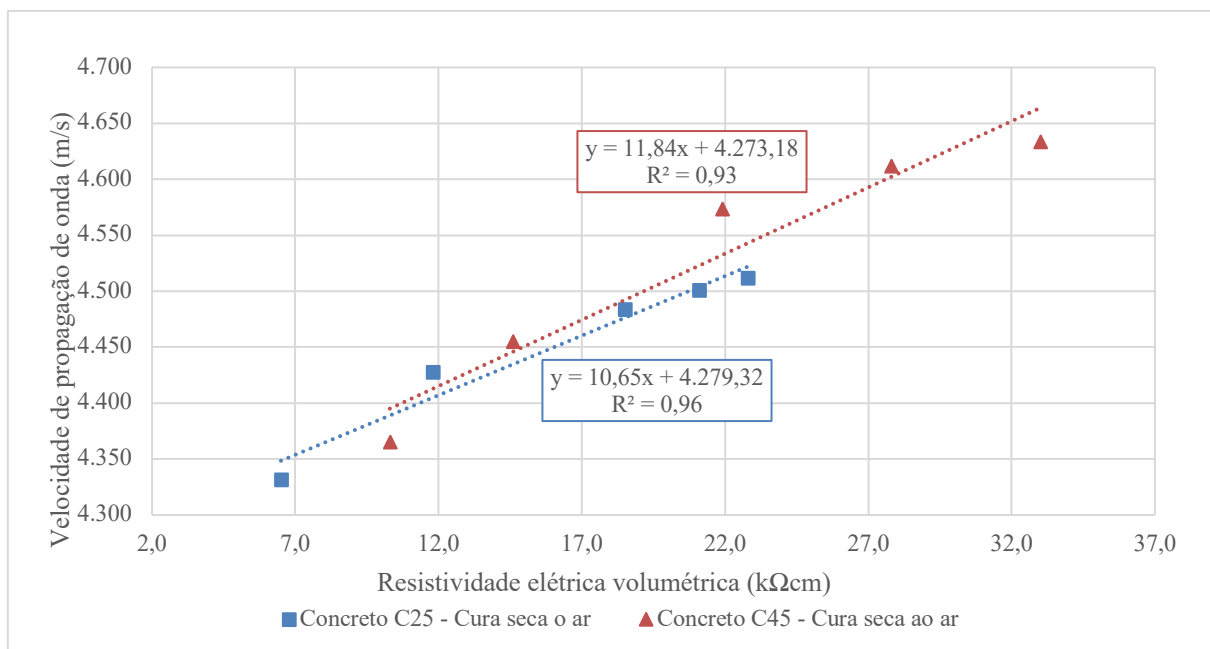


Figura 4.23 - Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos C25 e C45 sob cura seca ao ar.



Assim, fica evidente que independentemente do método de cura empregado, e nos dois concretos analisados, a resistividade elétrica volumétrica mostra-se como uma importante ferramenta e estabelece boas correlações com outras grandezas destrutivas e não destrutivas. Em linhas gerais, na maioria das correlações geradas, obteve-se um melhor coeficiente de determinação R^2 para resistividade elétrica volumétrica em relação à resistividade elétrica superficial. O resumo das equações e correlações obtidas é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Resumo das equações e correlações obtidas entre os ensaios destrutivos e não destrutivos.

Grandezas correlacionadas	Concreto	Condição de cura	Equação	R^2
Ultrassom x Resistência à compressão	C25	Úmida	$f(x) = 0,05x - 205,86$	0,97
	C45	Úmida	$f(x) = 0,07x - 301,49$	0,97
Ultrassom x Módulo de Elasticidade	C25	Úmida	$f(x) = 0,03x - 128,79$	0,93
	C45	Úmida	$f(x) = 0,03x - 108,01$	0,93
Índice esclerométrico x Resistência à compressão	C25	Úmida	$f(x) = 1,60x - 29,40$	1,00
	C45	Úmida	$f(x) = 1,90x - 32,94$	0,96
Índice esclerométrico x Módulo de Elasticidade	C25	Úmida	$f(x) = 0,65x + 10,71$	0,81
	C45	Úmida	$f(x) = 0,96x - 1,59$	0,98
Ultrassom x Índice esclerométrico	C25	Úmida	$f(x) = 0,03x - 129,32$	0,95
	C45	Úmida	$f(x) = 0,03x - 126,75$	0,83
	C25	Seca ao ar	$f(x) = 0,06x - 228,86$	0,82
	C45	Seca ao ar	$f(x) = 0,03x - 79,43$	0,87

Resistividade elétrica superficial x Resistência à compressão	C25	Úmida	$f(x) = 7,83x - 9,57$	0,85
	C45	Úmida	$f(x) = 7,26x + 0,42$	0,97
Resistividade elétrica volumétrica x Resistência à compressão	C25	Úmida	$f(x) = 4,11x - 2,78$	0,91
	C45	Úmida	$f(x) = 4,14x - 12,47$	0,99
Resistividade elétrica superficial x Índice esclerométrico	C25	Úmida	$f(x) = 4,82x + 12,56$	0,83
	C45	Úmida	$f(x) = 3,59x + 18,73$	0,88
	C25	Seca ao ar	$f(x) = 1,23x + 22,09$	0,70
	C45	Seca ao ar	$f(x) = 0,27x + 31,61$	0,79
Resistividade elétrica volumétrica x Índice esclerométrico	C25	Úmida	$f(x) = 2,56x + 16,61$	0,91
	C45	Úmida	$f(x) = 2,12x + 24,26$	0,96
	C25	Seca ao ar	$f(x) = 0,69x + 21,90$	0,94
	C45	Seca ao ar	$f(x) = 0,47x + 26,64$	0,98
Resistividade elétrica superficial x Ultrassom	C25	Úmida	$f(x) = 141,28x + 4179,29$	0,86
	C45	Úmida	$f(x) = 99,28x + 4260,69$	0,96
	C25	Seca ao ar	$f(x) = 21,10x + 4264,19$	0,87
	C45	Seca ao ar	$f(x) = 9,98x + 4372,03$	0,79
Resistividade elétrica volumétrica x Ultrassom	C25	Úmida	$f(x) = 72,44x + 4310,79$	0,88
	C45	Úmida	$f(x) = 52,67x + 4448,43$	0,85
	C25	Seca ao ar	$f(x) = 10,65x + 4279,32$	0,96
	C45	Seca ao ar	$f(x) = 11,84x + 4733,18$	0,93

Em relação aos resultados de resistividade, nota-se que dentre as curvas apresentadas, a que apresenta melhor coeficiente de determinação com a resistência à compressão e demais grandezas medidas é a de resistividade elétrica volumétrica, tanto para o concreto C25 quanto para o C45. Isso se deve ao fato de o ensaio superficial trazer consigo incertezas relacionadas às condições da superfície do elemento analisado, principalmente quando comparado ao ensaio volumétrico. Contudo, os resultados obtidos não invalidam as medidas superficiais de resistividade, pelo menos não até a idade analisada (28 dias).

4.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DANOS NO CONCRETO

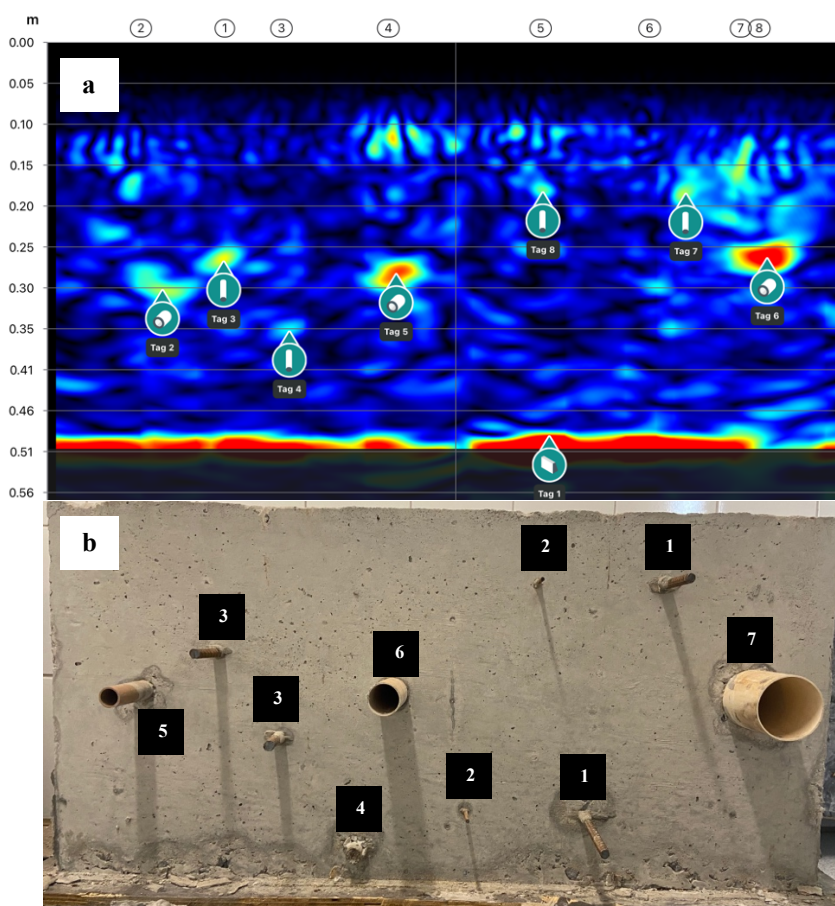
Com a finalidade de validar a utilização do tomógrafo ultrassônico e do radar GPR para detecção de elementos e potenciais defeitos internos em estruturas de concreto, nos itens que seguem tem-se a descrição dos resultados obtidos a partir da utilização destes equipamentos para detecção de barras e tubos de PVC nos blocos de concreto, assim como visando à detecção dos defeitos simulados nas placas produzidas com os concretos C25 e C45.

4.2.1 Detecção de barras e tubos em blocos de concreto

a) Detecção por tomografia ultrassônica

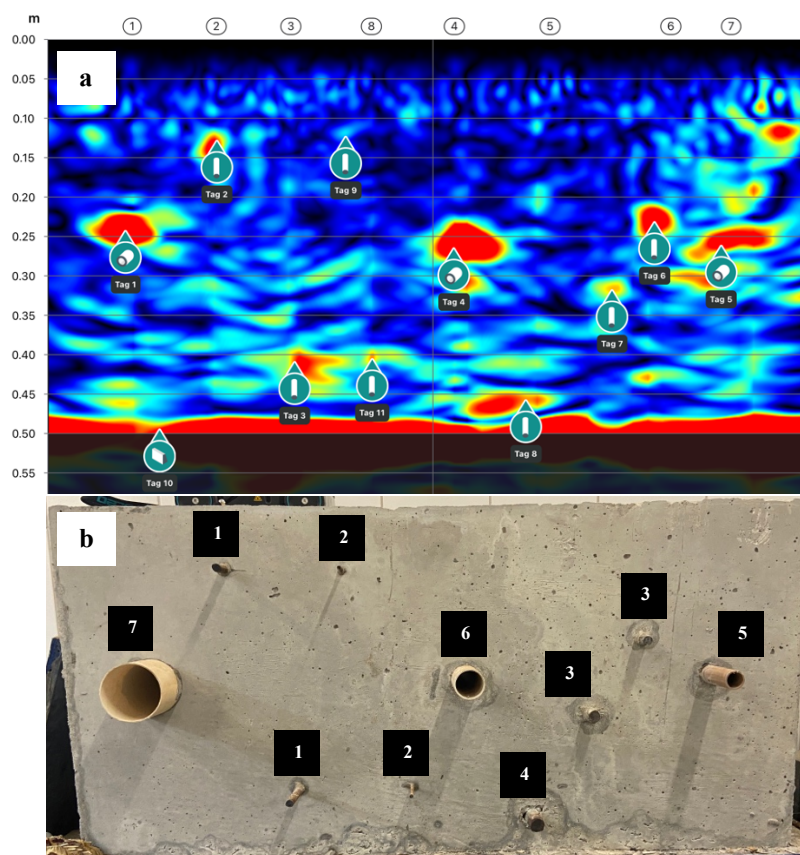
A partir da varredura na superfície dos blocos C25 e C45 para detecção de barras metálicas e tubos presentes em seu interior por meio do tomógrafo ultrassônico, obtiveram-se os tomogramas apresentados nas Figuras 4.24-a e 4.25-a, respectivamente. Para melhor entendimento dos resultados obtidos, apresenta-se complementarmente, abaixo de cada tomograma, o registro fotográfico de cada bloco analisado, para percepção visual dos elementos (barras e tubos) ora identificados pelo tomógrafo ultrassônico (Figuras 4.24-b e 4.25-b)

Figura 4.24 – Imagem de tomografia ultrassônica (a) e foto lateral (b) do Bloco C25



Legenda (Figura b): 1- Barras de \varnothing 10 mm, 2- Barras de \varnothing 5 mm, 3- Barras de \varnothing 12,5 mm, 4- Barra de \varnothing 20 mm, 5- Tubo PVC \varnothing 25 mm, 6- Tubo PVC \varnothing 40 mm, 7- Tubo PVC \varnothing 75 mm.

Figura 4.25 - Imagem de tomografia ultrassônica (a) e foto lateral (b) do Bloco C45



Legenda (b): 1- Barras de \varnothing 10 mm, 2- Barras de \varnothing 5 mm, 3- Barras de \varnothing 12,5 mm, 4- Barra de \varnothing 20 mm, 5- Tubo PVC \varnothing 25 mm, 6- Tubo PVC \varnothing 40 mm, 7- Tubo PVC \varnothing 75 mm.

Na interpretação dos tomogramas gerados, tem-se que para o concreto C25 foi possível a identificação das barras e tubos situados até, aproximadamente, 35 cm de profundidade. Um fator que pode atrapalhar as leituras de identificação de barras, por exemplo, são as interferências detectadas pelo equipamento a partir das variações de densidade, juntas, ninhos de concretagem e heterogeneidades do material presentes no interior dos elementos analisados. Como se percebe em destaque nas Figuras 4.26 e 4.27, há algumas manchas com coloração amarelo-esverdeadas no tomograma dos concretos C25 e C45 que indicam essas interferências relacionadas ao concreto.

Figura 4.26 - Interferências nas leituras de termografia ultrassônica no bloco C25: heterogeneidades do concreto.

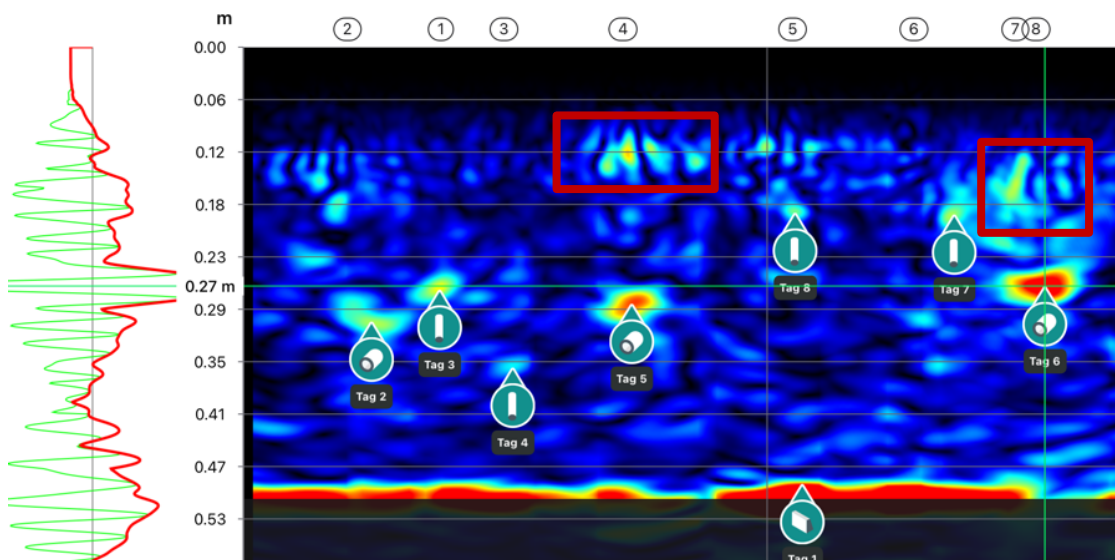
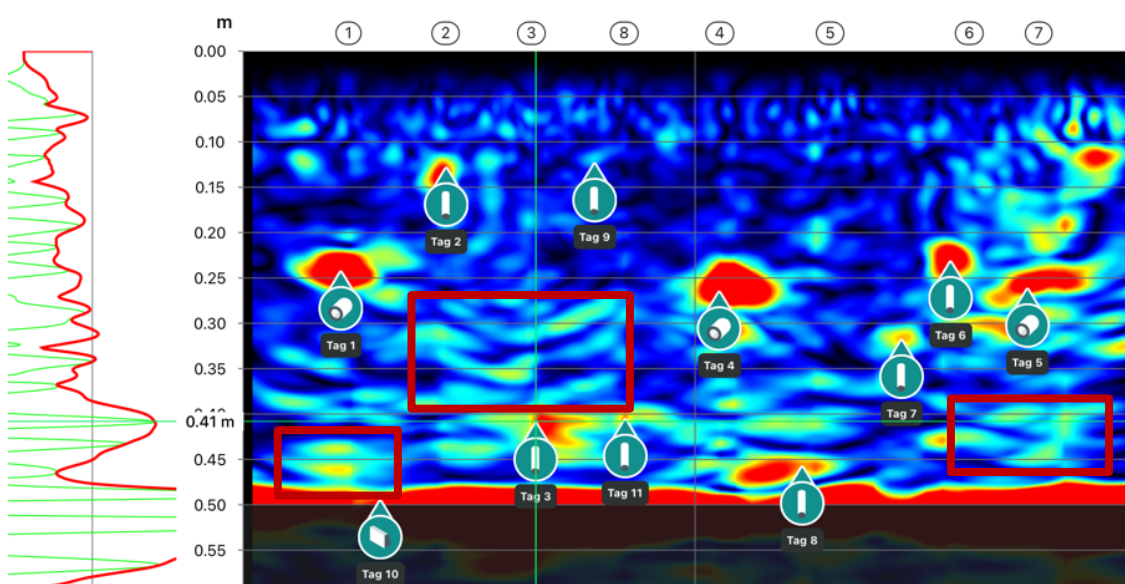


Figura 4.27 - Interferências nas leituras de termografia ultrassônica no bloco C45: heterogeneidades do concreto.



Grande parte das interferências verificadas próximas à superfície superior ao longo dos blocos analisados (conforme destacado na Figura 4.28) diz respeito aos ruídos gerados pela perda de sinal do sensor, em função da rugosidade ou irregularidade da superfície analisada. A Figura 4.29 ilustra bem essa situação, em que se percebe que nem todos os transdutores do equipamento conseguem encostar plenamente na face do elemento analisado.

Figura 4.28 – Termografia ultrassônica no bloco C25: ruído de superfície gerado.

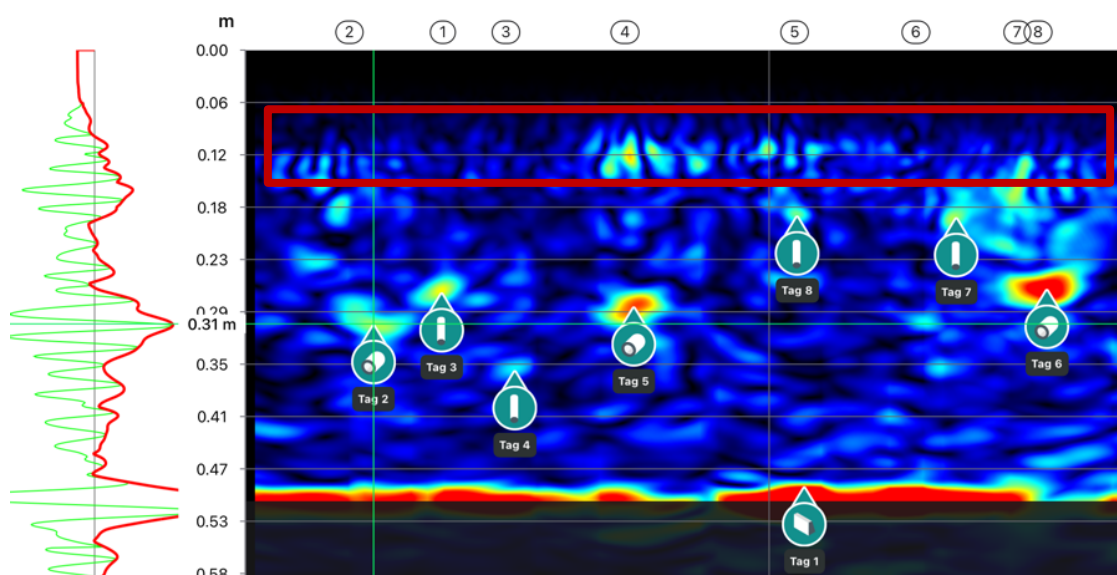


Figura 4.29 - Contato dos transdutores do tomógrafo ultrassônico com o elemento de concreto em análise.



Cabe ressaltar-se, ainda, que o tomógrafo ultrassônico mostrou-se bastante eficaz na identificação da espessura dos elementos em análise, o que pôde ser verificado pelo maior pico de onda detectado pelo equipamento, representando a face posterior do elemento, conforme sinalizado pela *Tag 1* na Figura 4.30, e na *Tag 10* da Figura 4.31.

Figura 4.30 - Tomografia ultrassônica do bloco C25: identificação de picos de onda.

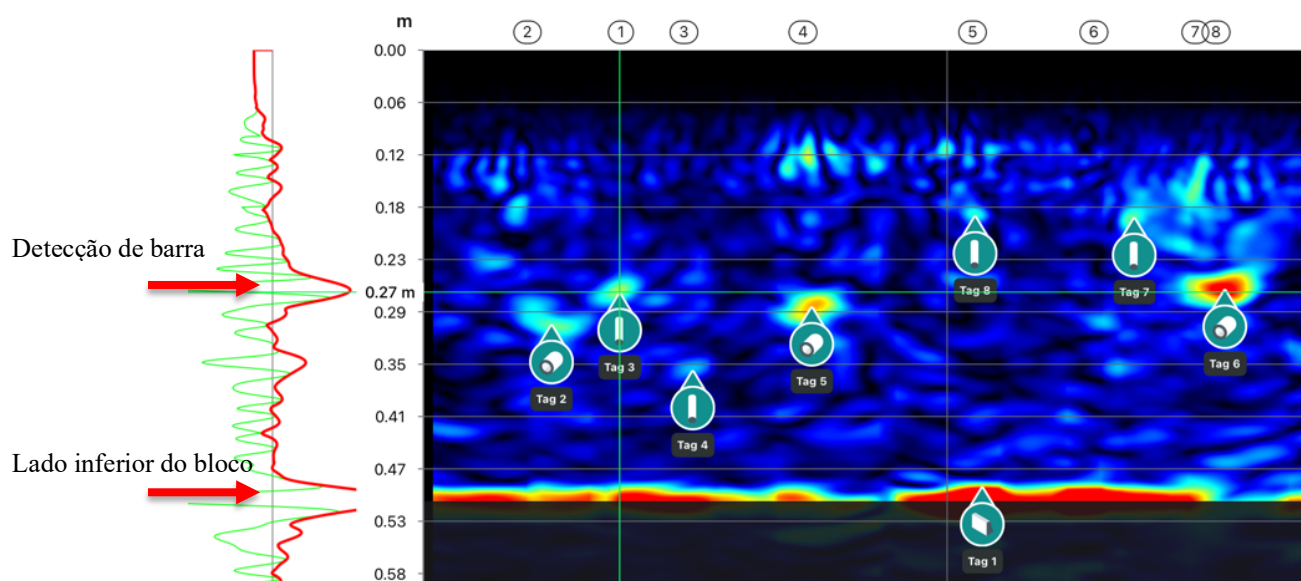
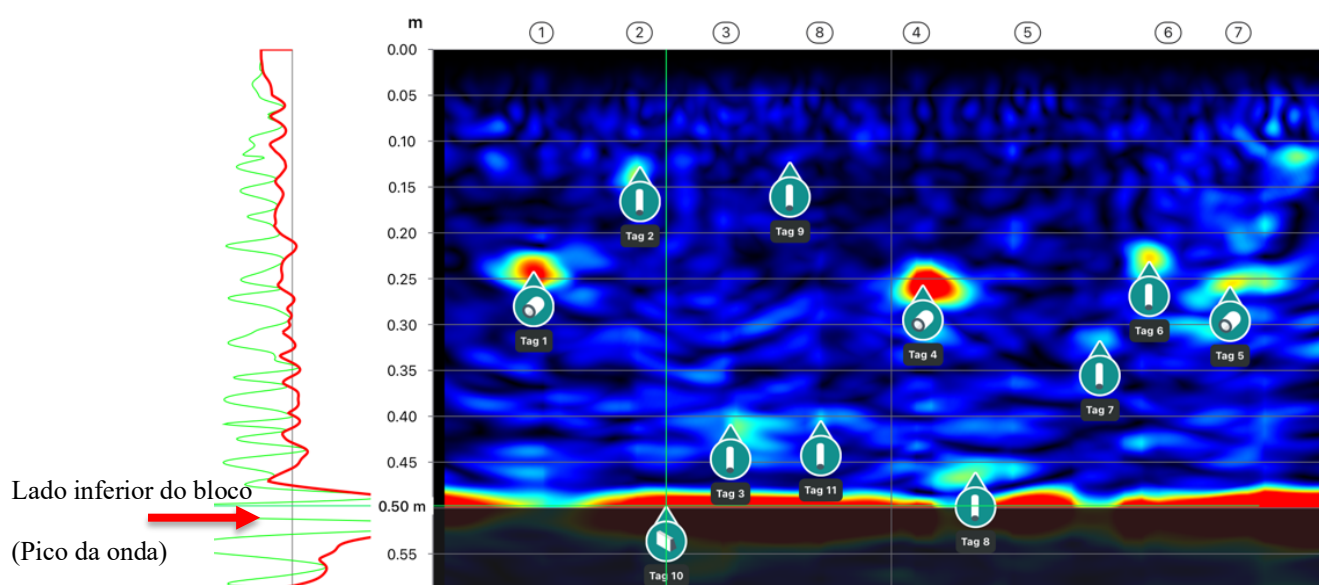


Figura 4.31 - Tomografia ultrassônica do bloco C45: identificação de picos de onda.



Assim, de uma maneira geral, pode-se dizer que na detecção de barras de aço e tubos vazados localizados no interior dos blocos de concreto C25 e C45, o tomógrafo ultrassônico demonstra boa precisão para localizar a posição dos elementos internos ao concreto. Entretanto, nota-se que não há uma boa precisão para determinação do diâmetro e tamanho real destes elementos. O que se tem é, basicamente, uma noção da presença do elemento interno, com alguma indicação qualitativa das dimensões desse elemento.

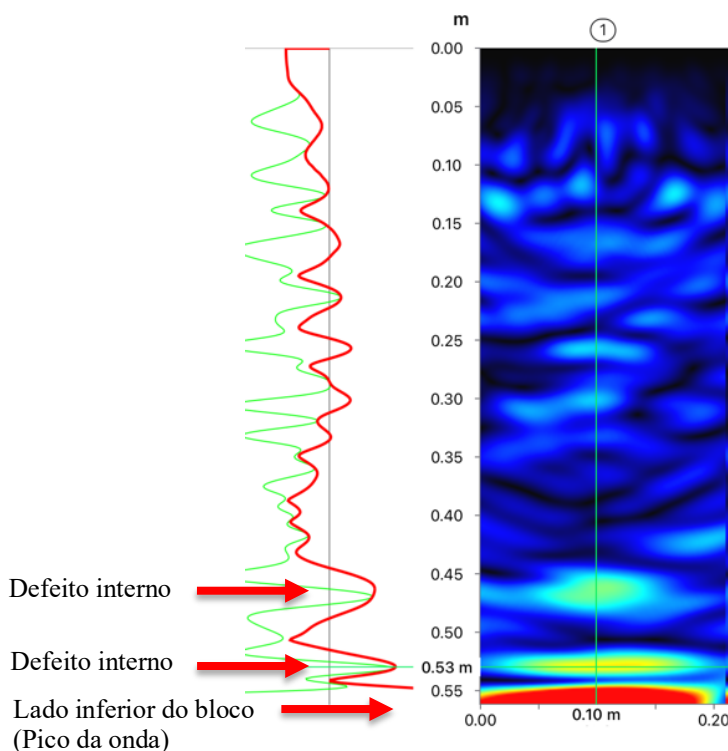
Cabe ressaltar também que o equipamento se mostrou mais eficaz para detecção de elementos internos ao bloco C45 do que o C25. Uma explicação é que o pulso ultrassônico permeia com

maior facilidade em meios mais densos e menos porosos, que é o caso do concreto C45, conforme caracterização apresentada em capítulos anteriores. No concreto C25, por exemplo, algumas barras localizadas na parte inferior do bloco não foram possíveis de serem identificadas pela tomografia ultrassônica.

Já no concreto C45, não só todos os elementos inseridos internamente foram identificados, mas também alguns pontos com maior probabilidade de não-homogeneidade do concreto. Uma vez que o meio em que a onda se propaga apresenta-se mais denso, o gradiente de densidade na presença um vazio ou ninho de concretagem, por exemplo, torna-se também maior. Assim, a localização e identificação do elemento ou dano é mais precisa e visualmente mais fácil de ser verificada.

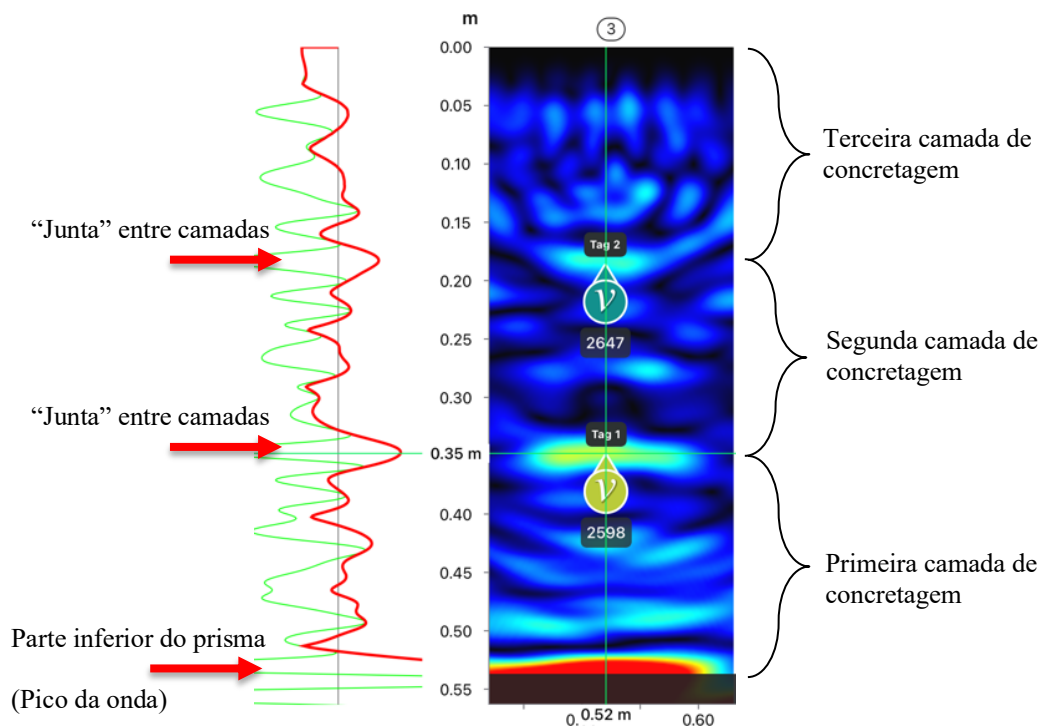
Tal fato pôde ser constatado também nos prismas C25 e C45 em que foram realizados os ensaios de tomografia ultrassônica. No prisma C25, alguns pequenos defeitos pontuais puderam ser detectados relacionados à sua produção próximo à sua base, indicando problemas relacionados ao adensamento do concreto na profundidade de aproximadamente 47 cm e 53 cm, conforme ilustra a Figura 4.32.

Figura 4.32 – Tomografia ultrassônica no prisma C25: detecção de defeitos internos.



Já no bloco C45, as alturas das camadas de concretagem puderam ser detectadas com bastante precisão pela técnica de tomografia ultrassônica, conforme indicado na Figura 4.33.

Figura 4.33 – Tomografia ultrassônica no prisma C45: percepção das camadas de concretagem.



b) Detecção por radar GPR

Realizando as mesmas varreduras nos blocos com o uso do radar GPR, foram obtidos os radargramas apresentados nas Figuras 4.34 e 4.35.

Figura 4.34 – Uso do radar GPR no bloco C25.

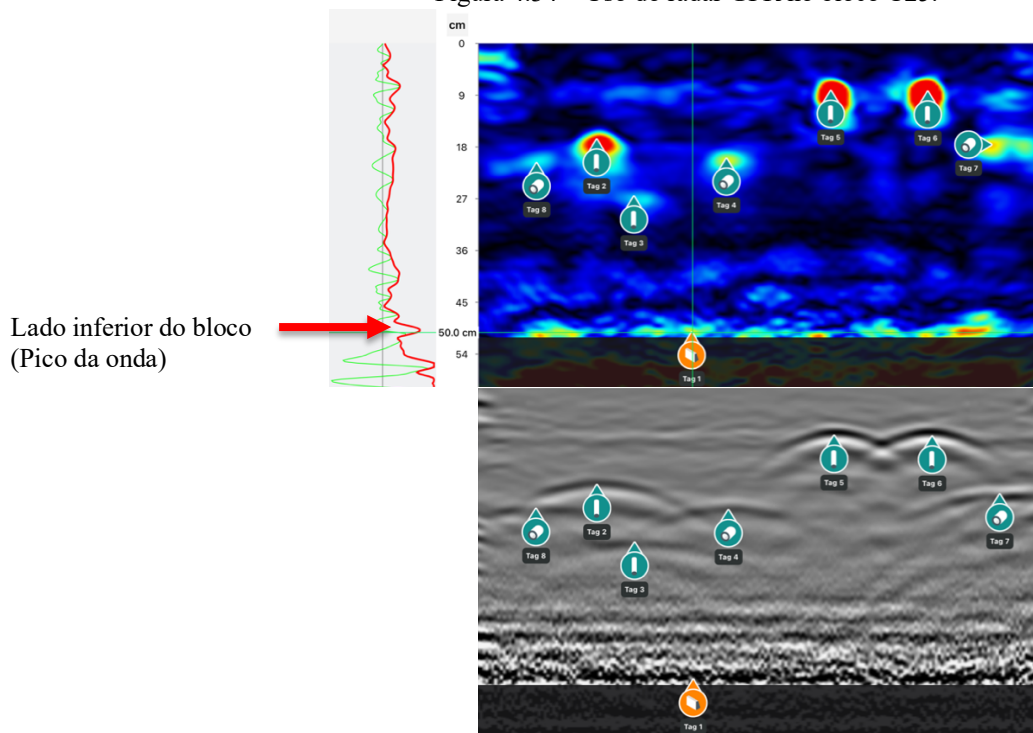
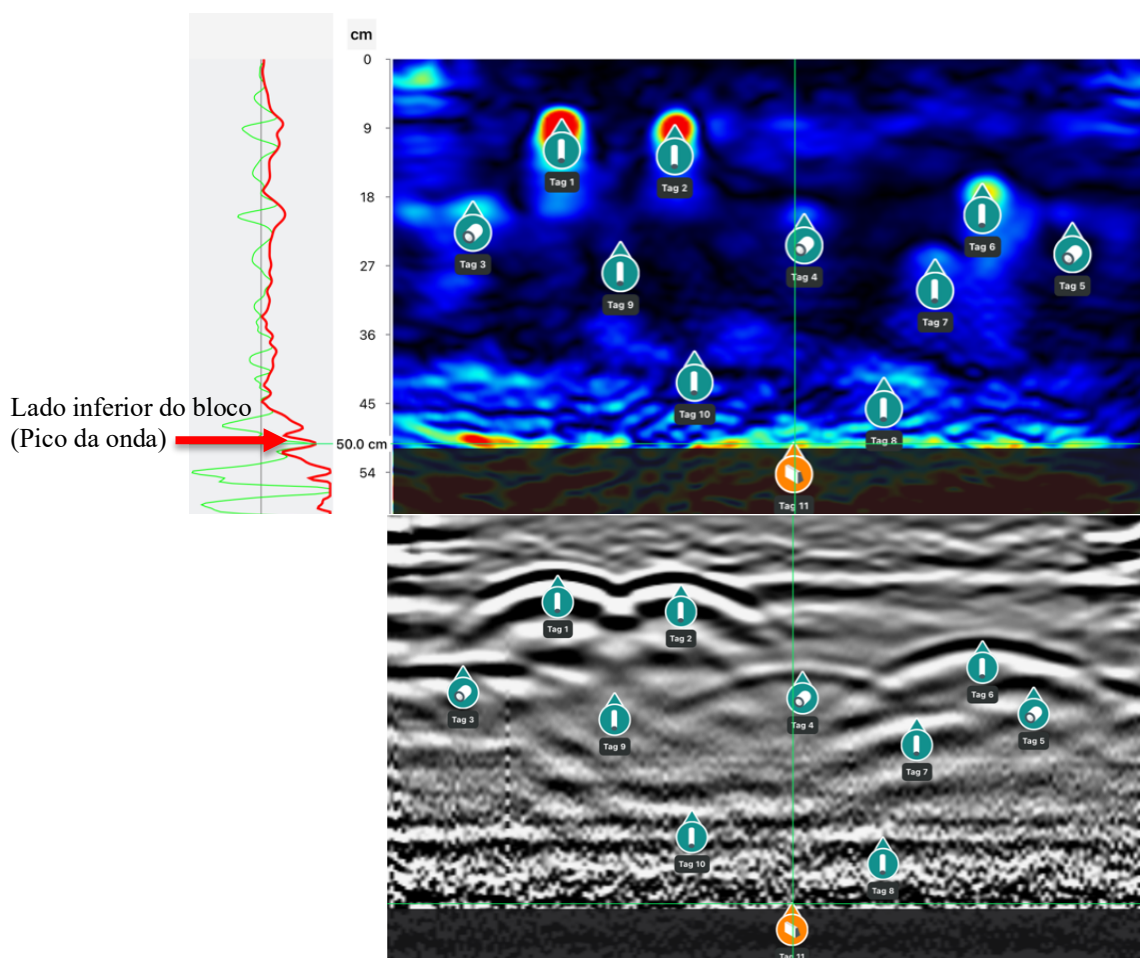


Figura 4.35 – Uso do radar GPR no bloco C45.



A partir das imagens geradas, pôde-se perceber que o radar GPR é bastante sensível para detecção de armaduras, porém não é possível determinar com precisão o diâmetro dessas barras, conforme mostram as Figuras 4.34 (*Tag 5 e Tag 6*) e 4.35 (*Tag 1 e Tag 2*), em que duas barras de diâmetros diferentes não se diferem em suas representações, nos radargramas gerados. Da mesma forma, o equipamento não faz distinção se o defeito localizado diz respeito a uma barra, um tubo ou um vazio interno, cabendo ao operador a interpretação do que lhe é apresentado no radargrama, como, por exemplo, as *Tags 4 e 6* da Figura 4.35.

Assim como na Tomografia, o radar GPR também se mostrou mais eficaz para detecção de elementos internos ao bloco C45 do que o C25. Logo, as barras situadas a partir de 36 cm de profundidade no interior do bloco C25 também não puderam ser identificadas (coloração predominante azul escura e sem nenhuma interferência visualizada nas prospecção de ondas). Já no bloco C45, foi possível a identificação com boa precisão de todos os elementos internos ao concreto. Assim como trazido pelo próprio fabricante do equipamento utilizado, a técnica de radar GPR mostra-se muito eficiente para detectar objetos de metal como vergalhões, uma

vez que as ondas, ao atingirem o metal, refletem 100% seu sinal, gerando, assim, a recepção pelas antenas de um sinal muito forte. Quando a onda (de natureza eletromagnética) atinge um espaço vazio no interior do concreto, apenas parte dela é refletida de volta, gerando assim uma detecção menos precisa em função de um sinal mais fraco captado pelas antenas do equipamento. O limite físico informado pelo fabricante para estruturas de concreto é da ordem de 60 a 80 cm de profundidade de penetração.

Em situações de limitações do GPR, no tocante aos vazios internos, é aí que entra a atuação do tomógrafo ultrassônico, que passa a ter uma ação complementar na avaliação. Ao contrário do GPR, a onda de ultrassom é refletida 100% quando atinge um espaço vazio, ao passo que se propaga através do aço com apenas uma reflexão parcial. As ondas de ultrassom também “viajam” muito mais no interior no concreto, permitindo que sejam superados os limites de penetração apresentados pelo radar GPR. A Figura 4.36, disponível no *website* dos fabricantes dos equipamentos, demonstra as intensidades de reflexão de onda típicas para cada uma dessas técnicas, ressaltando, dessa forma, um viés de muita complementaridade entre elas no contexto das inspeções de estruturas de concreto.

Figura 4.36 - Aplicação do tomógrafo ultrassônico e radar GPR em estruturas de concreto. (SCREENINGEAGLE, s.d.)

		GPR				Ultrasonic Pulse Echo			
Reflection	Interface	ϵ_1	ϵ_2	R	Interface	Z_1	Z_2	R	
	Concrete - Metal	7	∞	100%	Concrete - Metal	9.6	46.5	43%	
	Concrete - Air	7	1	45%	Concrete - Air	9.6	.000429	99%	

$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$	R = energy reflected ϵ_1 = permittivity of concrete ϵ_2 = permittivity of 2 nd material	$R = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2}$	R = energy reflected Z_1 = acoustic impedance concrete Z_2 = acoustic impedance 2 nd material
---	--	---	--

Outra informação relevante quanto ao uso do radar GPR é que a ferramenta se mostra bastante útil para detecção da espessura, com precisão, do elemento em concreto. Tal constatação pôde ser verificada pelo maior pico de onda detectado pelo equipamento, representando a face posterior do elemento, conforme sinalizado pela *Tag 1* na Figura 4.34, e na *Tag 11* da Figura 4.35.

Nota-se também, com a utilização do radar GPR, que em uma situação de elementos sobrepostos em uma mesma seção transversal (mais de um nível de “camadas” de armaduras, por exemplo), a onda refletida acaba “escondendo” aquilo que está sob o primeiro nível de malha de aço, prejudicando a detecção de elementos em maiores profundidades ou em estruturas densamente armadas, por exemplo.

A identificação dos elementos no interior do concreto pelo radar GPR se dá de maneira análoga ao tomógrafo ultrassônico, por meio da identificação visual dos picos da onda refletida, conforme ilustrado na Figura 4.37. Tais elementos também podem ser identificados por meio das hipérbolas formadas nos radargramas, em função do feixe de onda eletromagnética gerado e captado pelas antenas do equipamento (Figura 4.38). A forma de hipérbole revela a onda gerada pela antena se aproximando do alvo e então se afastando (*Tag 6* e marcação em vermelho da Figura 4.38). Seu cume é exatamente onde o alvo está, sendo que objetos metálicos produzem reflexões claras e fortes (*Tags 1 e 2* da Figura 4.38), enquanto tubulação de PVC, por exemplo, terá a mesma forma, porém com amplitude e intensidade menor (*Tags 3, 4 e 5* da Figura 4.38) (SANTOS; ROCHA; BORGES, 2017).

Figura 4.37 - Identificação de elementos no Bloco C45 por GPR.

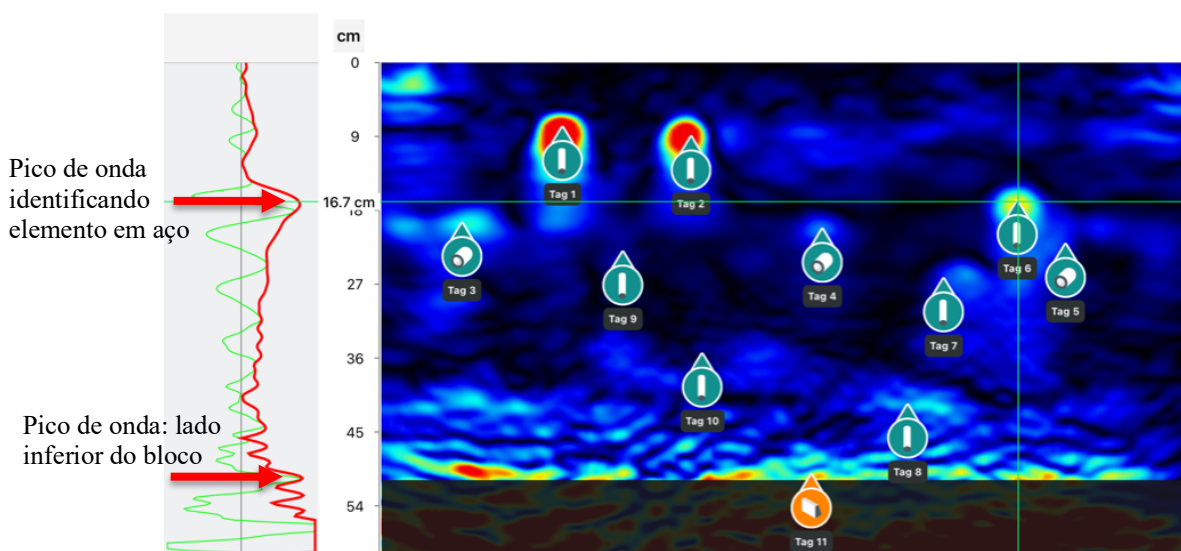
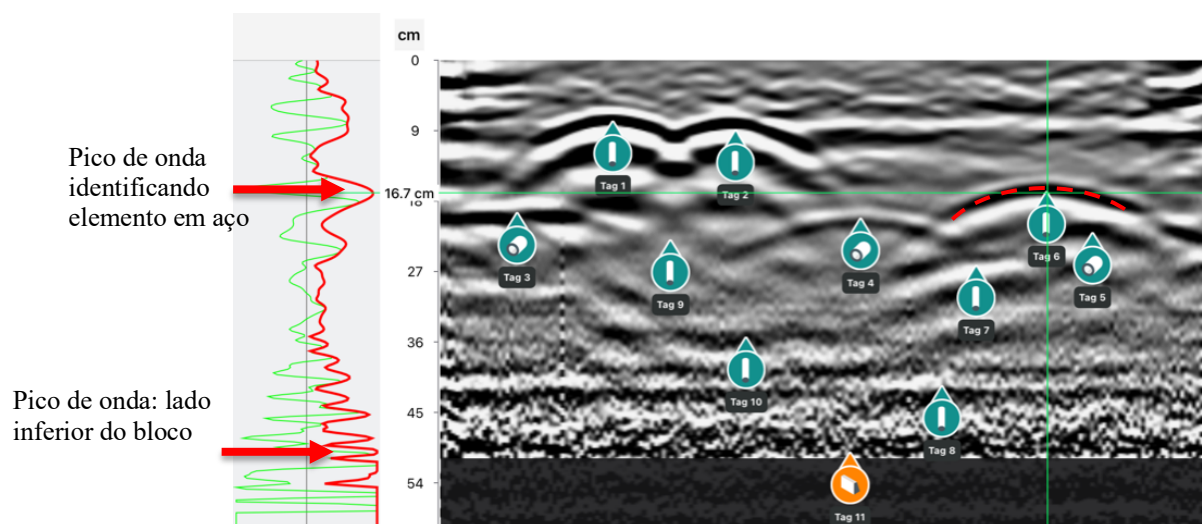


Figura 4.38 Identificação de elementos no Bloco C45 por GPR.



4.2.2 Detecção de defeitos produzidos em placas

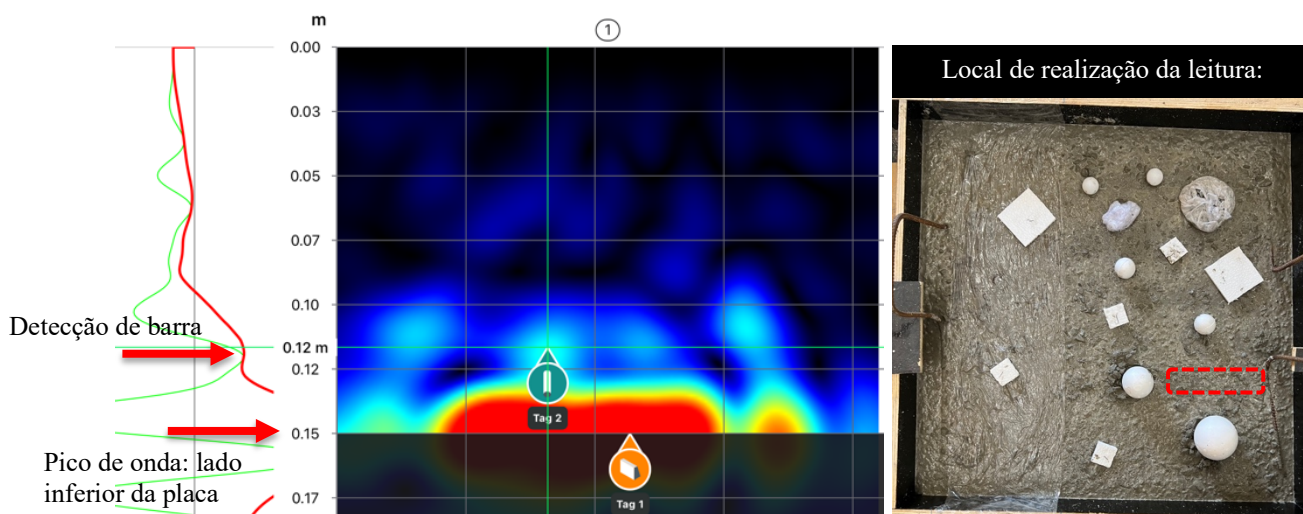
Os defeitos nas placas foram produzidos com a intenção de verificar a potencialidade do uso das técnicas de tomografia ultrassônica e radar GPR para detecção de delaminações, ninhos de concretagem e a localização de materiais de diferentes densidades como fragmentos de placas e bolas de isopor, e bolas de *ping-pong* no interior das placas de 90x90x15 cm produzidas com os concretos C25 e C45.

c) Tomografia ultrassônica

Nas Figuras 4.39 a 4.43 são apresentados os resultados obtidos pela tomografia ultrassônica para detecção dos defeitos produzidos nas placas de concreto C25. Nas figuras que seguem, são apresentadas a imagem obtida por tomografia (à esquerda) e a localização aproximada de onde foi efetuado o ensaio (à direita), na seção transversal de 15 cm das placas.

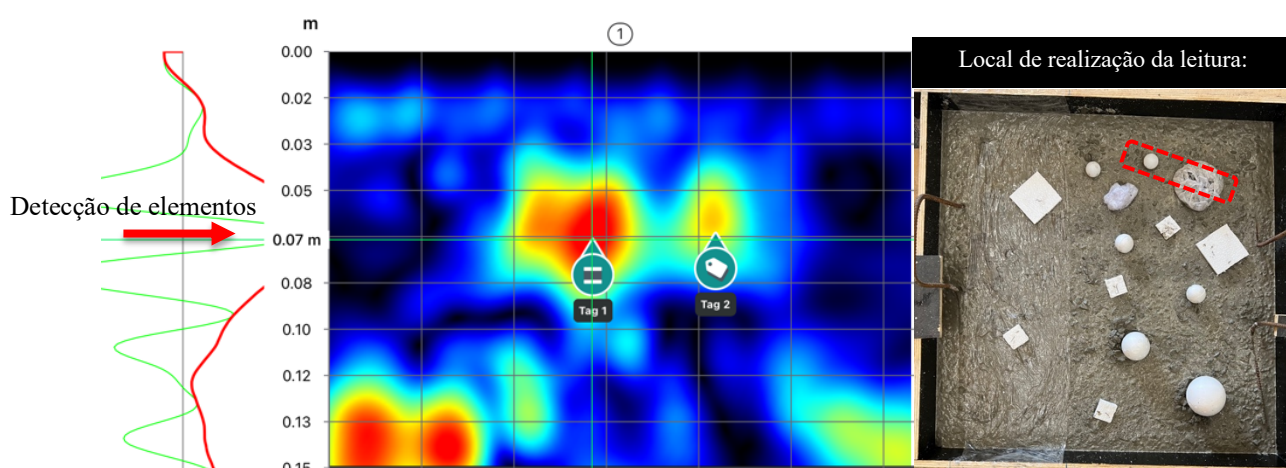
Na Figura 4.39, foi realizada a leitura em um local livre de defeitos com a finalidade de uma detecção precisa do final do elemento estrutural em análise (*Tag 1*). Percebe-se pela Figura 4.39 que a medição conseguiu identificar a altura da placa com aproximadamente 15 cm, assim como a presença das armaduras positivas (*Tag 2*) na parte inferior deste elemento, respeitando o cobrimento de 3 cm.

Figura 4.39 - Detecção de barras com tomografia ultrassônica em Placa C25.



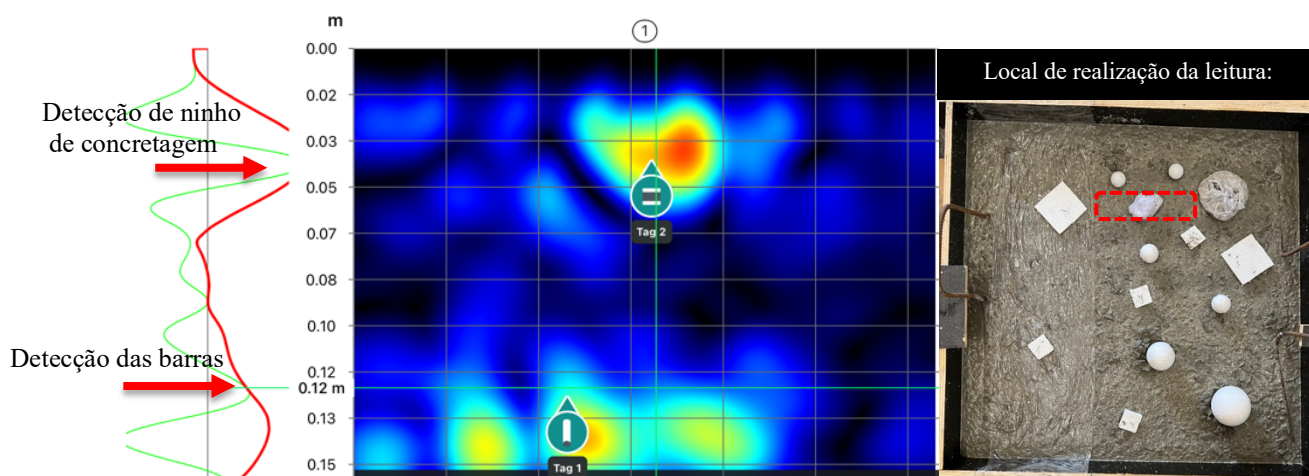
Durante a moldagem das placas ocorreu que devido ao processo de adensamento por vibração, percebeu-se que algumas bolas de EPS e *ping pong* acabaram se movimentando um pouco, prejudicando a precisão na localização delas durante a realização dos ensaios. Na Figura 4.40, são apresentados os defeitos relacionados ao ninho de concretagem produzido pela porção de brita envolta em plástico filme (*Tag 1*) e bola de *ping pong* com 4 cm de diâmetro (*Tag 2*), localizadas a aproximadamente 7 cm de profundidade.

Figura 4.40 - Detecção de elementos (bolas) com tomografia ultrassônica em Placa C25.

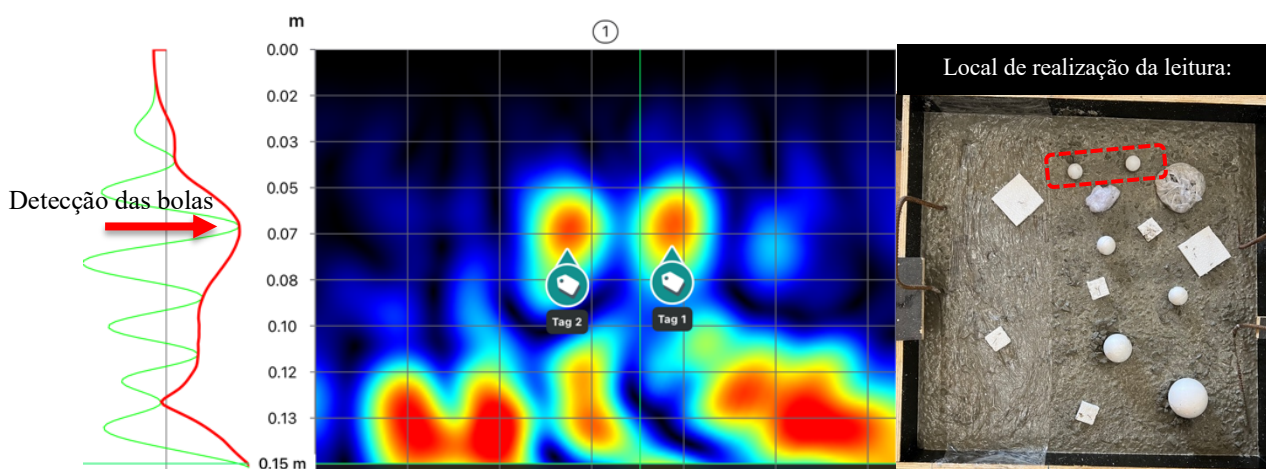


Já na Figura 4.41 podem ser identificadas as armaduras localizadas na parte inferior da placa C25 (*Tag 1*) e o defeito de ninho de concretagem produzido pelo pequeno pedaço de filme plástico amassado, localizado em aproximadamente 4 cm da superfície (*Tag 2*).

Figura 4.41 - Detecção do defeito de ninho de concretagem com tomografia ultrassônica: Placa C25.



Na Figura 4.42 também foram identificadas as duas bolas de *ping pong* localizadas em aproximadamente 7 cm de profundidade da placa C25 (*Tags 1 e 2*).

Figura 4.42 - Detecção de bolas de *ping pong* com tomografia ultrassônica: Placa C25.

Nas Figuras 4.43 e 4.44 são identificados os defeitos gerados por delaminação nas placas C25 (*Tag 1*) e C45 (*Tag 3*), respectivamente. Nas duas placas, pôde-se perceber uma mancha horizontalmente bem definida na região e altura correspondente ao local onde se colocou o filme plástico para simulação de delaminação / separação das camadas de concretagem.

Figura 4.43 - Detecção de delaminação com tomografia ultrassônica em Placa C25.

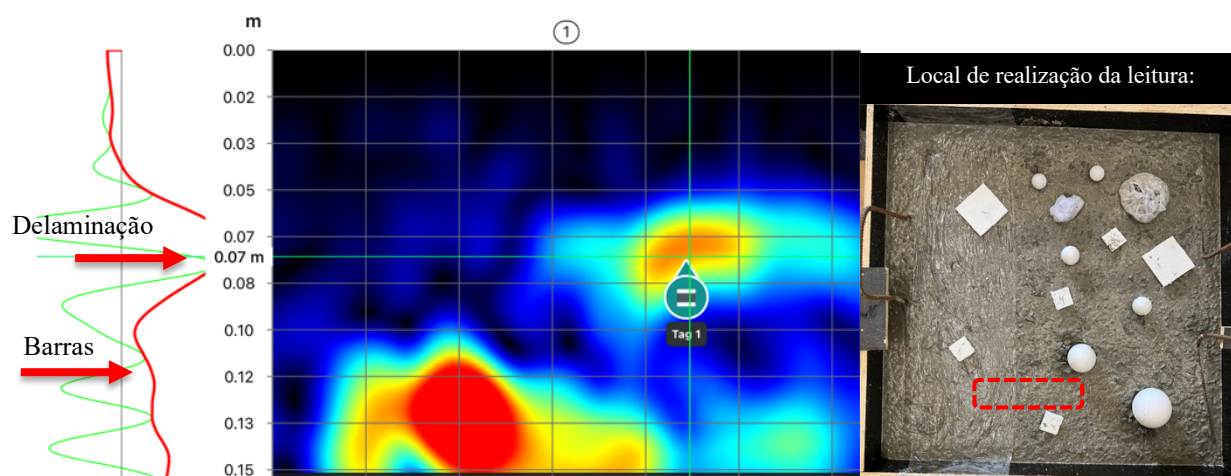
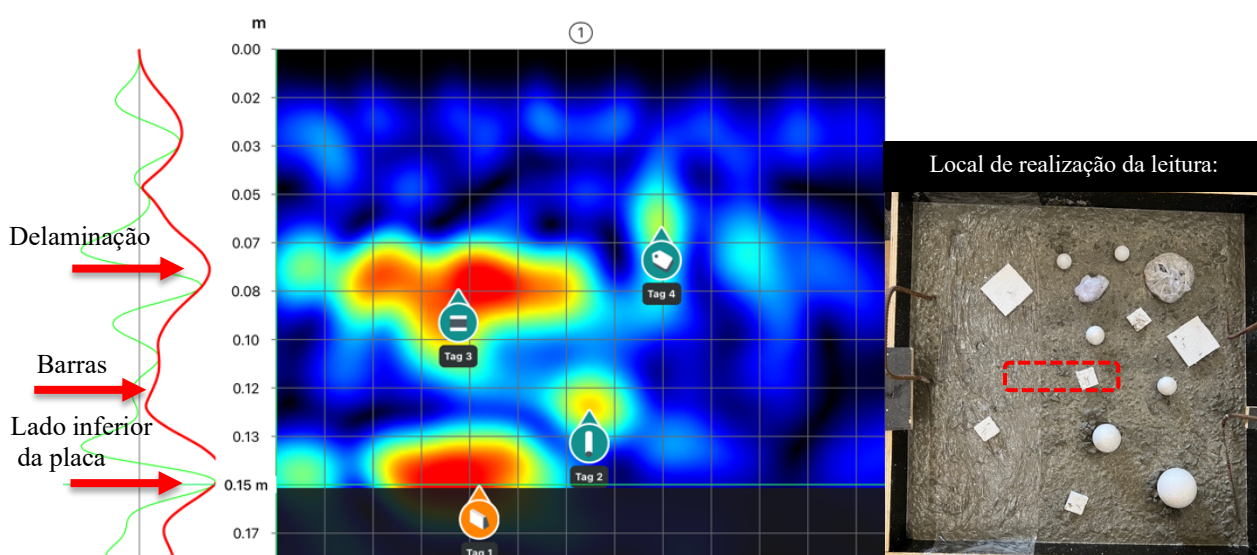


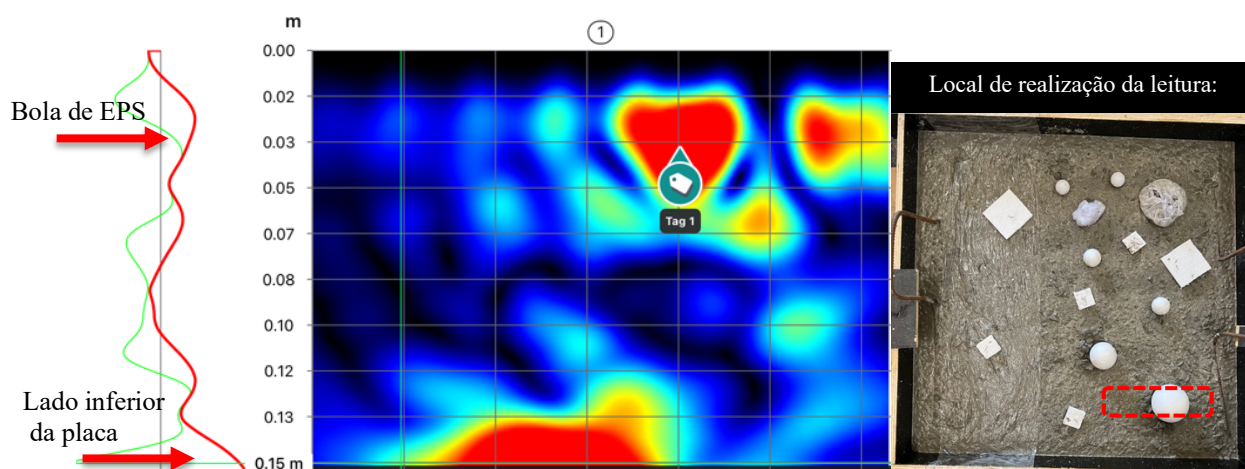
Figura 4.44 - Detecção de delaminação com tomografia ultrassônica em Placa C45.



Na Figura 4.44 também é possível detectar a face inferior do elemento estrutural, definida pela *Tag 1* de cor alaranjada e a armadura representada pela *Tag 2*, esta última também situada aproximadamente entre 2 e 3 cm do fundo do elemento. Os defeitos de delaminação correspondem exatamente aos mesmos locais onde foram posicionados: em aproximadamente 7 cm de altura. Além disso, também foi possível detectar uma interferência (*Tag 4*) que remete ao pedaço de isopor de 5x5 cm, próximo à delaminação.

Na Placa de concreto C45 também foi possível a identificação dos defeitos simulados em seu interior com a técnica de tomografia ultrassônica. As Figuras 4.45 a 4.48 ilustram os tomogramas obtidos a partir dos ensaios na placa C45. Na Figura 4.45, tem-se a detecção da bola de EPS maior (*Tag 1*), localizada, aproximadamente, a 3 cm da parte superior da peça.

Figura 4.45 - Detecção de bola de EPS com tomografia ultrassônica em Placa C45.



Na Figura 4.46 também é possível observar a detecção da bola de *ping pong* (*Tag 1*), e na Figura 4.47 tem-se a detecção de outra bola de EPS, ambas situadas próximas de 3 a 4 cm da face superior da placa.

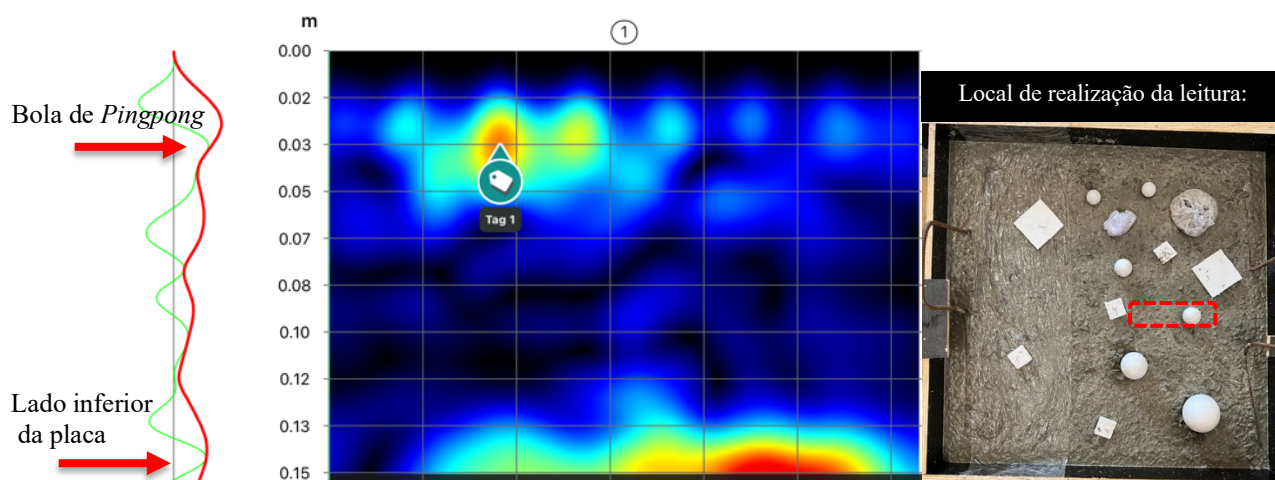
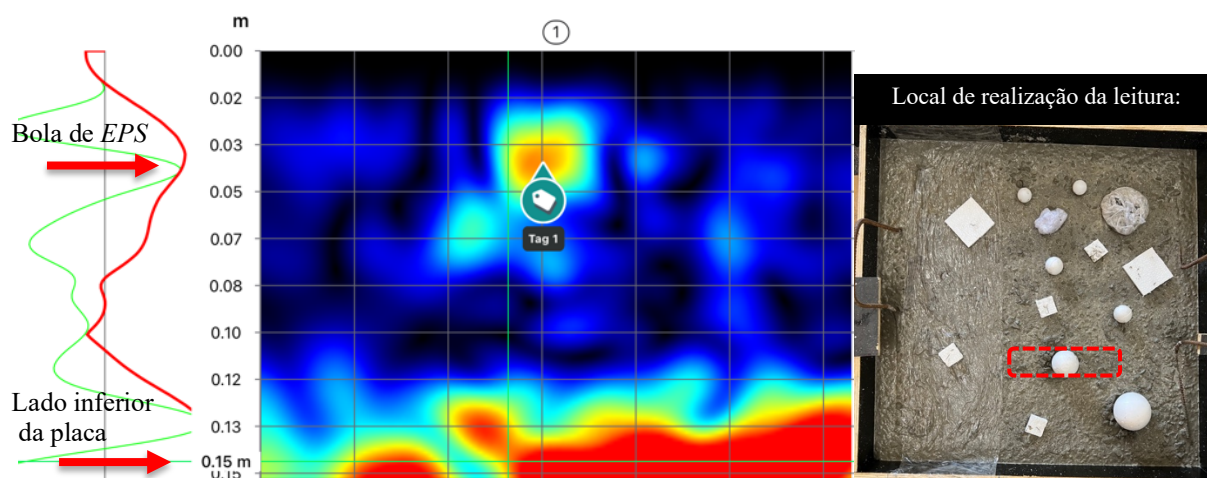
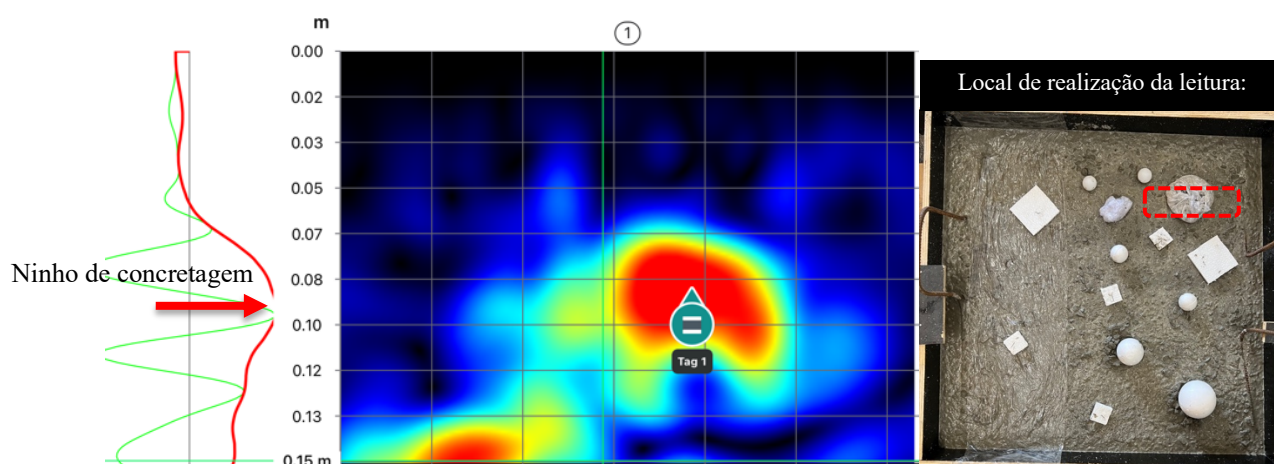
Figura 4.46 - Detecção de bola de *ping pong* com tomografia ultrassônica em Placa C45.

Figura 4.47 - Detecção de bola de EPS com tomografia ultrassônica em Placa C45.



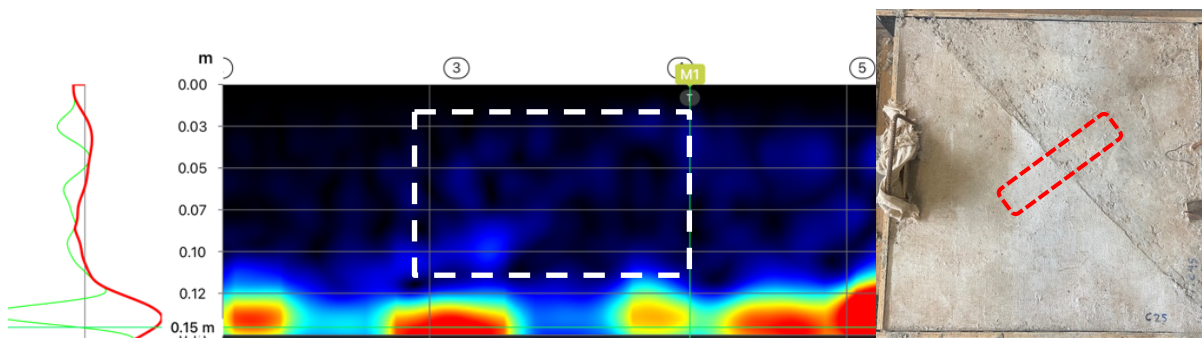
Por fim, na Figura 4.48, é possível identificar o ninho de concretagem produzido pela porção de brita envolta em filme plástico (*Tag 1*).

Figura 4.48 - Detecção de ninho de concretagem com tomografia ultrassônica em Placa C45.



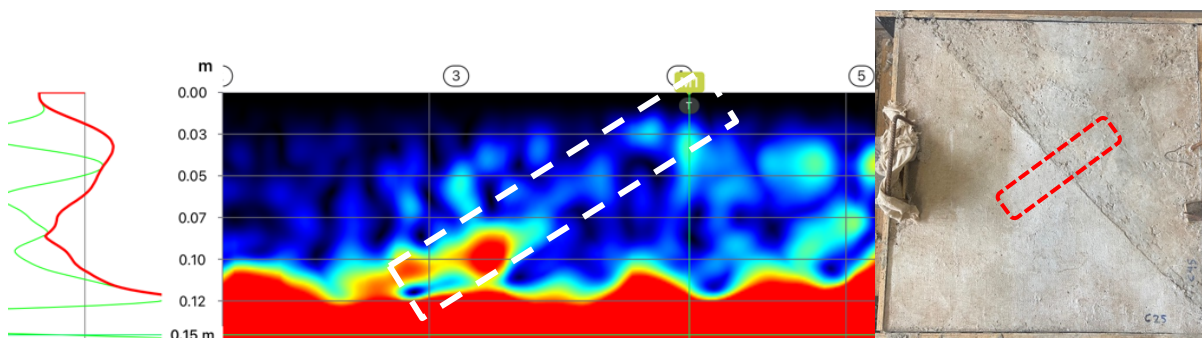
Com o uso da tomografia ultrassônica também procurou-se detectar a junta fria de concretagem, produzida entre dois concretos diferentes, C25 e C45, moldados em dias distintos. Na Figura 4.49 percebe-se que, a partir da tomografia ultrassônica realizada ao longo da placa, o equipamento utilizado não possui, a princípio, uma boa precisão para a detecção da junta.

Figura 4.49 - Tomografia ultrassônica em junta fria: placa C25/C45



Assim, em uma primeira análise, o tomograma gerado e apresentado na Figura 4.49 não é capaz de detectar com precisão a posição da junta. Porém, a partir da realização de ajustes da imagem no software da PROCEQ e aumentando-se o ganho digital (intensidade de recepção do sinal) do equipamento, nota-se uma tendência de representação da junta existente, conforme ilustra a Figura 4.50.

Figura 4.50 - Tomografia ultrassônica em junta fria - placa C25/C45 (com aumento de ganho)



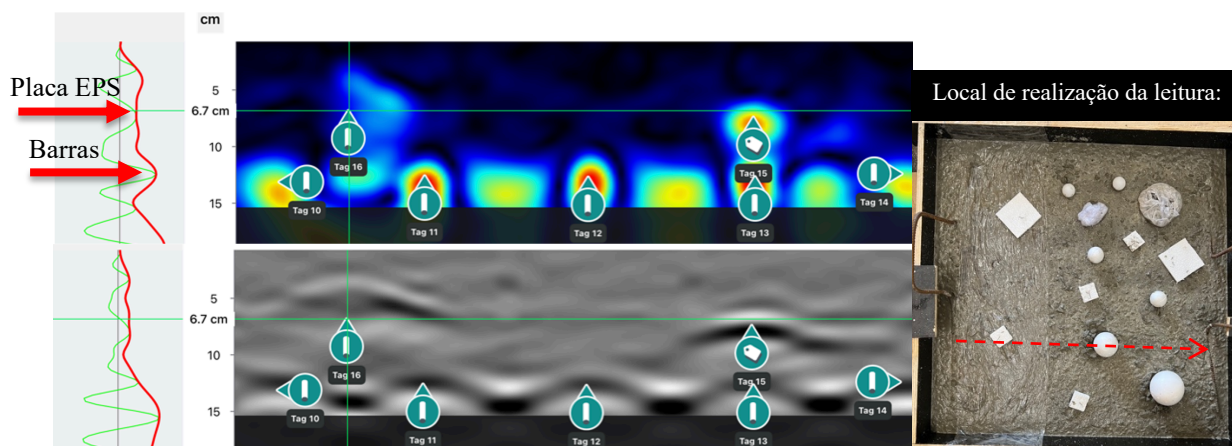
Sob o ponto de vista da aplicabilidade do tomógrafo ultrassônico para identificação de juntas de concretagem em elementos estruturais *in situ*, pode-se aferir, a partir dos experimentos em laboratório, que o equipamento não apresentou desempenho satisfatório. Isso porque seria necessário, em campo, conhecer a posição prévia das juntas para então saturar o sinal recebido naquele local a fim de sua detecção e visualização. Em muitas situações o que acontece é que o uso do tomógrafo é exatamente para poder localizar e mapear essas juntas. Assim, fica inviável o uso do mesmo para esse fim. Por outro lado, se o objetivo for apenas verificar a integridade das juntas existentes, a fim de atestar a monoliticidade do elemento estrutural, a ferramenta pode ser útil. Entretanto, há de se ter cautela no uso, uma vez que o fato de ter que saturar o sinal recebido pode acarretar em interpretações errôneas das imagens geradas.

Ademais, cabe ressaltar que o uso da tomografia ultrassônica é válido para inspeções de estruturas de concreto acabadas, sobretudo para avaliação da homogeneidade de elementos estruturais e detecção de possíveis vazios internos ou ninhos de concretagem. Se tratando, ainda, de grandes obras de infraestrutura, sua aplicação é fortemente recomendada, uma vez que, conforme demonstrado nos resultados ora apresentados, consegue fornecer parâmetros de forma visual de defeitos e danos internos existentes. Todavia, é importante ressaltar que a operação do equipamento é extremamente determinante para a obtenção de resultados fidedignos à realidade daquilo que está sendo analisado. As configurações de faixa de medição, ganho e local de realização das leituras são imprescindíveis para resultados coerentes e assertivos.

d) Radar GPR

De maneira análoga ao item anterior (4.2.2.1), as Figuras 4.51 a 4.54 ilustram os resultados (radargramas) obtidos pela varredura do radar GPR nas placas C25 e C45, com a finalidade de detectar os defeitos e danos simulados internamente.

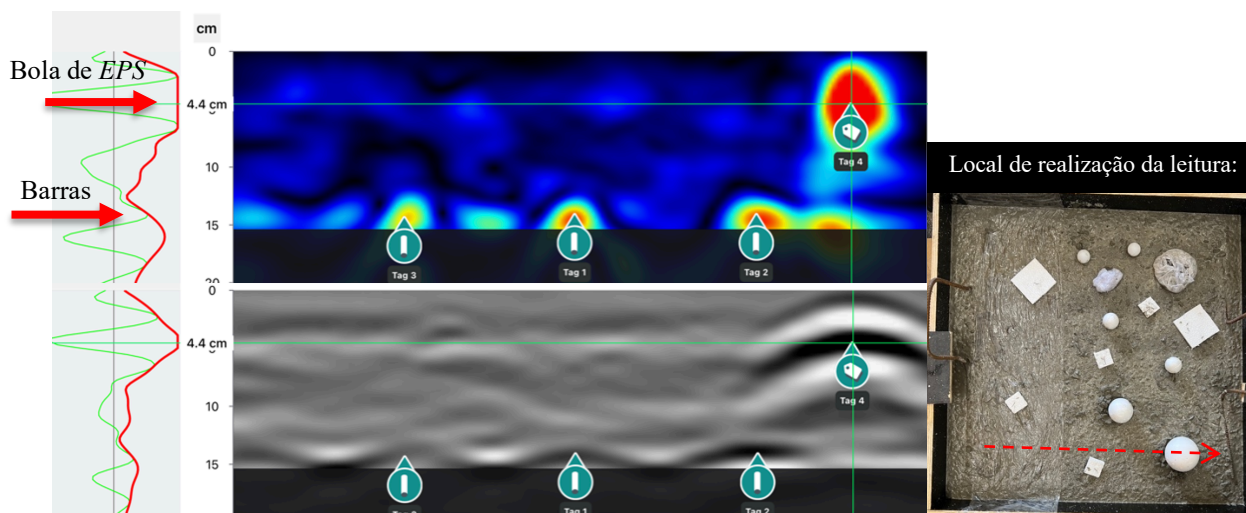
Figura 4.51 – Detecção de barras e elementos internos com radar GPR em Placa C25.



Analisando a Figura 4.51, observa-se que o radar GPR possui uma precisão muito melhor que o tomógrafo ultrassônico para detecção da posição das barras metálicas no interior do elemento estrutural, mas que também consegue identificar, em elementos de concreto de pequena espessura, alguns dos defeitos gerados. Nesta Figura 4.51, por exemplo, é possível verificar corretamente a equidistância da armadura posicionada na parte inferior da placa (*Tags 10 a 14*), assim como alguns defeitos na parte superior, como, por exemplo, a bola de EPS detectada na *Tag 15* (a 6,7 cm de profundidade, aproximadamente) e a placa de EPS sobre o filme plástico na *Tag 16*.

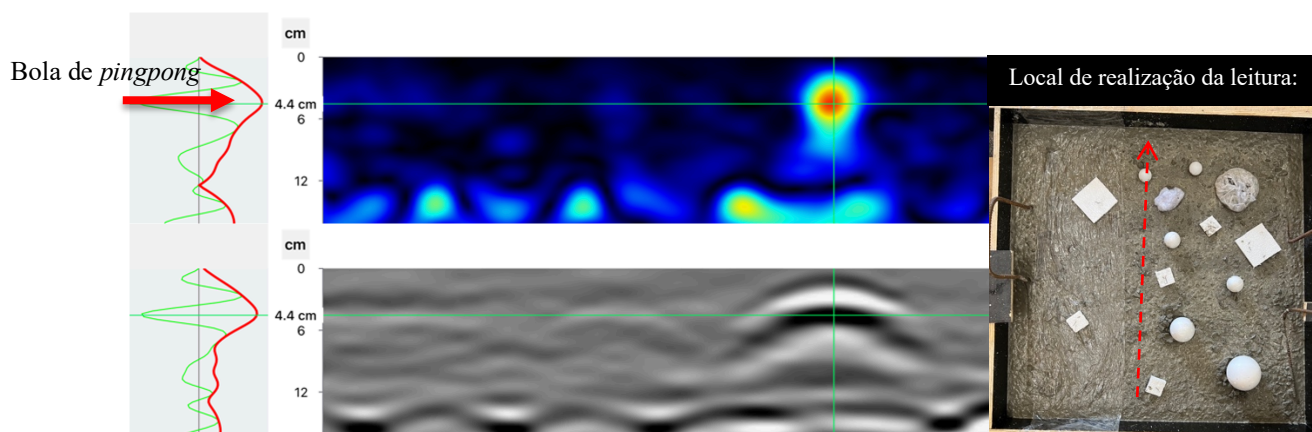
Já na Figura 4.52, foi possível detectar, além das barras indicadas nas *Tags 1, 2 e 3*, a bola de EPS grande indicada pela *Tag 4*.

Figura 4.52 - Detecção de barras e bola de EPS com radar GPR em Placa C25.



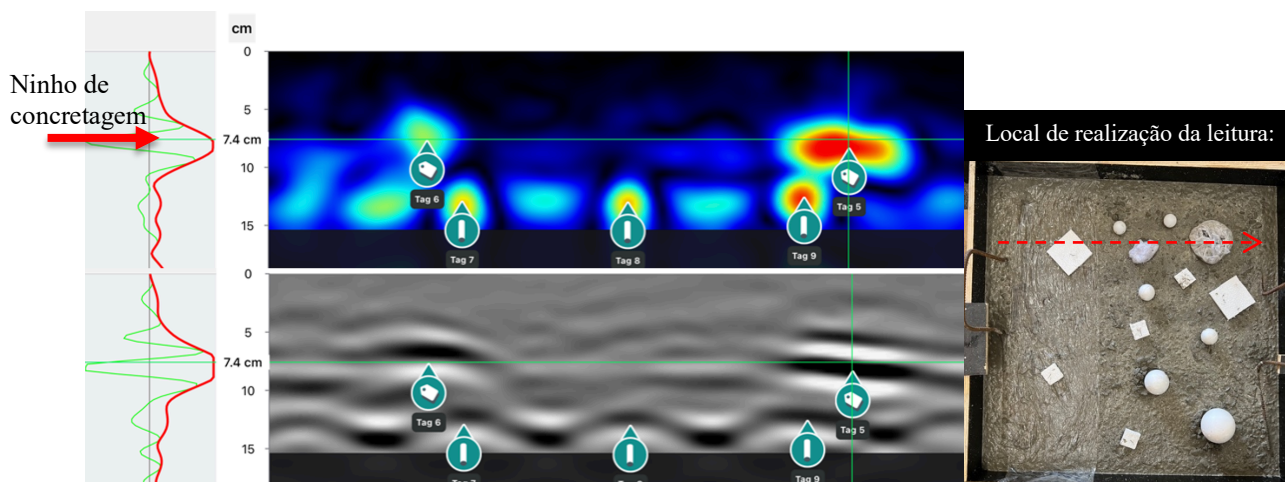
Na Figura 4.53, observa-se a identificação da bola de *ping pong* na parte superior da placa de concreto (aproximadamente 4,4 cm), além das barras na parte inferior.

Figura 4.53 - Detecção de bola de *ping pong* com radar GPR em Placa C25.



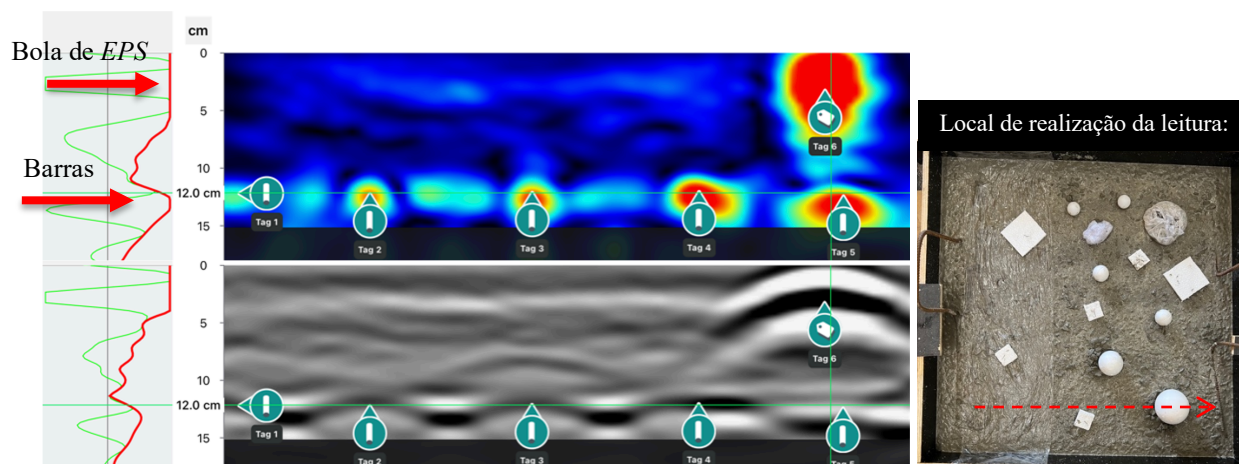
Na Placa C25 ainda foi possível identificar visualmente o ninho de concretagem simulado pela porção de brita envolta em plástico filme, conforme ilustra a Figura 4.54 (*Tag 5*). Na Figura em questão, também é possível identificar um pedaço da placa de EPS causando interferência (*Tag 6*). A leitura das armaduras mostrou-se bastante precisa, fato observado em praticamente todas as imagens.

Figura 4.54 – Detecção de ninhos de concretagem e bola de ping pong com radar GPR em placa C25.



Da mesma forma que na Placa C25, na Placa C45 também foi possível realizar a identificação dos elementos inseridos dentro do concreto. As Figuras 4.55 a 4.60 ilustram os resultados obtidos.

Figura 4.55 – Detecção de bola de EPS e barras com radar GPR em Placa C45.



Na Figura 4.55 detecta-se, além das barras de aço na superfície inferior da Placa (*Tags 1 a 5*), a bola de EPS grande (*Tag 6*), situada quase que junto à superfície do elemento analisado. É importante ressaltar que a bola de EPS gera um “efeito sombra” na armadura situada logo abaixo dela, fazendo com que a representação da armadura fique mais achatada (*Tag 5*). Já na Figura 4.56 é possível observar a detecção da bola de ping pong com aproximadamente 2,6 cm de profundidade (*Tag 7*) e na Figura 4.57 a detecção da bola de EPS (*Tag 11*).

Figura 4.56 – Detecção de bola de ping pong com radar GPR em Placa C45.

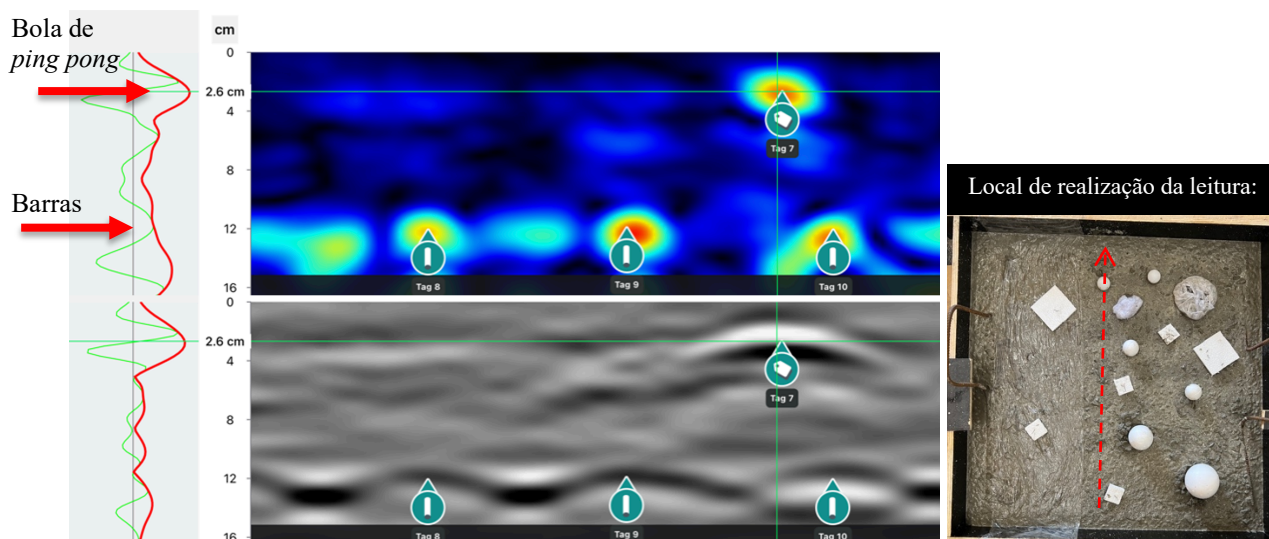
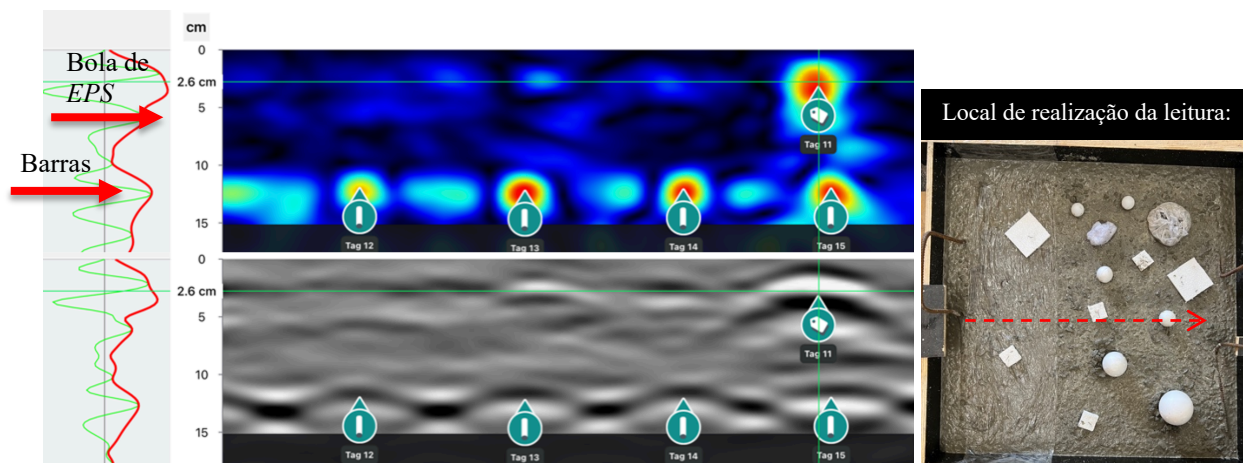
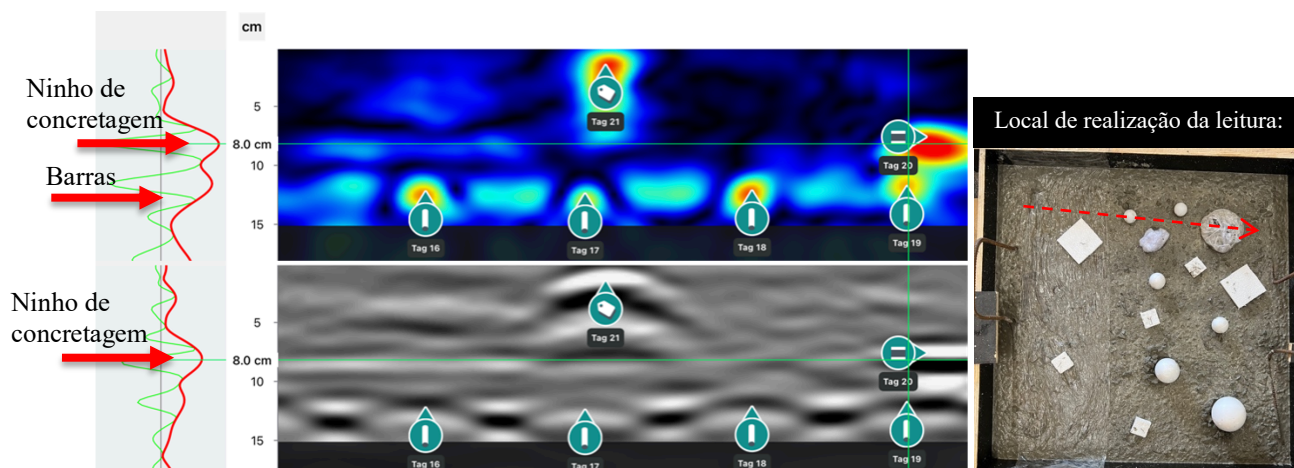


Figura 4.57 - Detecção de bola de EPS com radar GPR em Placa C45.



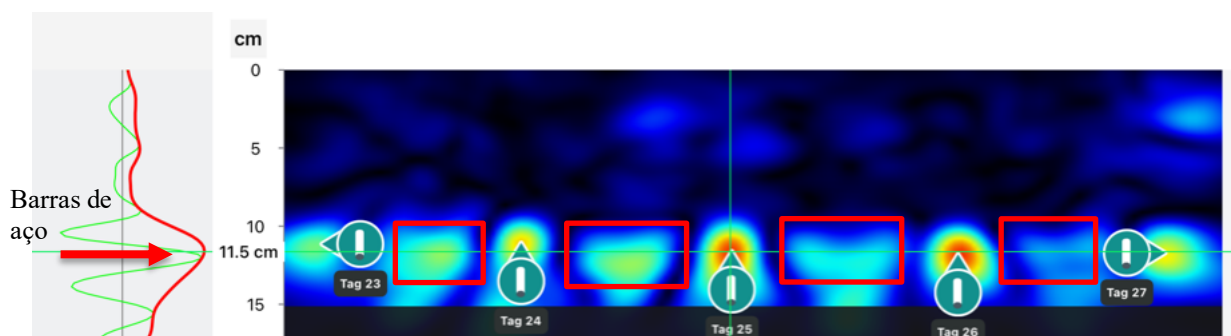
A partir do radargrama apresentado na Figura 4.58 foi possível identificar visualmente também o ninho de concretagem simulado pela porção de brita envolta em plástico filme, indicado pela *Tag 20*. Assim como na Placa C25, também foi possível identificar uma bola de ping pong bem próximo da superfície (*Tag 21*). Conforme citado anteriormente, durante o procedimento de adensamento das placas de concreto, percebeu-se que parte dos elementos inseridos se movimentaram. Tal situação é verificada na Figura 4.58, em que a bola de ping pong (*Tag 21*) subiu em direção à superfície da placa.

Figura 4.58 – Detecção de ninhos de concretagem e bola de ping pong com radar GPR em Placa C45.



Além disso, nos radargramas gerados é possível visualizar, entre as barras identificadas, que há pequenas interferências de coloração amarelo esverdeadas que remetem às barras da malha e estão no outro sentido (paralelo à leitura), conforme indicado na Figura 4.59. Quanto mais próxima a seção analisada estiver da barra situada paralelamente à direção de leitura, maior é a intensidade dessa marcação. Assim, cabe ressaltar que para a utilização dos ensaios não destrutivos de tomografia ultrassônica e radar GPR, faz-se necessário ter o mínimo de conhecimento da geometria e armaduras do elemento a ser analisado, uma vez que uma má interpretação pode falsear resultados ou indicar defeitos onde não existem.

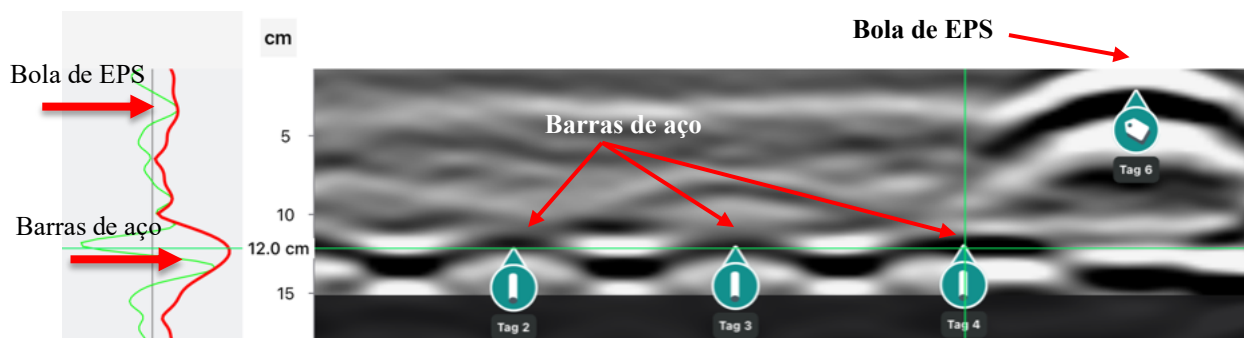
Figura 4.59 – Identificação de armaduras paralelas à seção de leitura com radar GPR em Placa C45.



Ainda, nas imagens obtidas pelo radar GPR, nos dois tipos de placa (C25 e C45), é possível identificar que os elementos metálicos detectados geram uma hipérbole em que sua crista tem uma marcação mais evidente, uma vez que as reflexões produzidas têm um sinal com maior amplitude. Já os vazios ou elementos de menor densidade promovem uma crista de coloração branca e menos evidente (SANTOS; ROCHA; BORGES, 2017), conforme indicado na Figura 4.60, em que as *Tags 2, 3 e 4* representam armaduras e a *Tag 6* uma bola de EPS. Adicionalmente, segundo Nascimento, Koide e Pires (2011), a hipérbole identificada no

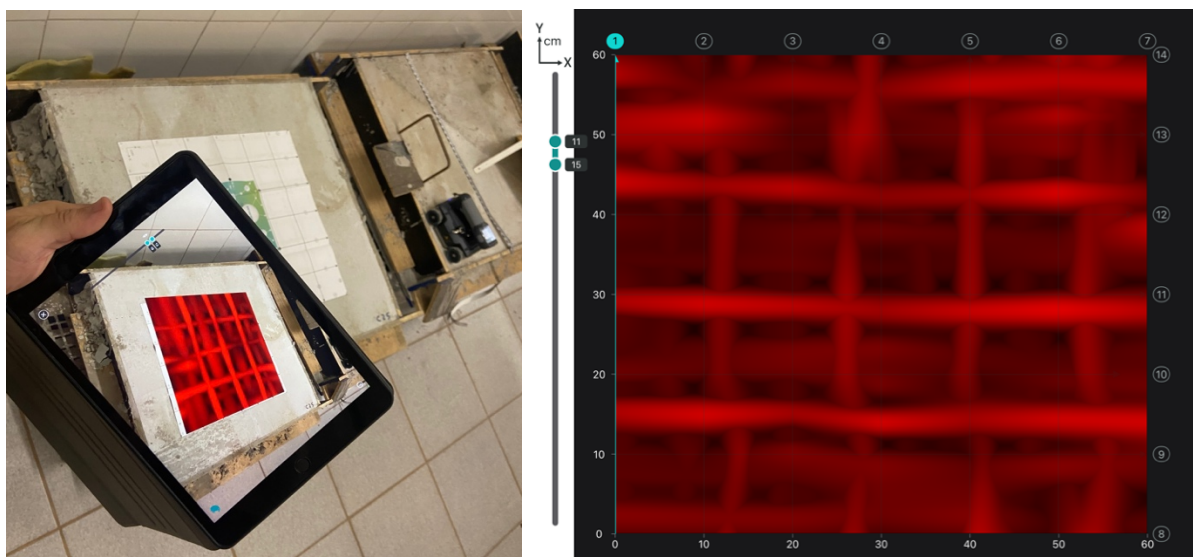
radargrama quase sempre corresponde a um alvo isolado. Quanto maior o alvo detectado, mais ampla é esta hipérbole.

Figura 4.60 - Análise da coloração da crista da hipérbole gerada pelo radargrama em Placa C45.



Por fim, ainda com relação às potencialidades de uso do radar GPR, principalmente para detecção de materiais metálicos, a partir da varredura realizada na face superior das placas, foi possível gerar um mapeamento tridimensional das barras de aço em seu interior. O resultado é apresentado na Figura 4.61, em que se têm a verificação e manipulação das barras em 3 dimensões por meio de software de realidade aumentada (Figura 4.61-a) e o posicionamento das barras no interior das placas (Figura 4.61-b).

Figura 4.61 - Aplicativo de realidade aumentada (a) e mapeamento de barras (b) com radar GPR em Placa de concreto.



4.2.3 Detecção de danos de fissuração produzidos em lajes

A partir dos ensaios de flexão a três pontos realizados nas lajes C25 e C45, foram induzidas fissuras por flexão nesses elementos, conforme ilustra as Figuras 4.62 e 4.63.

Figura 4.62 - Fissuras de flexão em laje C25.



Figura 4.63 - Fissuras de flexão em laje C45.



Como resultado, chegou-se a um carregamento máximo de 11,31 KN para a laje C25 e 12,55 KN para a laje C45, nesses instantes foi obtidas fissuras com abertura da ordem de 0,8 mm.

e) Detecção de danos por tomografia ultrassônica

Conforme apresentado em programa experimental, a superfície superior da laje foi marcada em 42 quadrantes para realização dos ensaios de tomografia ultrassônica antes, durante e depois do ensaio de flexão. A Figura 4.64 ilustra um recorte realizado nas leituras da região central da laje C25. Os tomogramas ilustram o estado da laje antes da realização do ensaio, isto é, com a laje intacta, e durante a realização do ensaio, nas aberturas de fissuras de 0,2 mm, 0,4 mm, e 0,8 mm. Foram conservados os mesmos parâmetros de realização do ensaio, tais como posição do tomógrafo, ganho digital, parâmetros de calibração e modo de leitura para todas as imagens

geradas. Já a Figura 4.65 ilustra a realização da tomografia ultrassônica na laje C45. Nesta última têm-se o registro antes do ensaio e nas aberturas de 0,2 mm, 0,4 mm e 0,8 mm.

A partir das imagens geradas, nota-se que o equipamento tomógrafo ultrassônico não apresentou um desempenho satisfatório para detecção de fissuras, tanto na laje C25, quanto na laje C45. As regiões apresentadas nas Figuras 4.63 e 4.64 estão localizadas na porção central da laje, exatamente onde abriram-se fissuras da ordem de 0,8 mm, que não foram identificadas pelo equipamento. Cabe ressaltar que as fissuras surgiram na parte de baixo do elemento (região tracionada), e o ensaio foi realizado na face superior. Em uma situação de inspeção, procura-se fazer a varredura com o equipamento pela parte exposta, e pretende-se identificar elementos tanto internamente, quanto na outra face (geralmente oposta à de leitura).

Figura 4.64 - Ensaio de tomografia ultrassônica em Laje C25.

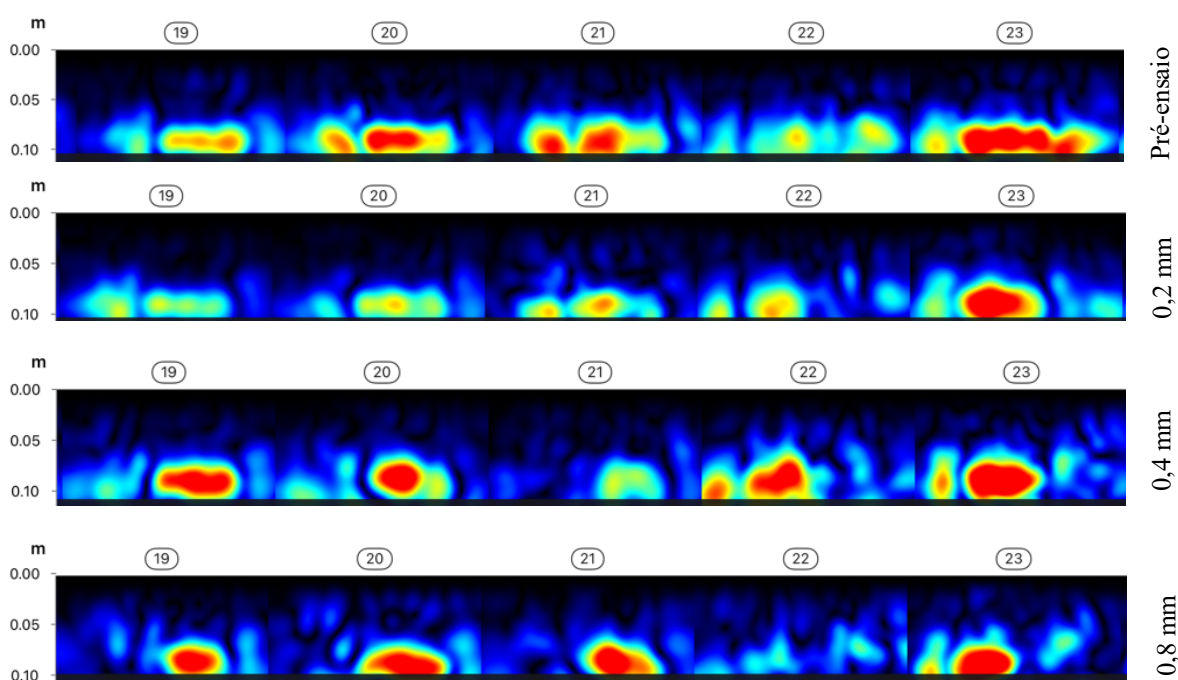


Figura 4.67 – Resistividade elétrica superficial (kΩcm) antes e depois do ensaio de flexão simples em laje C45.

8,1	7,6	7,6	8,0	6,5	8,3	G	7,5	7,6	6,1	7,5	7,2	9,3	G
8,0	7,6	8,4	7,3	7,5	9,5	F	7,3	7,0	7,6	7,5	7,9	10,1	F
8,2	7,2	6,6	7,6	7,5	8,9	E	7,2	6,7	7,0	6,3	7,4	8,1	E
8,4	7,2	7,8	7,0	8,3	7,8	D	6,9	6,0	7,0	7,5	7,9	7,3	D
6,9	8,2	8,9	7,3	6,8	8,4	C	7,5	7,6	9,0	7,1	7,3	7,9	C
7,5	8,5	7,1	7,0	6,9	8,6	B	8,5	8,2	7,5	6,5	6,2	7,8	B
7,2	6,7	7,0	8,0	7,7	9,2	A	8,6	7,0	6,6	7,0	8,2	9,6	A
6	5	4	3	2	1		6	5	4	3	2	1	

LAJE C45 ANTES

LAJE C45 DEPOIS

Percebe-se, a partir dos resultados obtidos, que há uma singela tendência de diminuição nos valores medidos de resistividade elétrica superficial, tanto na laje C25, quanto C45. Tal percepção fica mais nítida quando se analisa a escala colorimétrica adotada, principalmente na região central da laje (local de aplicação da carga) em que se têm uma tendência de coloração mais avermelhada, conforme apresentado nas Figuras 4.66 e 4.67. Essa tendência de diminuição dos valores de resistividade corrobora com a hipótese de que quando se há um aumento da quantidade, abertura e/ou conectividade entre as fissuras, o elemento estrutural em análise tende a apresentar uma maior condutibilidade elétrica por seus vazios preenchidos por água.

Assim, quanto maior o dano gerado na estrutura, a tendência é que os valores de resistividade tendem a diminuir. Este fato pôde ser observado tanto para o concreto C25, quanto para o C45. Entretanto, cabe ressaltar que as condições de realização do ensaio de resistividade elétrica antes e após dano devem ser mantidas as mais próximas possíveis, uma vez que podem ocorrer variações nas medidas em função das condições de saturação dos poros do elemento estrutural verificado. Logo, em uma situação prática de atividade de inspeção *in situ*, o acompanhamento de danos com o uso da resistividade elétrica superficial, realizado ao longo da vida útil da estrutura, deve ser feito sob as mesmas condições de saturação de poros dos elementos estruturais em análise.

4.3 PARÂMETROS PROPOSTOS PARA A METODOLOGIA DE INSPEÇÃO

A partir da escolha da Metodologia GDE UnB como metodologia de inspeção utilizável em obras de infraestrutura e com a inserção dos ensaios não destrutivos demonstrados anteriormente com grande potencialidade de aplicação para detecção de defeitos e elementos no interior de estruturas de concreto, têm-se nos itens seguintes a proposição dos fatores de

ponderação e intensidade a serem considerados para esses ensaios, a fim de compor uma metodologia focada na análise de dano adaptada às situações dessas obras de infraestrutura.

4.3.1 Danos, Fatores de Ponderação (F_p) e Fatores de Intensidade (F_i) adicionais

Além dos danos propostos pelo Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB (Anexo A) a Obras de Arte Especiais (VERLY, 2015), propõe-se a adição à ficha de inspeção os danos de descontinuidade e presença de vazios internos; homogeneidade do concreto; risco de corrosão ou potencial de corrosão das armaduras. A finalidade é promover uma melhoria dos parâmetros quali-quantitativos utilizados na avaliação da inspeção, tendo como base os resultados dos ensaios mencionados.

Os danos relacionados aos deslocamentos ou presença de vazios internos promovidos pela análise dos resultados dos ensaios de tomografia ultrassônica e radar GPR são adicionados à ficha de inspeção. O fator de ponderação (F_p) aplicado ao dano será de valor 3, pois ele pode contribuir significativamente para a avaliação da durabilidade e segurança da estrutura, principalmente por tratar de análise das características internas da estrutura. Os fatores de intensidade adotados serão definidos conforme segue:

- Descontinuidade pouco significativas do concreto do elemento estrutural e sem presença de vazios internos: $F_i = 0$;
- Descontinuidade pouco significativas do concreto do elemento estrutural e com a presença de poucos vazios internos (bolhas de ar aprisionado) em regiões pontuais: $F_i = 1$;
- Descontinuidade medianamente significativa do concreto do elemento estrutural e com a presença de poucos vazios internos (bolhas de ar aprisionado) em regiões pontuais: $F_i = 2$;
- Descontinuidade significativa no concreto do elemento estrutural e com a presença de quantidade razoável de vazios internos (bolhas de ar aprisionado) em algumas regiões do elemento: $F_i = 3$;
- Descontinuidade significativa no concreto do elemento estrutural e com a presença de grandes vazios internos (ninhas de concretagem): $F_i = 4$;

Já para o dano relacionado com a verificação da homogeneidade do material pelo ensaio de esclerometria, o fator de ponderação (F_p) aplicado ao dano será de valor 2. Por esse ser um ensaio complementar e que não contribui muito para a classificação do nível de deterioração geral da estrutura, aliado ao fato da imprecisão propriamente dita do ensaio, têm-se valores mais reduzidos de F_p e F_i . Os fatores de intensidade adotados serão definidos conforme segue:

- Se a diferença entre os Índices Esclerométricos médios lidos em cada elemento estrutural for maior que 20% e menor ou igual que 50%, adota-se $F_i = 1$.
- Se a diferença entre os Índices Esclerométricos médios lidos em cada elemento estrutural for maior ou igual a 50%, adota-se $F_i = 2$.

Outro dano proposto para ser adicionado à ficha de inspeção é aquele relacionado ao potencial de corrosão das armaduras. Embora já exista na ficha de inspeção o dano relativo à detecção visual de corrosão das armaduras, a análise deste dano visa à obtenção de um parâmetro quantitativo para aferir se existe a iniciação de um processo de corrosão das armaduras interno à estrutura e não detectável na inspeção visual. Para isso, utilizar-se-á o ensaio de potencial de corrosão. O fator de ponderação (F_p) aplicado ao dano será de valor 4, pois ele pode remeter significativamente à durabilidade e segurança da estrutura, assim como os outros danos relacionados a este importante critério conforme Verly (2015). Os fatores de intensidade adotados serão definidos conforme segue, sendo-se as probabilidades de corrosão definidas pelos critérios da ASTM C876 (2022):

- Se a probabilidade de corrosão for inferior a 10%, tem-se $F_i = 0$;
- Se a probabilidade de corrosão ficar entre 10% e 90%, na faixa de incerteza trazida pela ASTM C876 (2022), tem-se $F_i = 2$;
- Se a probabilidade de corrosão for superior a 90%, tem-se $F_i = 4$;

Por fim, uma segunda alternativa para verificação do risco de corrosão das armaduras, caso não seja possível a realização do ensaio de potencial de corrosão, conforme estipulado anteriormente, um método alternativo proposto é pela medição de resistividade do concreto, obtido pelo método de Wenner. Nele, propõe-se a utilização do Fator de ponderação (F_p) a igual a 3, pois ele também remete ao risco de corrosão das armaduras, mas não se equivale ao anterior

pois é uma medida indireta e pode haver desvios em suas leituras. Os fatores de intensidade adotados serão definidos conforme a seguir, seguindo a classificação de Polder (2000):

- Risco de corrosão classificado como desprezível, ou seja, resistividade do concreto $> 20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, tem-se $F_i = 0$;
- Risco de corrosão classificado como baixo, ou seja, resistividade do concreto entre 10 e $20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, tem-se $F_i = 1$;
- Risco de corrosão classificado como alto, ou seja, resistividade do concreto entre 5 e $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, tem-se $F_i = 2$;
- Risco de corrosão classificado como muito alto, ou seja, resistividade do concreto menor que $5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, tem-se $F_i = 3$.

Em relação aos fatores de dano e intensidade propostos, espera-se que com a inserção dos ensaios não destrutivos acima citados ao roteiro de inspeção da metodologia GDE/UnB, o engenheiro inspetor possa estar sendo munido de ferramentas que propiciem um diagnóstico mais preciso do real estado de conservação de uma estrutura. Ressalta-se também que para a ponderação dos parâmetros quali-quantitativos utilizados, foram critérios nacionais e internacionais que qualificam os danos existentes em estruturas de concreto armado quanto à existência de vazios internos, homogeneidade do concreto e corrosão das armaduras. Em paralelo, pôde-se perceber, a partir dos resultados obtidos no presente trabalho, que as metodologias não destrutivas de vanguarda como a tomografia ultrassônica e o radar GPR podem assumir um papel fundamental nas inspeções de estruturas em concreto e, tratando-se de grandes obras de infraestrutura, como barragens de concreto, usinas hidrelétricas, bases de torres eólicas, propiciam a análise de danos ainda mais acurada.

Cabe ressaltar que em suas últimas adaptações, a Metodologia GDE/UnB leva em conta o Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB a Obras de Arte Especiais (VERLY, 2015). As aplicações de Verly (2015) eram restritas a inspeções visuais, registros fotográficos e utilização de alguns equipamentos como trena e fissurômetro, quando necessário. No contexto de adição de novos danos à ficha de inspeção, algumas proposições como a de Lauria (2018) e Pavoni (2019) incorporam, assim como o presente estudo, novos critérios de análise, como, por exemplo, o dano de abrasão para aplicação da metodologia em viadutos.

Logo, os parâmetros adotados nesta pesquisa sugerem uma nova perspectiva de investigação: o uso de imagens geradas a partir de tomógrafos ultrassônicos e radar GPR para subsidiar as decisões baseadas no Grau de deterioração final da estrutura. Não obstante, os critérios já estabelecidos pela metodologia GDE/UnB, diretamente relacionados com segurança estrutural e durabilidade das estruturas, possuem fatores de intensidade e ponderação do dano semelhantes às avaliações adicionais ao qual está sendo proposto. Assim, nota-se que quanto maior o “poder investigativo” propiciado ao inspetor, melhores são as condições de identificação de dano e menores as chances de acontecimento de sinistros, desastres, ou até mesmo o acontecimento de manutenções corretivas não programadas. E, no caso de inspeções em grandes obras de infraestrutura, tais como barragens de concreto, usinas hidrelétricas e bases de torres eólicas, o uso das técnicas apresentadas corroboram para um diagnóstico mais assertivo e intervenções mais pontuais.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

Com base nos resultados obtidos de caracterização dos concretos C25 e C45, por ensaios não destrutivos, foi possível concluir que:

- De um modo geral obteve-se uma boa correlação entre os resultados de resistência à compressão ou módulo de elasticidade *versus* ensaios não destrutivos, com coeficientes de determinação R^2 acima de 0,8 para concretos com cura úmida e R^2 acima de 0,7 para concretos com cura ao ar. Entretanto, cabe ressaltar que a utilização das técnicas não destrutivas deve ser feita com cautela e visando identificar, principalmente, uma tendência de comportamento. Assim, o uso das correlações é possível e viável desde que observadas algumas condições básicas para realização de cada método de ensaio, como idade, umidade, cura e integridade da superfície do concreto a ser analisado.
- Para o concreto C25, obteve-se coeficientes de determinação R^2 entre IE e resistência à compressão da ordem de 1,00 e de 0,81 para IE e módulo de elasticidade. Quando analisada a correlação da velocidade de onda ultrassônica com os parâmetros de resistência no concreto C25, obteve-se R^2 de 0,97 e 0,93, respectivamente, para resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- Para o concreto C45, obteve-se coeficientes de determinação R^2 entre IE e resistência à compressão da ordem de 0,96, e 0,98 para IE e módulo de elasticidade. Quando analisada a correlação da velocidade de onda ultrassônica com os parâmetros de resistência no concreto C45, obteve-se R^2 de 0,97 e 0,93, respectivamente, para resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- O tipo de cura (úmida e ao ar) influenciou significativamente nos resultados dos ensaios não destrutivos, principalmente em resistividade elétrica superficial aparente e resistividade volumétrica. Assim, para a realização desses ensaios é imprescindível que a amostra em análise esteja em uma condição de poros saturados. Apenas a molhagem

superficial não é suficiente para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por este ensaio;

- para concretos submetidos a cura úmida, os resultados do ensaio de resistividade superficial e volumétrica se aproximam bastante. Porém quando submetido a cura seca ao ar, os valores chegaram a uma diferença percentual de mais de 300%;
- com o aumento da idade, houve acréscimo dos valores de resistividade elétrica superficial e volumétrica nas duas condições de cura e concretos com cura seca apresentaram maiores valores absolutos, como esperado;
- na condição de cura úmida, aos 28 dias, os concretos apresentam valores de resistividade coerentes com o apresentado na literatura, sendo $R_e = 4,20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ e $R_v = 7,40 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ para o concreto C25. Já para o concreto C45 têm-se $R_e = 6,30 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ e $R_v = 8,50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$;
- já na condição de cura ar, o concreto C25, apresenta valor de R_e , aos 28 dias, cerca de 2,38 vezes maior que o valor de R_e sob cura úmida. Para o concreto C45, essa diferença é ainda maior: o valor de R_e sob cura seca ao ar é cerca de 4,87 vezes maior que sob cura úmida. Essa mesma análise feita em relação aos valores de R_v , para o concreto C25 têm-se uma diferença de 3,08 vezes, e para o concreto C45 essa diferença é de 3,88 vezes.
- além disso, obteve-se o coeficiente de determinação R^2 da ordem de 0,88 e 0,97 para as R_e *versus* resistência à compressão para os concretos C25 e C45, respectivamente. Já para R_v e resistência à compressão, obteve-se R^2 de 0,91 para o C25 e 0,99 para o C45;
- quando realizada a correlação entre R_e e R_v com os resultados de índices esclerométricos e ultrassom, obteve-se coeficientes de determinação R^2 ainda maiores, sendo a R_v a técnica que apresentou melhores correlações, independentemente do método de cura empregado, e nos dois concretos analisados. Assim, a resistividade elétrica volumétrica mostra-se como uma importante ferramenta e estabelece boas correlações com outras grandezas destrutivas e não destrutivas. Em linhas gerais, na maioria das correlações geradas, obteve-se um melhor coeficiente de determinação R^2 (acima de 0,85) para resistividade elétrica volumétrica em relação à resistividade elétrica superficial (acima de 0,70);
- por fim, os resultados apresentados revelaram que foi possível e viável a realização da correlação entre os ensaios destrutivos e não destrutivos apresentados;

Com relação ao uso da tomografia ultrassônica e radar GPR para verificação de danos e aplicação na metodologia proposta, pode-se estabelecer as seguintes conclusões:

- a utilização da tomografia ultrassônica mostra-se comprovadamente útil para checar vazios e materiais de diferentes densidades internos na estrutura de concreto. Contudo, cada situação deve ser precisamente analisada, a depender das condições de ensaio e dos resultados que se espera, uma vez que a detecção de danos e vazios internos podem ser facilmente confundidas com a detecção de armaduras, por exemplo.
- pôde-se perceber que a tomografia ultrassônica não foi capaz de detectar danos relacionados à fissuras de flexão geradas nas lajes de C25 e C45. Já a técnica de resistividade elétrica superficial foi sensível para a detecção de danos, principalmente na região central das lajes. Os valores de resistividade tiveram uma leve tendência de diminuição, podendo ser perceptível por análise em escala colorimétrica;
- foi possível caracterizar, sem maiores dificuldades, os danos estruturais de delaminação, vazios e materiais com diferentes densidades no interior do concreto com o uso da tomografia ultrassônica. Entretanto, em algumas situações, a presença de barras de aço muito próximas tende a dificultar a avaliação dos resultados de tomografia e, adicionalmente, verifica-se que não há uma boa precisão para determinação do diâmetro e tamanho real destes elementos. O que se tem é, basicamente, uma noção da presença do elemento interno, com alguma indicação qualitativa das dimensões desse elemento;
- quanto ao uso do radar GPR, as condições da superfície para deslocamento do equipamento são fatores condicionantes para uma correta análise;
- para detecção de armaduras e materiais “estranhos” ao concreto, o radar GPR mostra-se também como uma boa ferramenta, principalmente quando em profundidades menores que 60.
- em comparação, pode-se dizer que as duas técnicas (tomografia ultrassônica e radar GPR) são sensíveis para detecção de barras, elementos e vazios internos em estruturas de concreto. Entretanto, a identificação de barras é mais precisa no radar GPR, assim como os vazios, homogeneidade e diferenças de densidade são mais fáceis de detecção no tomógrafo ultrassônico;

- cabe ressaltar também que para as duas técnicas em análise, a detecção de elementos internos nos elementos do concreto, foi mais fácil de detectar no concreto C45. Tanto o pulso ultrassônico, quanto as ondas eletromagnéticas permeia com maior facilidade em meios mais densos e menos porosos, que é o caso do concreto C45. No concreto C25, por exemplo, algumas barras localizadas na parte inferior dos blocos não foram possíveis de serem identificadas pelas técnicas. Já no concreto C45, não só todos os elementos inseridos internamente foram identificados, mas também alguns pontos com maior probabilidade de não-homogeneidade do concreto, uma vez que o meio em que a onda se propaga apresenta-se mais denso, o gradiente de densidade na presença um vazio, ninho de concretagem, ou armadura, por exemplo, torna-se também maior;
- de maneira análoga, tanto o radar GPR quanto o tomógrafo ultrassônico não fazem distinção, durante a leitura, se o defeito localizado se trata de uma barra, um tubo ou um vazio interno, cabendo ao operador a interpretação do que lhe é apresentado nos tomogramas e radargramas. Com efeito, é fundamental que se tenha o mínimo de conhecimento da geometria, armaduras e histórico de concretagem do elemento a ser analisado, uma vez que uma má interpretação pode falsear resultados ou indicar defeitos onde não existem.
- em relação aos danos de fissuração por flexão nas lajes, as imagens geradas pelo tomógrafo ultrassônico não foram suficientes para identificar, de maneira efetiva, as fissuras induzidas com abertura de 0,8 mm. Já com a técnica de resistividade elétrica superficial pôde ser observado uma pequena tendência de diminuição nos valores medidos, tanto na laje C25, quanto C45, principalmente na região central da laje (local de aplicação da carga).

Por fim, conclui-se com a proposição de um aprimoramento da Metodologia GDE/UnB, com a inserção de ensaios não destrutivos para avaliação dos danos de descontinuidade e presença de vazios internos; homogeneidade do concreto e risco de corrosão, com vistas à sua utilização em inspeções de grandes obras de infraestrutura.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestões para pesquisas futuras, têm-se a aplicação do método proposto pelo presente trabalho em uma grandes obras de infraestrutura em concreto, tais como barragens de concreto,

usinas hidrelétricas e bases de torre eólica, com a utilização dos ensaios não destrutivos incorporados.

Também sugere-se o desenvolvimento de pesquisas relacionadas com o aprofundamento na análise e tratamento das imagens geradas pelo tomógrafo ultrassônico e radar GPR com vistas a identificação de parâmetros quantitativos para caracterização de materiais com diferentes densidades e proporções

REFERÊNCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **Manual for Bridge Evaluation**. 3 ed. Washington, 2018. 349 p.
- ABDEL-QADER, I.; YOHALI, S.; ABUDAYYEH, O.; YEHIA, S. Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks. **NDT E Int.** 2008, 41, 395–405.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT_____. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019c.
- ABNT_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ABNT_____. **NBR 14037**: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações — Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ABNT_____. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. ABNT, 2018.
- ABNT_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. ABNT, 2018.
- ABNT_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos ABNT, 2018.
- ABNT_____. **NBR 16747**: Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT_____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT, 2020.
- ABNT_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. ABNT, 2021.
- ABNT_____. **NBR 17053**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas ABNT, 2022.
- ABNT_____. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. ABNT, 2022.
- ABNT_____. **NBR 17054**: Agregados para concreto - Requisitos. ABNT, 2022.
- ABNT_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. ABNT, 2015.
- ABNT_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, 2018.
- ABNT_____. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. ABNT, 2014.
- ABNT_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019c.

ABNT_____. **NBR 7584:** Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT_____. **NBR 8522-1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. ABNT, 2021.

ABNT_____. **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

ABNT_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. ABNT, 2015

ABNT_____. **NBR 9204:** Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. ABNT, 2012.

ABNT_____. **NBR 9452:** Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

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

ABNT_____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. ABNT, 2008.

ACI - American Concrete Institute. **Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**, ACI 228.2R98. Michigan, 2004.

ACI - American Concrete Institute. **Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**. ACI 228.2R-13. Michigan, 2013

ACI – American Concrete Institute. **CT-20: ACI Concrete Terminology**. Michigan, 2020.

ACI – American Concrete Institute. **Guide to Maintenance of Concrete Bridge Members**. ACI 345.1R-16. Michigan, 2016. 21 p.

AHMED, H. U.; FARAJ, R. H.; HILAL, N.; MOHAMMED, A. A.; SHERWANI, A. F. H. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. **Composites Part B: Engineering**, v.125, n.15, p.108769, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.10876>

AKHTAR, S. Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures. **J. Constr. Eng.** 2013, 2013.

ALANI, A.M.; ABOUTALEBI, M.; KILIC, G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. **J. Appl. Geophys.** 2013, 97, 45–54.

ALANI, A.M.; ABOUTALEBI, M.; KILIC, G. Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges. **NDT E Int.** 2014, 61, 80–94.

ALMEIDA, J. M. M. R. M. O. **Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida**. 2013. 380 f. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ALMEIDA, J.M.A.; SILVA, B.V.; CHIES, J.A.; GASPERIN, J.; SILVA FILHO, L. C. P.. Influência da utilização de procedimentos não padronizados de ensaio para a determinação experimental da resistência à compressão simples e do módulo estático de elasticidade do cimento Portland. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 466-479, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620150002.0047>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. **Annual Book of ASTM Standard – ASTM C 876**, Philadelphia, v. 04.02, sec. 4, p. 429-33, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G 57**: Standard test method field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. West Conshohocken, United States of America: ASTM, 2012.

ANDRADE, T. Tópicos sobre durabilidade do concreto. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 752-792, 2005.

ARNDT, R.; JALINOOS, F. NDE for corrosion detection in reinforced concrete structures—a benchmark approach. *In*: PROCEEDINGS OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDTCE'09). Nantes, France, jul. 2009. **Anais...** p. 30.

ARTESP – Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte no Estado de São Paulo. **Controle das condições estruturais, funcionais e de durabilidade das Obras de Arte Especiais**. ET-C-21/002. São Paulo. 2007. 86 p.

BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. **Energy and Buildings** 34, p.171-183. 2002.

BARNES, C.L.; TROTTIER, J.F.; FORGERON, D. Improved concrete bridge deck evaluation using GPR by accounting for signal depth–amplitude effects. **NDT E Int.** 2008, 41, 427–433.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; SIMÕES, M. L.. Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements. **Sensors**, [S.L.], v. 21, n. 6, p. 1961, 11 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s21061961>.

BARROS FILHO, G. F. **Técnicas de ensaios não destrutivos aliadas à inteligência artificial para avaliação da integridade estrutural de equipamentos offshore da indústria de petróleo e gás natural**. 2018. Monografia (Graduação) – UFPB/CT. João Pessoa, 2018.

BATISTA, K. S.; SENA, R. W. R.; OLIVEIRA, M. A. B.; ROLIM, M. G.; SILVA, P. B.; SILVA, S. M. Erros construtivos como origem de patologias no concreto armado em obras na cidade de São João do Rio do Peixe-PB. **Brazilian Journal Of Development**, [s.l.], v. 7, n. 1, jan. 2021. DOI:10.34117/bjdv7n1-379.

BELLI, K.; WADIA-FASCETTI, S.; RAPPAPORT, C. Model based evaluation of bridge decks using ground penetrating radar. **Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.** 2008, 23, 3–16.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012. 83 f.

BOCCARDI, S.; MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M.; SORRENTINO, L.; SIMEOLI, G.; RUSSO, P.. Effects of interface strength gradation on impact damage mechanisms in polypropylene/woven glass fabric composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 90, p. 179-187, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.004>.

BOGUE, R. Applications of robotics in test and inspection. **Ind. Robot** 2018, 45, 169–174.

BOLDO, P. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro**. 2002. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002. 295 f.

BUNGEY, J.H. Sub-surface radar testing of concrete: A review. **Constr. Build. Mater.** 2004, 18, 1–8.

BUNGEY, J.H.; GRANTHAM, M.G. **Testing of Concrete in Structures**; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.

BÜYÜKÖZTÜRK, O. Imaging of concrete structures. **NDT E Int.** 1998, 31, 233–243.

CAPMAS, A. Prólogo: Concreto e desenvolvimento sustentável. In: OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão**. São Paulo, 2000. 310 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo, Pini; Goiânia, Editora UFG, 1997.

CASCUDO, O.; REGO, J. H. ; FERREIRA, R. B. . **Relatório técnico de avaliação da estrutura de concreto do Estádio Serra Dourada contendo análise da estabilidade estrutural**. 2009. 84p.

CASCUDO, O.; TEODORO, R. ; OLIVEIRA, A. M. ; CARASEK, H. . Effect of Different Metakaolins on Chloride-Related Durability of Concrete. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 118, p. 1-12, 2021.

CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado**. 139f. 1994. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 1994.

CAVALCANTI, R. R. **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. 165p. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco.

CHASE, S.B.; WASHER, G. Nondestructive evaluation for bridge management in the next century. **Public Roads** 1997, 61, 16–25.

CHEN, S.; LAEFER, D.F.; MANGINA, E.; ZOLANVARI, S.I.; BYRNE, J. UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions. **J. Bridge Eng.** 2019, 24.

CHEYTANI, M.; CHAN, S.L.I. The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00663>.

CHIES, J. A. **Ensaio não destrutivo em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 133p. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHO, Y. S. Non-destructive Testing of High Strength Concrete using Spectral Analysis of Surface Waves. **NDT&E International**. n. 36, p. 229-235, 2003.

COLEMAN Z. W., SCHINDLER A. K., JETZEL C. M. Impact-Echo Defect Detection in Reinforced Concrete Bridge Decks Without Overlays. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, Vol. 35, 2021, p. 11.

COSTA, J. E. O melhor da maior conferência em Inteligência artificial e machine learning. **StartSe**. São Paulo. mar. 2019. Disponível em: https://www.startse.com/noticia/nova-economia/gtc-2019-tecnologia-inteligencia-artificial?utm_campaign=StartSe%20News%20da%20Reda%C3%A7%C3%A3o%2020190324&utm_source=hs_e. Acesso em: jul. 2021.

CRUZ, R.; SILVA, F. A.; CAVALCANTE, P. L.; PACHECO, R. R. M. Contribuições sobre inspeções em pontes e viadutos conforme NBR 9452:2016. **Revista Engenharia Estudo e Pesquisa**, São Paulo, ABPE, v. 17, n. 1, jan./jun. 2017.

DAFICO, L. C. M.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; CARASEK, H. Comparison of Infrared Thermography and Other Traditional Techniques to Assess Moisture Content of Wall Specimens. **Sensors**, [S.L.], v. 22, n. 9, p. 3182, 21 abr. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/s22093182>.

DAVIS, A.G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001. **NDT E Int.** 2003, 36, 185–193.

DIAS, N. G. **Avaliação da deterioração das estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Programa de pós graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção civil - GECON, 2018. 203 f.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Com O PROARTE, DNIT já executou obras em 505 estruturas**. [s.l.] 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/com-o-proarte-dnit-ja-executou-obras-em-505-estruturas>. Acesso em: jul. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 010/2004 – PRO**. Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. J. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. 173p

DUAN, Y.; SERVAIS, P.; GENEST, M.; IBARRA-CASTANEDO, C.; MALDAGUE, X. P. V.. ThermoPoD: a reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, [S.L.], v. 26, n. 7, p. 1985-1991, jul. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-012-0510-8>.

EUQUERES, P. **Metodologia de Inspeção em Estruturas de Pontes de Concreto Armado**. 2011. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.

FAGUNDES, R. C. L. **Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil**. 2022. 229 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

FARHANGDOUST S; MEHRABI A. Non-Destructive Evaluation of Closure Joints in Accelerated Bridge Construction using a Damage Etiology Approach. **Applied Sciences**. 2020; 10(4):1457.

Federal Highway Administration – FHWA. **The Strategic Highway Research Program**. 2017.

FIB - Fédération Internationale du Béton. **Bulletin 17** - Management, maintenance and strengthening of concrete structures, Technical Report, 2002.

FIB - Fédération Internationale du Béton. **Model Code 2010**: Final draft. Vol. 1. 2012. 350 p.

FONSECA, F. B.; GONÇALVES, H. F. D.; KENVYN, C. O.; RITA, C. C. P.; LAMAS, W. Q.; CAMARGO, J. R. Ensaios não destrutivos para avaliação da rigidez em elementos de concreto armado. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.2, p. 20009-20018. 2021

- FONSECA, R. P. **A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007. 213 p.
- FOX, M.; COLEY, D.; GOODHEW, S.; WILDE, P. de. Thermography methodologies for detecting energy related building defects. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 40, p. 296-310, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>.
- FREITAS, J.G. de; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 57-73, mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212014000100006>.
- GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 4 ed. São Paulo: Atlas, 1994. 207 p.
- GOMIDE, T. L. F; FAGUNDES NETO, J. C. P. e GULLO, M.A. **Engenharia Diagnóstica em Edificações.** São Paulo: PINI, 2009.
- GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies, **Health Information and Libraries Journal**, v 26, pp. 91–108, May 2009.
- GUCUNSKI, N.; KEE, S.; LA, H.; BASILY, B.; MAHER, A. Delamination and concrete quality assessment of concrete bridge decks using a fully autonomous RABIT platform. **Struct. Monit. Maint.** 2015a, 2, 19–34.
- GUCUNSKI, N.; KEE, S.H.; LA, H.; BASILY, B.; MAHER, A.; GHASEMI, H. Implementation of a fully autonomous platform for assessment of concrete bridge decks RABIT. **Struct. Congr.** 2015, 2015, 367–378.
- GUCUNSKI, N.; ROMERO, F.; KRUSCHWITZ, S.; FELDMANN, R.; ABU-HAWASH, A.; DUNN, M. Multiple complementary nondestructive evaluation technologies for condition assessment of concrete bridge decks. **Transp. Res. Rec.** 2010, 2201, 34–44.
- GUCUNSKI, N.; ROMERO, F.; KRUSCHWITZ, S.; FELDMANN, R.; PARVARDEH, H. **Comprehensive Bridge Deck Deterioration Mapping of Nine Bridges by Nondestructive Evaluation Technologies;** Department of Transportation: Ames, IA, USA, 2011
- GUIMARÃES, L. E. **Avaliação comparativa de grau de deterioração de edificações - estudo de caso: prédios pertencentes à Universidade Federal de Goiás.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2003. 265 f.
- HASANIAN, M.; CHOI S.; LISSENDEN, C. Laser Ultrasonics for Remote Detection of Stress Corrosion Cracking in Harsh Environments. *In: 27TH ASNT RESEARCH SYMPOSIUM*, 2018. **Anais...** p. 106-115, 2018.
- HEARN, G.; SHIM, H.S. Integration of bridge management systems and nondestructive evaluations. **J. Infrastruct. Syst.** 1998, 4, 49–55.
- HELENE, P. R. L. **La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón.** Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. 1983 p. 25 – 35. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2016/09/HelenePauloR%20L1983.pdf>. Acesso em: out. 2022.

HILÁRIO, H. G. C. **Análise da estrutura porosa de materiais cimentícios por meio da interação e associação de técnicas avançadas de caracterização**. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

HONG S., LEE Y., KIM S. Estimation of thickness of concrete structures using the impact echo method and ultrasonic pulse velocity method. *Architectural Research*, Vol. 18, Issue 4, 2016, p. 179-184.

HUANG, Y.; SHIH, P.; HSU, K.; CHIANG, C.. To identify the defects illustrated on building facades by employing infrared thermography under shadow. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 111, p. 102240, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102240>.

HUSTON, D.; CUI, J.; BURNS, D.; HURLEY, D. Concrete bridge deck condition assessment with automated multisensor techniques. **Struct. Infrastruct. Eng.** 2011, 7, 613–623.

HUSTON, D.; HU, J.Q.; MASER, K.; WEEDON, W.; ADAM, C. GIMA ground penetrating radar system for monitoring concrete bridge decks. **J. Appl. Geophys.** 2000, 43, 139–146.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGEN-C Y. **IAEA TCS -17: Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures**. Viena: 2002, 231 p

JOSHAGHANI, A.; SHOKRABADI M. Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements. **International Journal of Pavement Engineering**. 2021. DOI: 10.1080/10298436.2021.1954182

JUNGBLUT, M. E. **Estudo do condicionamento para o ensaio de carbonatação acelerada do concreto**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

KHAN, K.; RIET, G.; GLANVILLE, J.; SOWDEN, A.; KLEIJNEN, J. **Undertaking Systematic Reviews of Research on Effectiveness: CRD's Guidance for those Carrying Out or Commissioning Reviews**. NHS Centre for Reviews and Dissemination, University of York, 2001.

KITCHENHAM B.; CHARTERS, S. Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report, EBSE-2007-001, 2007.

KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte. *In: XXV JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL*, 1991, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1991, p. 185-197.

KOHL, C.; STREICHER, D. Results of reconstructed and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges. **Cem. Concr. Compos.** 2006, 28, 402–413.

KRAUSE, H.J.; WOLF, W.; GLAAS, W.; ZIMMERMANN, E.; FALEY, M.I.; SAWADE, G.; MATTHEUS, R.; NEUDERT, G.; GAMPE, U.; KRIEGER, J. SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges. **Physica C** 2002, 368, 91–95.

KRAUSE, M.; MIELENTZ, F.; MILMAN, B.; MÜLLER, W.; SCHMITZ, V.; WIGGENHAUSER, H. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system. **NDT E Int.** 2001, 34, 403–408.

KULKARNI, N. N.; DABETWAR, S.; BENOIT, J.; YU, T.; SABATO, A. Comparative analysis of infrared thermography processing techniques for roadways' sub-pavement voids detection. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 129, p. 102652, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102652>.

KULKARNI, N. N.; DABETWAR, S.; BENOIT, J.; YU, T.; SABATO, A. Comparative analysis of infrared thermography processing techniques for roadways' sub-pavement voids detection. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 129, p. 102652, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102652>.

LAURIA, M. L. M. **Avaliação dos viadutos do eixo rodoviário sul de Brasília pela metodologia GDE/UnB**. 2018. 128 f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

LEONEL, A. C. A.; FRANÇA, T. P. **Avaliação do comportamento de concretos aplicados em canais de drenagem urbana por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). 2019. 72 f. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de engenharia, Goiânia – GO, 2019.

LI, X.; QIN D.; HU, Y.; AHMAD, W.; AHMAD, A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P. A. systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103447, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2021.103447>.

LIANG, M.; SU, . Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 31, n. 10, p. 1427-1436, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00569-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00569-5).

LIM, M.K.; CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. **Constr. Build. Mater.** 2013, 38, 1310–1315

LIN, S.; MENG, D.; CHOI, H.; SHAMS, S.; AZARI, H. Laboratory assessment of nine methods for nondestructive evaluation of concrete bridge decks with overlays. **Constr. Build. Mater.** 2018, 188, 966–982.

LOPES, B. A. R. **Sistema de manutenção predial para grades estoques de edifícios**: Estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”. 1998. 308 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998.

LOPES, R. C. ; OLIVEIRA, A. M. ; CASCUDO, O. . Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura - Parte 2. **Rev. Materia-Rio de Janeiro**, v. 27, 2022b.

LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O.. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura - Parte 1. **Rev. Materia-Rio de Janeiro**, v. 27, p. 1-20, 2022a.

MAIERHOFER, C. Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar. **J. Mater. Civ. Eng.** 2003, 15, 287–297.

MAIERHOFER, C.; ZACHER, G.; KOHL, C.; WÖSTMANN, J. Evaluation of radar and complementary echo methods for NDT of concrete elements. **J. Nondestruct. Eval.** 2008, 27, 47.

MARTIN, M.; CHONG, A. BILJECKI, F.; MILLER, C.. Infrared thermography in the built environment: a multi-scale review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 165, p. 112540, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>.

MARTIN, M.; CHONG, A.; BILJECKI, F.; MILLER, C. Infrared thermography in the built environment: a multi-scale review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 165, p. 112540, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112540>.

MASER, K.R.; RODDIS, W.K. Principles of thermography and radar for bridge deck assessment. *J. Transp. Eng.* 1990, 116, 583–601.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. de; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. de. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. *Revista Alconpat*, [s.l.], v. 9, n. 2, p. 152-166, 30 abr. 2019. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>.

MEDEIROS, A. G.; SÁ, M. V. V. A.; FILHO, J. N. S.; ANJOS, M. A. S. Aplicação de metodologias de inspeção em ponte de concreto armado. *Ambiente Construído*, [s.l.], v. 20, n. 3, p. 687-702, jul. 2020.

MEDEIROS, M. H. F. D. **Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado**. N. 12. 2001. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Geraldo Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 1, p. 773-808.

MEHRABI, A. B.; FARHANGDOUST, S. A Laser-Based Noncontact Vibration Technique for Health Monitoring of Structural Cables: Background, Success, and New Developments. *Adv. Acoust. Vib.* 2018.

MEHRABI, A.; FARHANGDOUST, S. **ABC-UTC Guideline for: Selection of NDT Methods Application to Health Monitoring of ABC Closure Joints**; Accelerated Bridge Construction University Transportation Center: Miami, FL, USA, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO Microestrutura, Propriedades de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDES, P. T. C. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. 235p. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MICHAL, J.; ILJA, B.; JIŘÍ, G. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. *Procedia Engineering*, [S.L.], v. 190, p. 62-69, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.308>.

MITRE, M. P. **Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto**. 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 912 p.

NGIE, A.; ABUTALEB, K.; AHMED, F.; DARWISH, A.; AHMED, M.. Assessment of urban heat island using satellite remotely sensed imagery: a review. *South African Geographical Journal*, [S.L.], v. 96, n. 2, p. 198-214, 17 jun. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/03736245.2014.924864>.

NGUYEN, D. L.; KIM, D. J.; RYU, G. S.; KOH, K. T. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 1104-1116, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.012>.

NO, T.C.S. **Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures**; Training Course Series; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2002.

- OH, T.; KEE, S.H.; ARNDT, R.W.; POPOVICS, J.S.; ZHU, J. Comparison of NDT methods for assessment of a concrete bridge deck. **J. Eng. Mech.** 2012, 139, 305–314.
- OLENA, K.; YELENA, K.; MAKSIM, B. The impact of the COVID-19 pandemic on the creative industries: A literature review and future research agenda. **Journal of business research**, v.139 p.1192 -1210, 2021.
- OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O.. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction And Building Materials**, v. 192, p. 467-477, 2018.
- OLIVEIRA, C. B. L. **Determinação e análise de taxas de deterioração de pontes rodoviárias do Brasil**. 2019. 153 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2019.
- OLIVEIRA, C. B. L.; GRECO, M.; ROMEIRO, C. E.; LIMA, J. V. S.; COUTO, R. A. Eficácia da gestão de pontes rodoviárias à luz das práticas de inspeção brasileiras. **Transportes**, 2019, v. 27, n. 4, p. 172-186.
- OMAR, T.; NEHDI, M.L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography. **Autom. Constr.** 2017, 83, 360–371.
- PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. **Systematic Mapping Studies in Software Engineering**. 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 2008.
- POLDER, R. B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation**. Construction and Building Materials, v. 15, 2001, USA, p. 125-131.
- POMPEU NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D.R.C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista Matéria**, v. 16, n. 2, pp. 690 – 702, 2011.
- PROCEQ. **Quick Start Guide & Product Certificates**. 2022. Disponível em: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Proceq_GP8800%20%26%20GP8000_GP8100_200x140_Multilingual_DIGITAL_20210915.pdf. Acesso em: nov.2022.
- PULITI, M.; MONTAGGIOLI, G.; SABATO, A. Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 129, p. 103829, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103829>.
- REHMAN, S.K.U.; IBRAHIM, Z.; MEMON, S.A.; JAMEEL, M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. **Constr. Build. Mater.** 2016, 107, 58–86.
- RENS, K.L.; NOGUEIRA, C.L.; TRANSUE, D.J. Bridge management and nondestructive evaluation. **J. Perform. Constr. Facil.** 2005, 19, 3–16.
- REVILLA-CUESTA, V.; SKAF, M.; SANTAMARÍA, A.; ROMERA, J. M.; ORTEGA-LÓPEZ, V.. Elastic stiffness estimation of aggregate–ITZ system of concrete through matrix porosity and volumetric considerations: explanation and exemplification. **Archives Of Civil And Mechanical Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 2, jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s43452-022-00382-z>.
- RHAZI, J. NDT in civil engineering: The case of concrete bridge decks. **CSNDT J.** 2000, 21, 18–25.
- RHAZI, J.; DOUS, O.; BALLIVY, G.; LAURENS, S.; BALAYSSAC, J.P. **Nondestructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half-cell potential techniques**. In

Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany, 16–19 September 2003.

RHAZI, J.; DOUS, O.; LAURENS, S. **A new application of the GPR technique to reinforced concrete bridge decks.** In Proceedings of the 4th Middle East NDT Conference and Exhibition, Manama, Bahrain, December 2007; pp. 2–5.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASCUDO, O.; HELENE, P. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.** 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ROSA, F. B.; 2014. **Comparação das Metodologias de Inspeção de Obras de Arte: Metodologia GDE/UnB e DNIT.** Monografia (Graduação), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p.

SAHA, A. S.; AMANAT, KhaK. M. Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121088, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121088>.

SAHUINCO, M. H. C. **Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto.** 170 p. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SANDES, N. R. **Inspeção de pontilhão urbano em concreto armado segundo a NBR 9452:2019 – Inspeções de OAEs.** 2020. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Aracaju, 2020.

SANTOS, A. C.; ARRUDA, A. M.; SILVA, T. J.; VITOR, P. C. P. Estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 281–294, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300176>.

SANTOS, J. M. M. N. D. **Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão - o caso da ponte Nossa Senhora da Guia.** 2008. 244 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2008.

SBARTAĬ, Z.M.; LAURENS, S.; BALAYSSAC, J.P.; ARLIGUIE, G.; BALLIVY, G. Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures. **NDT E Int.** 2006, 39, 400–407.

SCIENCE DIRECT. **NDT&E internacional.** 2022 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/ndt-and-e-international>. Acesso em: nov. 2022.

SCOTT, M.; REZAIZADEH, A.; DELAHAZA, A.; SANTOS, C.G.; MOORE, M.; GRAYBEAL, B.; WASHER, G. A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment. **NDT E Int.** 2003, 36, 245–255.

SENA, G. O.; NASCIMENTO, M. L. M.; NETO, A. C. N. **Patologia das construções.** Salvador: 2B. 2020. 256 p.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, vol. 73, pp. 434–441, 2014.

SHOKOUHI, P.; WOLF, J.; WIGGENHAUSER, H. Detection of delamination in concrete bridge decks by joint amplitude and phase analysis of ultrasonic array measurements. **J. Bridge Eng.** 2013, 19, 04013005.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2016. 68 f.

SILVA, R. N. F. Monitoramento de integridade estrutural utilizando a técnica da impedância eletromecânica aplicada em estruturas de concreto. 2017. 146 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG. 2017.

SIMÕES, L. F.; RODRIGUES, P. F.; PINHEIRO, D. C. C. Análise crítica dos métodos de inspeção da ABNT NBR 9452:2019. *In: XII CBPE – CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS*. 2021. Congresso Virtual. **Anais...** Disponível em: http://www.abpe.org.br/trabalhos2021/ID_156.pdf. Acesso em: jul. 2021.

SOHN, H. Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems. John Wiley & Sons, p. 293-303, 2005.

SOUSA, J. L. C. de; AQUINO, F. K. M. de; NASCIMENTO, N. V. do; COSTA, A. A. V. da; TEIXEIRA, J. C. S. Reinforced concrete pathologies and their structural restoration methods. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 10, n. 1, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.12053. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12053>. Acesso em: jul. 2021.

SOUZA, V. C. M., RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1998.

SPÍNDOLA, G. M. **Avaliação do concreto estrutural de pilares utilizando ensaios não destrutivos em comparação com resultados do controle tecnológico**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia civil) — Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2017.

SULTAN, A. A.; WASHER, G. A. Comparison of Two Nondestructive Evaluation Technologies for the Condition Assessment of Bridge Decks. **Transportation Research Record**, [s.l.], v.2672, n. 41, p. 113-122, 2018 DOI:10.1177/0361198118790835

SUN, H.; PASHOUTANI, S.; ZHU, J. Nondestructive Evaluation of Concrete Bridge Decks with Automated Acoustic Scanning System and Ground Penetrating radar. **Sensors** 2018, 18, 1955.

SUTTER, L.; PETERSON, K.; JULIO-BETANCOURT, G.; HOOTON, D.; DAM, T.V.; SMITH, K. **The Deleterious Chemical Effects of Concentrated Deicing Solutions on Portland Cement Concrete**; No. SD2002-01-F; South Dakota Department of Transportation, Office of Research: Pierre, SD, USA, 2008.

TARUSSOV, A.; VANDRY, M.; DE LA HAZA, A. Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation. **Constr. Build. Mater.** 2013, 38, 1246–1254.

TEIXEIRA, P. C. F.; SILVA, R. N. F.; NETO, R. M. F. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Integridade de Estruturas de Concreto Armado, em Operação Contínua, pelo Método EMI e utilizando IA. *In: POSMEC 2019 – SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA*. 2019. Uberlândia - MG. **Anais...** Uberlândia – MG. 2019. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=POSMEC2019-0019>. Acesso em: jul. 2021.

TOUTANJI, H. Ultrasonic wave velocity signal interpretation of simulated concrete bridge decks. **Mater. Struct.** 2000, 33, 207.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review, **British Journal of management**, v 14, pp. 207-222, Sep. 2003.

TRINDADE, D. S. **Patologia em Estruturas de Concreto Armado**. 2015. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Centro De Tecnologia. Santa Maria: UFSM, 2015.

TUUTTI, K. **Corrosion Steel in Concrete**, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982, 469p.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **EM 1110-2-1102: Inspection and Evaluation of USACE Bridges**. Washington, 2020, 111 p.

UTAH DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (UDOT) Research Division. **Lessons Learned After Construction: Bridge County Road Over I-80**; Project No. IBHF-80-4(90)160; Utah Department of Transportation (UDOT) Research Division: Taylorsville, UT, USA, October 2004.

VAGHEFI, K.; OATS, R.C.; HARRIS, D.K.; AHLBORN, T.T.M.; BROOKS, C.N.; ENDSLEY, K.A.; ROUSSI, C.; SHUCHMAN, R.; BURNS, J.W.; DOBSON, R. Evaluation of commercially available remote sensors for highway bridge condition assessment. **J. Bridge Eng.** 2011, 17, 886–895.

VAN DERWIELEN, A.; COURARD, L.; NGUYEN, F. Nondestructive detection of delaminations in concrete bridge decks. In: **Proceedings of the XIII Internarional Conference on Ground Penetrating radar**, Lecce, Italy, 21–25 June 2010; p. 1–5.

VAZ, F. H. B. ; CARASEK, H. . Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. **CERÂMICA**, v. 65, p. 303-318, 2019. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653742508>.

VERLY, L. R. V. R.; SIMÕES, L. F.; RODRIGUES, P. F.; SILVA, V. C. P. **Proposta de melhoria dos métodos de inspeção de pontes do Brasil**. Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

VERLY, R. C. **Avaliação de Metodologias de Inspeção como Instrumento de Priorização de Intervenções em Obras de Arte Especiais**. 2015. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N.; HARPER, J. Effects of environmental variables on infrared imaging of subsurface features of concrete bridges. **Transp. Res. Rec.** 2009, 2108, 107–114.

WASHER, G.A. Developments for the non-destructive evaluation of highway bridges in the USA. **NDT E Int.**1998, 31, 245–249.

WERNECK, L. P.; COSTA, T. A.; FERREIRA, B.C. S. Estudo e avaliação do ciclo de vida do ambiente construído: uma análise sobre as possíveis manifestações patológicas que afetam edificações. **Brazilian Journal Of Development**, [s.l.], v. 6, n. 9, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-483>. Acesso em: jul. 2021.

XU, Y.; TURKAN, Y. Bridge Inspection Using Bridge Information Modeling (BrIM) and Unmanned Aerial System (UAS). In: **Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering**; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 617–624.

YEHIA, S.; ABUDAYYEH, O.; NABULSI, S.; ABDELQADER, I. Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques. **J. Bridge Eng.** 2007, 12, 215–225.

ZHANG, L.; HE, Q.; HU, J.. Infrared thermography enabled morphology detection approach for additive manufactured flexible electrodes. **Materials Letters: X**, [S.L.], v. 16, p. 100167, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mlblux.2022.100167>.

ZHU, J. **Non-Contact NDT of Concrete Structures Using Air Coupled Sensors**; Newmark Structural Engineering Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, IL, USA, 2008.

**ANEXO A - MANUAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA
GDE/UNB A OBRAS DE ARTE ESPECIAIS**



Universidade de Brasília

Metodologia GDE/UnB

Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB a OAEs



Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil - PECC/UnB

Metodologia GDE/UnB

Classificação de Danos e Avaliação da Deterioração de Estruturas de Concreto

Manual de Aplicação da Metodologia GDE/UnB a OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

Colaboradores:

João Carlos Teatini S. Clímaco

Antônio Alberto Nepomuceno

Eliane Kraus de Castro

Benedito Arruda Lopes

Plínio Boldo

Regis Pamplonet Fonseca

Priscilla Euqeres

João Henrique da Silva Rêgo

Rogério Calazans Verly

BRASÍLIA, JUNHO DE 2015



1 INTRODUÇÃO

A vida útil de uma estrutura de concreto depende fundamentalmente de manutenção, adequada, tendo em vista, em especial, que os eventuais problemas estruturais detectados no início têm seus efeitos minorados, o que pode reduzir substancialmente os custos de reparo. Entretanto, embora crescente o reconhecimento da importância da manutenção estrutural, são ainda insuficientes, mesmo em países desenvolvidos, as disposições normativas específicas para manutenção de estruturas.

Em geral, as normas recentes são prescritivas e se dedicam às disposições de projeto e execução, tendo como requisito a durabilidade, mas sem estabelecer critérios objetivos para a manutenção das estruturas. A recente norma NBR 15.575:2013¹ define requisitos a serem atendidos pelas edificações quanto ao desempenho acústico e térmico, à segurança contra incêndio, à estanqueidade, à segurança estrutural, à durabilidade e manutenibilidade, dentre outros. Especificamente quanto à manutenibilidade, a referida norma recomenda que a manutenção seja feita com base no *manual de operação, uso e manutenção*, que deve ser fornecido pelo incorporador ou construtor. Essa norma é uma iniciativa que facilitará demasiadamente a manutenção e a garantia do cumprimento da vida útil prevista para uma estrutura.

As demais estruturas, como as Obras de Arte Especiais - OAEs, barragens, galerias e outras não contempladas pela NBR 12.575:2013 devem seguir as diretrizes para a durabilidade definidas pela NBR 6118:2014 e os requisitos para o concreto definidos na NBR 12.655:2006. Neste trabalho, são tomadas como base nas prescrições da NBR 6118:2014, a primeira norma brasileira a estabelecer critérios explícitos sobre durabilidade na etapa de projeto, e nas prescrições aplicáveis da NBR 12.655:2006.

Com o objetivo de avaliar estruturas de concreto, foi desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB) uma metodologia para classificação de danos e avaliação da deterioração de estruturas de concreto armado de edificações usuais, que estabelece critérios para a classificação de danos que permitem calcular o grau de deterioração dos elementos estruturais isolados e da estrutura como um todo, indicando as ações necessárias ao desenvolvimento da vida útil prevista (BOLDO, 2002).

A metodologia, denominada GDE/UnB, prevê a realização de inspeções periódicas por engenheiros e técnicos com experiência na área, objetivando avaliar os elementos estruturais nos mais variados aspectos - segurança, funcionalidade e estética, e já foi testada com bons resultados em edifícios com diversas concepções estruturais e destinações de uso. Mostrou-se também eficiente em um estudo que visava sua integração ao sistema de manutenção utilizado pelo Banco do Brasil às suas edificações em todo o território nacional (LOPES, 1998). Isto conduziu, ainda, a uma extensão da pesquisa objetivando a avaliação estrutural de edificações gerenciadas pela Diretoria de Obras Militares do Exército Brasileiro, em todo país (BOLDO, 2002). Ainda no âmbito do PECC, Fonseca (2007) aplicou a metodologia no Instituto Central de Ciências - ICC, localizado no campus da Universidade de Brasília - UnB.

Além das aplicações na avaliação de estruturas de edificações, a metodologia se mostrou aplicável a estruturas de Obras de Arte Especiais - OAEs. Euqeres (2011) aplicou a metodologia em onze pontes com comprimentos variando de 20m a 150m, todas localizadas no

¹ NBR 15.575:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho



estado de Goiás.

Além das famílias e fatores propostos por Euqeres (2011), este manual inclui a alteração feita na equação de cálculo do *grau de deterioração da estrutura*, estudada nesta pesquisa.

A avaliação das estruturas é feita mediante um programa de inspeções, com o uso deste manual, e tem por objetivo contribuir para a definição das ações necessárias para a garantia da durabilidade das edificações e OAEs, nos aspectos de segurança, funcionalidade e estética, auxiliando a tomada de decisões de engenheiros e técnicos da área de manutenção e recuperação de estruturas.

2 PARÂMETROS DE INSPEÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

2.1.1 Agressividade do ambiente

A NBR 6118:2014 apresenta prescrições genéricas sobre a durabilidade de estruturas de concreto, em função da agressividade do meio ambiente, relacionada às ações físicas e químicas previstas, independentemente da atuação de ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento. A Tabela 2.1, a seguir, apresenta uma classificação da agressividade do ambiente, extraída da Tabela 6.1, NBR 6118:2014, a ser considerada nos projetos de estruturas correntes:

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ambiental (Adaptado de NBR 6118:2014)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Média	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

A avaliação da agressividade que um ambiente impõe a uma determinada estrutura depende não só de sua localização geográfica e destinação principal, como são os casos de ambientes rurais ou urbanos, mas também do tipo de agentes agressivos que atuam sobre a estrutura. A Tabela 2.1

ressalta diferenças importantes entre os ambientes industriais das Classe III e IV, levando em consideração que há diferentes tipos de indústrias e por isso diferentes intensidades de agressividade. Edificações onde funcionam indústrias de laticínios, refrigerantes ou de fertilizantes, mesmo podendo estar localizadas em uma área rural, são ambientes quimicamente agressivos e por isso o projetista responsável pelo seu projeto deve avaliar a possibilidade de considerar a Classe IV.

Para complementar o entendimento das diversas possibilidades de deterioração a que as estruturas de concreto armado e protendido estão sujeitas, a NBR 6118:2014 reserva um tópico aos mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto. Esses mecanismos podem ser divididos em três grupos, conforme a Figura 1.

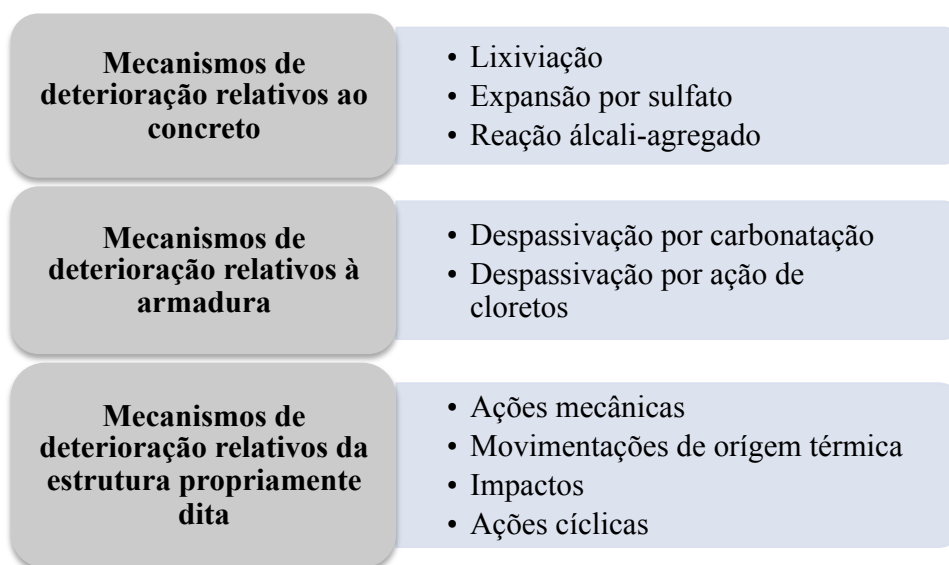


Figura 1 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto
(Adaptado de NBR 6118:2014)

O primeiro grupo trata dos ataques diretos ao concreto, causando o carreamento de materiais solúveis, como o hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, deixando a estrutura do concreto mais porosa e acessível a agentes agressivos. Além do carreamento de seus materiais constituintes, o concreto está sujeito a reações que dão origem a produtos expansivos, que geram tensões internas que podem comprometer a integridade do concreto.

Da mesma forma que o concreto, o aço também está sujeito a deterioração, e o principal mecanismo é a sua corrosão. O aço em meio alcalino (pH em torno de 12,5) não apresenta as condições necessárias para o início do processo corrosivo, e nesse caso pode-se dizer que a armadura está passivada. A carbonatação do concreto e a ação de cloretos faz com que a armadura se despassive, permitindo então que o processo corrosivo se instale. Além dos fenômenos citados até agora, a estrutura ainda está sujeita a ações mecânicas, impactos, dentre outras, que causam danos que podem comprometer a vida útil da estrutura.

Um importante complemento normativo nacional às prescrições da NBR 6118:2014, é a NBR 12.655:2006, que ratifica as classes de agressividade ambiental apresentadas naquela norma, e traz requisitos específicos para os concretos em condições especiais de exposição, como a necessidade de baixa impermeabilidade a água, exposição a processos de congelamento e descongelamento ou a agentes químicos de degelo. Dependendo da condição de exposição são

prescritos valores máximos para a relação água/cimento e valores mínimos para a resistência característica do concreto (f_{ck}).

No que se refere ao ataque do concreto por sulfatos, a NBR 12.655:2006 classifica a condição de exposição de acordo com a quantidade de sulfato solúvel (SO_4) em água no solo ou presente na água, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Requisitos para concreto exposto a solução com sulfatos (Adaptado de NBR 12.655:2014)

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO_4) presente a água (ppm)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	--	--
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1.500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1.500	0,45	40

* 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.

** Água do mar.

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

Os sulfatos não oferecem riscos diretos à armadura, uma vez que atuam no concreto reagindo com os aluminatos presentes. Por outro lado, os cloretos atuam diretamente sobre as armaduras de reforço do concreto. Nesse sentido, a NBR 12.655:2014 define o valor máximo da concentração de cloretos no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
Outros tipos de construção em concreto armado	0,30

Apesar de serem requisitos específicos para o concreto e para o aço, as ações do ambiente sobre uma estrutura sempre apresentam efeitos colaterais. Um exemplo é a ação dos íons cloreto, que apesar de não afeta diretamente a microestrutura do concreto, pode criar as condições para o início do processo corrosivo. Os produtos de corrosão possuem volume muito maior que o do aço, provocando tensões internas. Se o concreto não resistir a esses esforços, fissuras serão



abertas abrindo ainda mais caminhos para o acesso de agentes agressivos. Por outro lado, os sulfatos não atuam diretamente sobre as armaduras, mas se houver condições propícias, provocará reações expansivas fazendo com que o concreto se fissure, abrindo caminho para o CO_2 ou íons cloreto que despassivação as armaduras dando início ao processo corrosivo.

2.1.2 Identificação dos elementos estruturais

A aplicação da Metodologia GDE/UnB exige uma representação gráfica consistente da estrutura (plantas de fôrmas, cortes, croquis, etc.), que permita localizar e identificar, de maneira precisa, os elementos vistoriados, quanto à natureza, localização na estrutura, dimensões, tipos de ambiente, etc. É, também, essencial uma documentação fotográfica adequada da estrutura e das etapas da inspeção, que pode contribuir substancialmente para o processo de avaliação de danos e para a elaboração de diagnósticos e laudos técnicos.

Além do levantamento de toda a documentação disponível sobre a estrutura, na etapa de planejamento devem ser avaliadas as condições de acesso aos elementos estruturais. A depender da localização da estrutura, equipamentos especiais podem ser necessários. No caso de pontes extensas sobre rios muito largos, são necessários barcos para o acesso a toda a extensão da face inferior do tabuleiro. Em inspeções mais detalhadas de viadutos ou pontes muito altas, pode ser necessário o uso de cordas e técnicas de alpinismo para o acesso pormenorizado a toda a estrutura.

2.2 Conceituação dos tipos frequentes de danos em estruturas de concreto

Apresenta-se, a seguir, uma listagem dos danos mais frequentes em estruturas de concreto, em ordem alfabética, com uma conceituação concisa e sem se pretender esgotar os temas abordados. O objetivo é buscar maior uniformidade nas inspeções e padronizar a terminologia utilizada, de modo a permitir, posteriormente, a obtenção de resultados mais consistentes e menor subjetividade na quantificação dos danos com o uso da formulação da Metodologia GDE/UnB. É indispensável destacar a importância da consulta a bibliografias complementares, algumas referenciadas neste texto.

a) Carbonatação:

Fenômeno decorrente da penetração na rede de poros do concreto do dióxido de carbono, CO_2 , presente no ar, e de sua reação com os constituintes alcalinos da pasta de cimento, principalmente o hidróxido de cálcio. A carbonatação da cal reduz o pH do concreto e provoca a despassivação das armaduras, ou seja, a redução da sua capacidade de proteção do aço contra a corrosão. A carbonatação pode ser detectada por meio de um ensaio simples, com a aplicação na superfície do concreto de uma solução de fenolftaleína com indicador. A parte carbonatada do concreto deve ficar incolor ($\text{pH} < 8,5$) e a não carbonatada adquire a cor vermelho-carmim.

b) Cobrimento deficiente:

A NBR 6118:2014 recomenda que o projeto e a execução dos elementos constitutivos das estruturas de concreto devem respeitar os valores prescritos para o cobrimento nominal (c_{nom}) da camada de concreto sobre as armaduras de aço, definido como o cobrimento mínimo acrescido de uma tolerância de execução (Δc). Quando houver um controle de qualidade rigoroso, pode ser adotado um valor $\Delta c = 5\text{mm}$. Em caso contrário, nas obras correntes, deve ser, no mínimo, $\Delta c = 10\text{mm}$, resultando nos cobrimentos nominais indicados na Tabela 2.4.

Segundo a norma, os cobrimentos nominais e mínimos são sempre referidos à superfície da armadura mais externa, em geral os estribos. O cobrimento nominal de uma determinada barra deve sempre ser:

$$c_{nom} \geq \Phi_{barra} \quad (\text{Expressão 1.1})$$

$$c_{nom} \geq \Phi_{feixe} = \Phi_n = \Phi \sqrt{n}$$

$$c_{nom} \geq 0,5 \Phi_{bainha}$$

Tabela 2.4 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10 \text{ mm}$ (Adaptado de NBR 6118:2014)

c_{nom} (mm)	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³⁾
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	55
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos, e outros tantos, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelo exposto abaixo da tabela, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15\text{mm}$.

³⁾ As faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos devem ter cobrimento nominal $\geq 45\text{mm}$.

c) Contaminação por cloretos:

Contaminação do concreto causada pelo emprego na execução do concreto de aditivos à base de cloretos, com teor excessivo, ou pela penetração de cloretos presentes no meio ambiente, como no caso de regiões à beira-mar. É um dano comum em peças pré-moldadas, quando se pretende acelerar a cura com aditivos à base de cloretos. As manifestações mais comuns são as fissuras, locais ou generalizadas, sobre as armaduras e a presença de manchas no concreto pela retenção de umidade, frequentemente com a criação de fungos. Os cloretos podem ser também incorporados ao concreto pelo uso de água da rede pública no amassamento ou introduzidos nas operações de limpeza de pisos e fachadas, com a utilização de soluções de *HCl* em baixas concentrações (ácido muriático) (Nepomuceno, 1999).

d) Corrosão de armaduras:

A corrosão é um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos que ocupam um volume significativamente superior (em até 6 vezes) ao volume original das armaduras, sujeitando o concreto a elevadas tensões de tração (da ordem de até 15 MPa). Essas tensões ocasionam a fissuração do concreto e o posterior lascamento da camada de cobrimento do concreto (Cánovas, 1988). No seu início, a corrosão se manifesta na superfície do elemento estrutural com o aparecimento de manchas marrom-avermelhadas ou



esverdeadas, em razão da lixiviação do concreto (dissolução e arraste do hidróxido de cálcio da massa endurecida) dos produtos de corrosão, evoluindo com o tempo e podendo chegar até à perda total da seção da armadura.

e) **Desagregação do concreto:**

Fenômeno característico de ataques químicos do concreto, em formas diversas - lixiviação, reação álcali-agregado, reações expansivas com sulfatos, com a separação física de placas ou fatias de concreto, comprometendo o monolitismo do elemento. Na maioria das vezes, causa a perda da resistência de engrenamento entre os agregados (*aggregate interlock*) e da capacidade aglomerante da pasta (Sousa, 1999). Pode ocorrer, também, por ações biológicas (raízes e micro-organismos) ou, ainda, por dosagem incorreta e execução deficiente do concreto, perante as ações dos agentes agressivos (abrasão, vento, chuva, etc.).

f) **Deslocamento por empuxo:**

Deslocamento proveniente da pressão ativa exercida por um maciço não-coesivo sobre um anteparo vertical. Nos muros, cortinas ou paredes de contenção de concreto é causado pelo empuxo de terra ou água. Esses elementos devem ser providos de drenos, para evitar o acúmulo de água no terrapleno que suporta e que resultaria em acréscimo do empuxo hidrostático. Os deslocamentos causados pela saturação do maciço podem, ainda, ser agravados pela passagem de veículos.

g) **Desvios de geometria:**

Perda da verticalidade e do alinhamento de elementos estruturais em relação ao seu eixo, produzindo excentricidade adicional das forças atuantes. Pode ter como causas: deficiências na execução por movimentação ou incorreção de fôrmas e escoamentos ou por movimentação da estrutura, pela ação de esforços imprevistos ou não considerados corretamente no projeto.

h) **Eflorescência em superfícies de concreto:**

Precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície do concreto, quando os produtos da lixiviação interagem com o CO_2 presente no ar. Essa precipitação resulta da ação de águas puras e brandas no concreto, causando a hidrólise da pasta de cimento e dissolução dos produtos de cálcio. Teoricamente, a hidrólise da pasta continua até que a maior parte do hidróxido de cálcio tenha sido retirada por lixiviação, expondo os outros constituintes cimentícios à decomposição química. O processo produz géis de sílica e alumina, com pouca ou nenhuma resistência, e conseqüente perda significativa da resistência da pasta de cimento pela lixiviação da cal (Mehta, 1994). O fenômeno causa aumento da porosidade do concreto, sendo considerado similar à osteoporose do osso humano e podendo levar, em um espaço de tempo relativamente curto, à ruína do elemento estrutural (Souza, 1999). O pesquisador russo Skrylnikov (1933) chamava, figuradamente, esta forma de deterioração de “a morte branca do concreto” (apud Moskvín, 1980).

i) **Falhas de concretagem (nichos ou ninhos de concreto):**

Deficiência na concretagem da peça, com a ocorrência de vazios e exposição de agregados, por um ou mais dos fatores: dosagem inadequada do concreto, diâmetro máximo do agregado graúdo não condizente com as dimensões da peça, lançamento e/ou adensamento inadequados, taxas excessivas e espaçamento inadequado de armaduras e perda de nata de cimento por aberturas nas formas. Pode haver situações em que não somente os agregados

ficam expostos, mas haja exposição de barras das armaduras dos elementos estruturais, propiciando o início de processo corrosivo.

j) Fissuração inaceitável:

A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à variabilidade do concreto e à sua baixa resistência aos esforços de tração. No entanto a abertura das fissuras deve ser controlada de modo a se garantir a proteção das armaduras à corrosão e também promover a aceitabilidade sensorial dos usuários.

A NBR 6118: 2014 prescreve que a fissuração em elementos de concreto é nociva quando a abertura das fissuras na superfície ultrapassa os seguintes valores:

- Armaduras passivas: desde que a abertura característica das fissuras (w_k) fique entre 0,2mm e 0,4mm para as combinações frequentes, não representam importância significativa para a corrosão das armaduras;
- Armaduras ativas: há a possibilidade de corrosão sob tensão, portanto esses limites devem ser avaliados com base na Classe de Agressividade Ambiental - CAA (Tabela 2.1). Em resumo, pode-se dizer que não são aceitas fissuras para a protensão limitada e completa. No caso da protensão parcial, são aceitas fissuras menores que 0,2mm apenas para a CAA I;
- Aceitabilidade sensorial: mesmo que as fissuras estejam abaixo dos limites indicados na NBR 6118:2014, elas não devem causar desconforto psicológico aos usuários, o que geralmente ocorre com fissuras ativas.

k) Flechas excessivas:

A NBR 6118: 2014 prescreve limites para os deslocamentos das peças de estruturas de concreto, fazendo distinção entre a “aceitabilidade sensorial”, para prevenir a ocorrência sensações desagradáveis aos usuários, efeitos específicos referentes à utilização da estrutura, efeitos nos elementos não estruturais e efeitos nos elementos estruturais (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Limites para deslocamentos em estruturas de concreto armado e protendido (NBR 6118:2014)

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplos	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	L/200
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	L/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	L/250
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação à hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

Foram transcritos na Tabela 2.5 apenas alguns valores aplicáveis às estruturas de Obras de Arte Especiais - AOE, sendo deixados fora aqueles referentes aos efeitos em elementos não estruturais, como paredes, forros e pontes rolantes.

l) Manchas:

Ocorrência de manchas escuras em superfícies de concreto, causadas pela contaminação por fungos, mofo, etc., principalmente nas partes expostas da estrutura. Nessa categoria de danos, não devem ser consideradas outras manchas como as relacionadas à corrosão e eflorescências.

m) Obstrução de juntas de dilatação:

A junta de dilatação é uma separação física entre partes de uma estrutura, para que possam ocorrer movimentos sem a transmissão de forças e deslocamentos entre os elementos separados pela junta. A presença de material rígido ou o material de preenchimento da junta que tenha perdido a sua elasticidade produz tensões indesejáveis na estrutura, podendo ocasionar fissuras em elementos estruturais adjacentes à junta. Os sistemas de vedação e enchimento das juntas devem acomodar a amplitude dos seus movimentos.

n) Recalque de fundações:

O recalque provoca movimentação na estrutura que, conforme o seu tipo, pode ser afetada pelo assentamento total máximo (recalque uniforme), pela inclinação uniforme (desaprumo) ou por assentamentos diferenciais (recalques diferenciais e distorções angulares).

Os recalques distorcionais das fundações não são admissíveis estruturalmente, ocorrendo por deformações excessivas, e podem ser causados por um ou mais dos seguintes fatores: estimativa incorreta de cargas no cálculo estrutural; avaliação errônea dos esforços provenientes da estrutura sobre as fundações; modelos inconvenientes de cálculo das fundações; ausência, insuficiência ou má qualidade das investigações geotécnicas; má interpretação dos resultados da investigação geotécnica; adoção inadequada da tensão admissível do solo ou da cota de apoio das fundações; influências externas (escavações ou deslizamentos não previsíveis, agressividade ambiental, enchentes, construções vizinhas, descalçamento das fundações por escavações vizinhas); colapso do solo (por exemplo, devido à ruptura de tubulações subterrâneas ou vazamentos em reservatórios subterrâneos); alteração do nível do lençol freático; modificação no carregamento devido a mudança de utilização da estrutura (alargamentos das OAEs), efeito piscina (entupimento de drenos), sobrecargas não previstas; cargas dinâmicas (vibrações, tremores de terra, etc.) e, por fim, falhas de manutenção em obras críticas.

o) Sinais de esmagamento do concreto:

Processo de desintegração do concreto, podendo ser causado por erros de cálculo, sobrecargas excessivas, redistribuição de esforços ou movimentação da estrutura. No caso de pilares, caracteriza-se pelo aparecimento de fissuras diagonais e/ou verticais, podendo evoluir para um intenso lascamento do concreto, com perda de seção e flambagem das armaduras. Há também o caso de falhas nos aparelhos de apoio, que deveriam transmitir os esforços entre dois elementos estruturais, liberando alguns movimentos e suas respectivas reações. Nesse último caso ocorre o contato direto entre os dois elementos, causando concentração de tensões e posterior esmagamento do concreto.



p) Umidade excessiva na infra-estrutura:

A umidade excessiva na base de pilares e/ou em blocos de fundação, pela seu potencial agravamento com o favorecimento de recalques, é considerada um dano específico. Pode ser proveniente de deficiência no escoamento de águas pluviais, vazamento em tubulações da própria edificação ou adjacentes, vazamento em reservatórios enterrados, etc.

3 CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DOS ELEMENTOS E DA ESTRUTURA

3.1 Preliminares

São apresentados, a seguir, os parâmetros para aplicação da metodologia que visa quantificar os graus de deterioração dos elementos e da estrutura. Partindo dos fatores de ponderação e de intensidade dos danos nos elementos, faz-se a determinação sequencial dos graus dos danos existentes em cada elemento estrutural, dos graus de deterioração dos elementos e das famílias de elementos de mesma natureza, e, por fim, do grau de deterioração da estrutura, conforme proposto por Castro, Clímaco e Nepomuceno (1995).

O Anexo 2 deste roteiro apresenta as tabelas A.2, a serem preenchidas mediante inspeções da estrutura por técnicos treinados. Como complemento da inspeção da estrutura, e com o objetivo de confrontar os resultados da aplicação da metodologia com a situação física real da edificação, é altamente recomendável que seja feita uma ampla documentação fotográfica, que deverá constar do Relatório de Avaliação.

3.2 Fator de ponderação do dano (F_p)

Fator que visa quantificar a importância relativa de um determinado dano, no que se refere às condições gerais de estética, funcionalidade e segurança dos elementos de uma família, tendo em vista as manifestações patológicas passíveis de serem neles detectadas. Para sua definição são estabelecidos os problemas mais relevantes quanto aos aspectos de durabilidade e segurança estrutural. Assim, para cada manifestação patológica, e em função da família de elementos que apresentam o problema, foi estabelecido um grau numa escala de 1 a 5. Uma determinada manifestação patológica pode ter fatores de ponderação diferentes de acordo com as características da família onde o elemento se insere, dependendo das consequências que o dano possa acarretar.

3.3 Fator de intensidade do dano (F_i)

Fator que classifica a gravidade e evolução de uma manifestação de dano em um determinado elemento, segundo uma escala de 0 a 4, como segue:

- elemento sem lesões	$F_i = 0$
- elemento com lesões leves	$F_i = 1$
- elemento com lesões toleráveis	$F_i = 2$
- elemento com lesões graves	$F_i = 3$
- elemento em estado crítico	$F_i = 4$

A Tabela A.1 do Anexo 2 deste texto apresenta uma classificação dos danos mais frequentes em edificações usuais com estrutura de concreto armado, com uma identificação do nível de



gravidade das lesões e descrição sucinta das intensidades das manifestações, conforme características específicas, para fins de aplicação desta metodologia.

O Anexo 3 deste roteiro, com fotos ilustrativas, foi inserido com a finalidade de facilitar a identificação dos danos e a atribuição dos fatores de intensidade.

3.4 Grau do dano (D), Grau de deterioração de um elemento (G_{de}), Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}) e Grau de deterioração da estrutura (G_d)

O grau de cada dano no elemento estrutural é calculado em função do fator de ponderação (F_p) e respectivo fator de intensidade (F_i), atribuídos conforme este Roteiro de Inspeção. A formulação original e os procedimentos para o cálculo dos graus de deterioração dos elementos, das famílias de elementos e da estrutura (global) são apresentados no artigo de Castro, Clímaco e Nepomuceno (1995). Essa formulação foi posteriormente aperfeiçoada nos trabalhos de Lopes (1998) e Boldo (2002), com base em dezenas de aplicações da metodologia.

No Anexo 1, são apresentadas as fórmulas para o cálculo do Grau do Dano (D), Grau de deterioração do elemento (G_{de}), Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}) e Grau de deterioração da estrutura (G_d).

4 PLANILHAS DE DANOS PARA FAMÍLIAS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

A Tabela A.2 apresenta as planilhas específicas para as famílias de elementos mais comuns em estruturas de concreto de edificações usuais, com os danos possíveis e os respectivos fatores de ponderação, para uso na presente metodologia. Os fatores sugeridos na tabela foram definidos a partir de uma gama extensa de testes de aplicação (Castro, 1994; Lopes, 1998; Boldo, 2002). Os valores numéricos atribuídos aos fatores não devem, no entanto, ser encarados de forma determinística, podendo ser modificados, segundo as indicações de cada análise específica.



REFERÊNCIAS DO APÊNDICE

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014, 238p.
- BOLDO, P. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002. 295p.
- BOLDO, P., CLÍMACO, J. C. T. S. Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro, In: XXX Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, DF, 2002.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**, v. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 1981.
- CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1994. 185 p.
- CASTRO, E. K., CLÍMACO, J. C. T. S., NEPOMUCENO, A. A. (1995) - Desenvolvimento de uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto armado", 37º. Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto - Ibracon, **Anais**, v.1, pp. 293-307, Goiânia.
- CASTRO, E. K., CLÍMACO, J. C. T. S. - Avaliação da estrutura de uma edificação residencial após o reparo de elementos danificados. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto - Ibracon, **Anais**, Salvador, 1999.
- CLÍMACO, J. C. T. S, NEPOMUCENO, A. A. **Patologia, recuperação e manutenção de estruturas**, Notas de Aula, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 1999.
- FONSECA, R. P. **A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007. 213 p.
- LOPES, B. A. R. **Sistema de manutenção predial para grades estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente "Estrutura de Concreto"**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 308 p.
- LOPES, B. A. R.; CLÍMACO; J. C. T. S., NEPOMUCENO; A. A., CASTRO; E. K. Sistema de manutenção para grandes estoques de edifícios. In: CONPAT 99, **Anais**, v. 3, p. 1897-1905, Montevidéu, Uruguai, 1999.



MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MOSKVIN, V.; IVANOV, F.; ALEKSEYEV, S.; GUZEYEV, E. *Concrete and Reinforced Concrete Deterioration and Protection*, Mir Publishers, Moscow, Russia, 1983.

SOUZA, V. C. RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1999. 257 p.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos”, Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1981.



ANEXO 1

Formulação para avaliação quantitativa da deterioração de estruturas de concreto e ações recomendadas segundo os níveis de deterioração

**Grau de um Dano (D)**

$$D = 0,8 F_i F_p \quad \text{para } F_i \leq 2,0$$

$$D = (12 F_i - 28)F_p \quad \text{para } F_i > 2,0$$

Grau de deterioração de um elemento (G_{de})

$$G_{de} = D_{máx} \left[1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^n D_i \right) - D_{máx}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right]$$

Tabela 1 – Classificação dos níveis de deterioração do elemento e ações recomendadas

Nível de deterioração	G _{de}	Ações recomendadas
Baixo	0 - 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15 - 50	Definir prazo e natureza de nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (máximo 2 anos).
Alto	50 - 80	Definir prazo para inspeção especializada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano).
Sofrível	80 - 100	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa. Planejar intervenção em curto prazo (máximo 6 meses).
Crítico	> 100	Inspeção especializada imediata e medidas emergenciais (alívio de cargas, escoramento, etc.). Planejar intervenção imediata.

Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df})

$$G_{df} = G_{de,máx} \left[1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^m G_{de,i} \right) - G_{de,máx}}{\sum_{i=1}^m G_{de,i}} \right]$$

Fatores de relevância estrutural das famílias de elementos (F_r)

Família	F_r
Barreiras, guarda-corpo, guarda rodas, pista de rolamento	1
Juntas de dilatação	2
Transversinas, cortinas, alas	3
Lajes, fundações, vigas secundárias, aparelhos de apoio	4
Vigas e pilares principais	5

Grau de Deterioração da Estrutura (G_d)

$$G_d = \frac{K_{m\acute{a}x}}{7,07} \sqrt{1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^k K_i\right) - K_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^k K_i}}$$

Tabela 2 – Classificação dos níveis de deterioração da estrutura e ações recomendadas

Nível de deterioração	G_{de}	Ações recomendadas
Baixo	$0 > 15$	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	$15 - 50$	Definir prazo e natureza de nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (máximo 2 anos).
Alto	$50 - 80$	Definir prazo para inspeção especializada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano).
Sofrível	$80 > 100$	Definir prazo para inspeção especializada rigorosa. Planejar intervenção em curto prazo (máximo 6 meses).
Crítico	> 100	Inspeção especializada imediata e medidas emergenciais (alívio de cargas, escoramento, etc.). Planejar intervenção imediata.



ANEXO 2

Tabelas de classificação dos fatores de intensidade e de ponderação dos danos

Tabela A.1: Classificação dos danos e fatores de intensidade (F_i)

Tipos de danos	Valores de F_i
Carbonatação	1 → localizada, com regiões com $\text{pH} < 9$, sem afetar as armaduras. 2 → localizada, atingindo a armadura, em ambiente seco. 3 → localizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido. 4 → generalizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido.
Cobrimento deficiente	1 → menores que os previstos em norma sem, no entanto, permitir a localização da armadura. 2 → menor que o previsto em norma, permitindo a localização visual da armadura ou armadura exposta em pequenas extensões. 3 → deficiente, com armaduras expostas em extensões significativas.
Contaminação por cloretos	2 → elementos abrigados sem umidade 3 → elementos no exterior sem umidade 4 → ambientes úmidos.
Corrosão de armaduras	2 → manifestações leves, pequenas manchas. 3 → grandes manchas e/ou fissuras de corrosão. 4 → corrosão acentuada da armadura principal, com perda relevante de seção ($> 20\%$ do diâmetro).
Desagregação	2 → início de manifestação. 3 → manifestações leves, início de estofamento do concreto. 4 → por perda acentuada de seção e esfrelamento do concreto.
Deslocamento por empuxo	3 → deslocamento lateral da cortina no sentido horizontal, estável. 4 → deslocamento lateral da cortina no sentido horizontal, instável.
Desplacamento	2 → pequenas escamações do concreto. 3 → lascamento de grandes proporções, com exposição da armadura. 4 → lascamento acentuado com perda relevante de seção.
Desvios de Geometria	2 → pilares e cortinas com excentricidade $e \leq h/100$ ($h = \text{altura}$). 3 → pilares e cortinas com excentricidade $h/100 \leq e < h/50$. 4 → pilares e cortinas com excentricidade $e \geq h/50$.
Eflorescência	1 → início de manifestações. 2 → manchas de pequenas dimensões. 3 → manchas acentuadas, em grandes extensões. 4 → grandes formações de crostas de carbonato de cálcio (estalactites).
Falha de concretagem	1 → superficial e pouco significativa em relação às dimensões da peça. 2 → significativa em relação às dimensões da peça. 3 → significativa em relação às dimensões da peça, com ampla exposição da armadura. 4 → perda relevante da seção transversal da peça ($> 20\%$ da área).
Fissuras	1 → abertura menores do que as máximas previstas em norma. 2 → estabilizadas, com abertura até 40% acima dos limites de norma. 3 → aberturas excessivas; estabilizadas. 4 → aberturas excessivas; não estabilizadas.

Tabela A.2: Classificação dos danos e fatores de intensidade (F_i)

Tipos de danos	Valores do Fator de Intensidade do Dano
Flechas	1 → não perceptíveis a olho nu. 2 → perceptíveis a olho nu, dentro dos limites previstos na norma. 3 → superiores em até 40% às previstas na norma. 4 → excessivas.
Impermeabilização deficiente	2 → danos na camada protetora e/ou perda de elasticidade do material da impermeabilização. 3 → descontinuada, degradada em alguns pontos (pontos de infiltração). 4 → degradação acentuada, com perda relevante da estanqueidade.
Infiltração de água	1 → indícios de umidade. 2 → pequenas manchas. 3 → grandes manchas. 4 → generalizada.
Manchas	2 → manchas escuras de pouca extensão, mas significativas (< 50% da área visível do elemento estrutural). 3 → manchas escuras de grande extensão (>50%). 4 → manchas escuras em todo o elemento estrutural (100%).
Obstrução de juntas de dilatação	2 → perda de elasticidade do material da junta; início de fissuras paralelas às juntas nas lajes e paredes adjacentes. 3 → presença de material não compressível na junta; incidência significativa de fissuras paralelas às juntas nas lajes e paredes adjacentes. 4 → fissuras em lajes e paredes adjacentes às juntas, com prolongamento em vigas e/ou pilares de suporte.
Recalques	2 → indícios de recalque pelas características das trincas na alvenaria; 3 → recalque estabilizado com fissuras em peças estruturais. 4 → recalque não estabilizado com fissuras em peças estruturais.
Sinais de esmagamento do concreto	3 → desintegração do concreto na extremidade superior do pilar, causada por sobrecarga ou movimentação da estrutura; fissuras diagonais isoladas. 4 → fissuras bi-diagonais, com lascamento e/ou esmagamento do concreto por cisalhamento-compressão, com perda substancial de material; exposição e início de flambagem de armaduras.

**Tabela B.1: Famílias de elementos estruturais e fatores de ponderação (F_p)****PILARES**

Nome do Elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Desplacamento	3			
Desvio de geometria	4			
Eflorescência	2			
Falha de concretagem	3			
Fissuras	2 a 5*			
Manchas	3			
Recalque	5			
Sinais de esmagamento	5			
Umidade excessiva na infraestrutura	4			

* Consultar Tabelas C

VIGAS E TRANSVERSINAS

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Desplacamento	3			
Eflorescência	2			
Fissuras	2 a 5*			
Falhas de concretagem	2			
Flechas	5			
Infiltração de água	3			
Manchas	3			
Sinais de esmagamento	5			

* Consultar Tabelas C

**Tabela B.2: Famílias de elementos estruturais e fatores de ponderação (F_p)****LAJES**

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	3			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Desplacamento	3			
Eflorescência	2			
Falhas de concretagem	2			
Fissuras	2 a 5*			
Flechas	5			
Infiltração de água	3			
Manchas	3			

* Consultar Tabelas C

GUARDA-CORPOS, BARREIRAS, GUARDA-RODAS

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Desplacamento	3			
Eflorescência	2			
Falha de concretagem	2			
Fissuras	2 a 5*			
Manchas	3			
Sinais de esmagamento	4			

* Consultar Tabelas C

Tabela B.3: Famílias de elementos estruturais e fatores de ponderação (F_p)**CORTINAS, ALAS**

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Deslocamento por empuxo	5			
Desplacamento	3			
Desvio de geometria	3			
Eflorescência	2			
Falha de concretagem	2			
Fissuras	2 a 5*			
Infiltração de água	3			
Manchas	3			
Sinais de esmagamento	5			

* Consultar Tabelas C

BLOCOS DE FUNDAÇÃO

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Carbonatação do concreto	3			
Cobrimento deficiente	3			
Contaminação por cloretos	4			
Corrosão de armaduras	5			
Desagregação	3			
Desplacamento	3			
Eflorescência	2			
Falha de concretagem	3			
Fissuras	2 a 5*			
Recalque	5			
Sinais de esmagamento	5			
Umidade excessiva na infraestrutura	3			

* Consultar Tabelas C

**Tabela B.4: Famílias de elementos estruturais e fatores de ponderação (F_p)****JUNTAS DE DILATAÇÃO**

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Obstrução de junta	5			
Desgaste do material de preenchimento da junta	5			
Umidade	5			

PISTA DE ROLAMENTO

Nome do elemento →				
Local →				
Danos	F_p	F_i	D	Croquis/Observações
Descontinuidade	5			
Desgaste superficial	5			
Desgaste da sinalização	5			

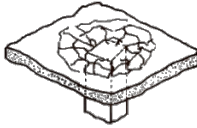
Tabela C.1: Classificação de fissuras em elementos de concreto armado e fatores de ponderação indicados (F_p)

	Fissuras*	Descrição	Croquis	F_p
ESTADO PLÁSTICO	De retração plástica do concreto	<ul style="list-style-type: none"> - comuns em lajes e paredes. - aproximadamente paralelas, superficiais e afastadas entre si de 0,3 a 1 m. 		2
	De assentamento do concreto	<ul style="list-style-type: none"> - sobre as armaduras. - em pilares, ficam abaixo dos estribos. - interação com armaduras vizinhas. 		3
	De movimentação de fôrmas	<ul style="list-style-type: none"> - indicam posicionamento e/ou fixação incorretos ou resistência insuficiente de fôrmas/escoramentos 		3
ESTADO ENDURECIDO	De retração do concreto por secagem	<ul style="list-style-type: none"> - fissuras em pilares e/ou vigas, por diferença grande de rigidezes (a). - aspecto de mosaico em lajes e paredes, podendo aparecer em ambas as faces (b). - indicam restrição de movimentos. - profundidade reduzida. - aberturas < 0,1 a 0,2 mm. 	 	3
	Mapeadas	<ul style="list-style-type: none"> - mais visíveis em superfícies lisas de lajes e paredes. - abertura e extensão reduzidas. - superfícies de concreto com desempenho excessivo. - danos só estéticos, em geral 		2
	De variações de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - em geral, normais ao eixo de elementos lineares, - indicam restrição de movimento por mau funcionamento de juntas de dilatação ou sua ausência. 	 	3

Tabela C.2: Classificação de fissuras em elementos de concreto armado e fatores de ponderação indicados (F_p)

	Fissuras*	Descrição	Croquis	F_p
ERROS DE PROJETO/ EXECUÇÃO OU CARGAS EXCESSIVAS	De flexão	- normais ao eixo, em trechos de momento fletor elevado e com boa aderência aço-concreto.		4
	De força cortante e flexão	- mesma inclinação nas duas faces. - podem entrar na zona de compressão e se dirigir aos apoios.		4
	De flexão, cortante e torção	- inclinações diferentes nas faces laterais, com menor abertura da fissura em uma das faces.		4
	De flexo-tração em pilares	- normais ao eixo do pilar na face tracionada e paralelas na face comprimida: podem indicar esmagamento do concreto. - mais próximas de extremidades com maior momento.		5
	De compressão	- paralelas ao eixo ou bi-digonais no centro iminência de ruptura. - indicam espaçamento excessivo ou deslocamento de estribos.		5
	De carga concentrada em área reduzida	- em apoios de pontes, estruturas pré-moldadas e apoios indiretos - indicam armadura deficiente de fretagem e mau detalhamento		3
	Em apoios do tipo Gerber (vigas e pilares)	- comuns em pontes e estruturas pré-moldadas. - indicam deficiência ao movimento em aparelhos de apoio e/ou detalhamento inadequado.		3
	De flexão em lajes	- na face inferior, saindo dos cantos e paralelas a bordos com continuidade ou vãos maiores. - na face superior, paralelas a bordos com continuidade.		4
	De momentos volventes	- em cantos de lajes extremas, podendo surgir nas duas faces. - influenciadas por variações de temperatura e retração.		3



	Fissuras*	Descrição	Croquis	F_p
	De punção	- traçado circunferencial e/ou radial em torno do pilar.		5



ANEXO 3

Fotos ilustrativas de danos em estruturas de concreto e fatores de intensidade sugeridos

FATORES DE INTENSIDADE (F_i) SUGERIDOS



Figura 1: corrosão de armadura ($F_i = 2$)



Figura 2: corrosão de armadura ($F_i = 3$)



Figura 3: corrosão de armadura ($F_i = 4$)



Figura 4: desagregação ($F_i = 2$)



Figura 5: deslocamento ($F_i = 2$)



Figura 6: deslocamento ($F_i = 3$)



Figura 7: deslocamento ($F_i = 4$)



Figura 8: eflorescência ($F_i = 2$)



Figura 9: eflorescência ($F_i = 3$)



Figura 10: eflorescência ($F_i = 4$)



Figura 11: falha de concretagem ($F_i = 1$)



Figura 12: falha de concretagem ($F_i = 2$)



Figura 13: falha de concretagem ($F_i = 3$)



Figura 14: falha de concretagem ($F_i = 3$)



Figura 15: falha de concretagem ($F_i = 4$)



Figura 16: manchas ($F_i = 2$)



Figura 17: manchas ($F_i = 3$)



Figura 18: manchas ($F_i = 4$)



Figura 19: sinais de esmagamento do concreto ($F_i = 3$)



Figura 20: sinais de esmagamento do concreto ($F_i = 4$)



Figura 21: flecha ($F_i = 4$)



Figura 22: recalque ($F_i = 4$)



ANEXO 4

Sugestão para ficha descritiva da Obra de Arte Especial

**FICHA DESCRITIVA DA OBRA DE ARTE ESPECIAL**

Dados básicos			
Nome da OAE:		Data da inspeção: ____/____/____	
Cidade mais próxima:			UF: _____
Coordenadas GPS:	Altitude (m):	Latitude (S) (°)	Longitude (W) (°)
Localização (km):			
Natureza da transposição: <input type="checkbox"/> Ponte <input type="checkbox"/> Viaduto sobre rodovia <input type="checkbox"/> Viaduto sobre ferrovia <input type="checkbox"/> Passagem Inferior			
Sistema construtivo: <input type="checkbox"/> Moldado no local <input type="checkbox"/> Pré-moldado <input type="checkbox"/> Balanços sucessivos <input type="checkbox"/> Outro _____			
Comprimento (m):		Largura (m):	
Classe de Agressividade Ambiental (NBR 6118:2014): <input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III <input type="checkbox"/> IV			
Projetista:			
Construtor:			
Ano da construção:			
Características da região: <input type="checkbox"/> Plana <input type="checkbox"/> Ondulada <input type="checkbox"/> Montanhosa			
Traçado: <input type="checkbox"/> Tangente <input type="checkbox"/> Curvo			
Características dos vãos:			
Número de vãos: _____	Descrição dos vãos:		
Responsável pela inspeção:			
Nome:			
Formação:			
Empresa:			