UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Gabriela Santiago João

Julia Saraiva Sampaio

Letícia Lorena Soares Novais

PREVISÃO DA VIDA ÚTIL EM INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS: ESTUDO DE CASO DAS PONTES SOBRE A MARGINAL TIETÊ

São Paulo

2021

Gabriela Santiago João
Julia Saraiva Sampaio
Letícia Lorena Soares Novais

PREVISÃO DA VIDA ÚTIL EM INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS: ESTUDO DE CASO DAS PONTES SOBRE A MARGINAL TIETÊ

Monografia apresentada à Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Moraes Pereira

São Paulo
2021

A todas que vieram antes de nós.

AGRADECIMENTOS

A nossos pais, por nos terem feito chegar até aqui.

A nossos irmãos, pela alegria que trazem a nossas vidas.

Aos docentes e auxiliares da universidade que nos acompanharam nestes seis anos, por todo o suporte e empenho em compartilhar seu precioso conhecimento.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Valdir, pela paciência e auxílio.

A Thais, por compartilhar informações.

A Vinícius, pelo amor e apoio de sempre.

Aos profissionais de saúde que nos auxiliaram psicologicamente nesta árdua jornada.

Por fim, agradecemos umas às outras pelo companheirismo, amizade e apoio durante todo o curso e realização desta monografia. Formamos uma incrível equipe.

RESUMO

Com obras cada vez mais antigas, as manifestações patológicas nas estruturas de concreto são um tema de crescente interesse dentro da engenharia. Em decorrência do colapso ocorrido em um viaduto sobre a Marginal Pinheiros em 2018, foram realizadas pela Prefeitura de São Paulo inspeções emergenciais em algumas das obras de arte especiais da cidade. Com objetivo de demonstrar a importância e aplicabilidade da previsão de vida útil para programação de manutenções preventivas dentro das inspeções especiais determinadas pela NBR 9452:2019, o presente trabalho de pesquisa apresenta uma análise das OAEs sobre a Marginal Tietê através dos dados de suas inspeções, realizando também uma previsão da vida útil destas estruturas através dos métodos propostos por Tuutti (1982) e Possan (2010). Neste sentido, a vida útil estimada (VUE) mínima das obras estudadas variou entre 0,36 e 90,72 anos para o modelo de Tuutti e entre 3,25 e 76,91 anos para o modelo de Possan. Identificou-se que o modelo de Possan resulta em valores mais altos para obras mais novas, considerando seu alto fck e cobrimento dentro das normas atuais, não levando em conta a possível baixa qualidade do concreto devido a sua execução. O método de Tuutti obtém resultados relativamente maiores para obras antigas, possivelmente por avaliar a difusividade de carbonatação já atuante, considerando para o cálculo períodos nos quais as taxas de CO_2 no ambiente eram muito inferiores às atuais. Este estudo considera também em suas conclusões o fato de certas obras possuírem valores ruins para ensaios de ultrassom e de presença de agentes químicos agressivos ao concreto e às armaduras. Os resultados obtidos evidenciam alto grau de necessidade de manutenção nas referidas obras, além de demonstrar a possibilidade de aplicação dos métodos de previsão de vida útil aos trabalhos de inspeção, contribuindo para a programação de serviços de manutenção preventiva.

Palavras-chave: Vida útil; Obras de arte especiais; Carbonatação; Inspeções especiais; Patologia.

ABSTRACT

With increasingly older structural works, pathological manifestations in concrete structures are a topic of growing interest within engineering. As a result of the collapse of a viaduct over Marginal Pinheiros in 2018, emergency inspections were carried out by the São Paulo City Hall in some of the city's special structural works. In order to demonstrate the importance and applicability of the service life prediction for preventive maintenance scheduling within the special inspections determined by NBR 9452:2019, this research presents an analysis of the bridges over Marginal Tietê based on the data conteind in their inspections, also performing a prediction of the service life of these structures through the methods proposed by Tuutti (1982) and Possan (2010). In this sense, the minimum estimated service life (ESL) of the structures studied ranged between 0.36 and 90.72 years for the Tuutti model and between 3.25 and 76.91 years for the Possan model. It was identified that Possan's model results in higher values for newer structures, considering its high fck and cover within current standards, not taking into account a possible low quality of concrete due to its execution. The method of Tuutti results in relatively higher results for the older structures, possibly because it evaluates the diffusivity of carbonation already active, considering on the prediction periods in which the CO2 rates in the environment were much lower than the current ones. This study also considers in its conclusions the fact that certain structures have low values for ultrasonic tests and the presence of aggressive chemical agents to concrete and reinforcement. The results obtained show a high degree of need for maintenance in the structures, in addition to demonstrating the possibility of applying the methods of predicting service life to the inspection works, contributing to the scheduling of preventive maintenance services.

Keywords: Service life; Bridges; Carbonation; Structural inspections; Pathology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Definição das classes de agressividade ambientais, conforme NBR 6118:2014. ..26
Figura 2 – Demonstrativo da evolução dos custos, Lei de Sitter. 31
Figura 3 – Lista de pontes existentes na Marginal Tietê. 36
Figura 4 – Notícia de 1956 sobre a entrega de parte das obras de construção da Marginal Tietê. 38
Figura 5 – Registro da Marginal Tietê em 1974, com a Ponte Comunidade Húngara à frente e Ponte do Piqueri ao fundo. 38
Figura 6 – Vista lateral do trecho central da Ponte Freguesia do Ó, em arco triarticulado. 39
Figura 7 – Vista inferior de um dos trechos em grelha da Ponte Freguesia do Ó. 39
Figura 8 – Vista lateral do trecho central da Ponte da Casa Verde, em seção celular arqueada. 40
Figura 9 – Vista lateral de um dos trechos em grelha da Ponte da Casa Verde, com destaque para o Dente Gerber existente. 40
Figura 10 – Vista inferior de um dos trechos em grelha da Ponte das Bandeiras. 41
Figura 11 – Vista de uma das torres da Ponte das Bandeiras. 41
Figura 12 – Vista lateral da Ponte Presidente Jânio Quadros. 42
Figura 13 – Vista lateral de um dos trechos em grelha da Ponte Presidente Jânio Quadros. ..42
Figura 14 – Vista lateral do trecho central da Ponte Presidente Dutra. 42
Figura 15 – Vista inferior do trecho central da Ponte Presidente Dutra. 42
Figura 16 – Vista lateral da Ponte Tatuapé. 43
Figura 17 – Vista inferior da Ponte Tatuapé. 43
Figura 18– Ensaios realizados nas obras estudadas. 44
Figura 19– Esclerômetro de reflexão. 45
Figura 20 – Ensaio de esclerometria realizado na Ponte das Bandeiras em uma das vigas longarinas. 45
Figura 21–Equipamento para realização de ensaio de ultrassom no concreto. 46
Figura 22–Métodos de transmissão de ondas durante o ensaio de ultrassom. 46
Figura 23– Ultrassom realizado pelo método direto em uma das vigas longarinas da Ponte Presidente Jânio Quadros. 46
Figura 24 – Ultrassom realizado pelo método indireto em uma das vigas longarinas da Ponte Presidente Jânio Quadros. 46

Figura 25– Extração de CP em um dos pilares da Ponte Tatuapé. 47
Figura 26 – Ensaio de resistência à compressão. 47
Figura 27– Ponto de ensaio de carbonatação em um dos pilares da Ponte Freguesia do Ó, com armaduras passivadas..... 47
Figura 28 – Ponto de ensaio de carbonatação em uma das vigas longarinas da Ponte Freguesia do Ó, com armaduras despassivadas. 47
Figura 29– Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto (Tabela 5 da NBR 12655:2015). 48
Figura 30– Requisitos químicos do cimento Portland (Tabela 3 da NBR 16697:2018). 49
Figura 31– Fatores k para determinação da vida útil pelo método de Possan. 52
Figura 32– Produção de cimento no Brasil ao longo dos anos. 53
Figura 33– Teor de CO_2 na atmosfera de 1960 a 2020 (ppm). 54
Figura 34– Armadura e estribos rompidos em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó. 58
Figura 35 – Fissuras de posicionamento vertical em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó. 58
Figura 36– Concreto disgregado e segregado com armadura exposta em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó. 58
Figura 37 – Concreto disgregado no lábio polimérico. Nota-se lábio e perfil deteriorados – Ponte Freguesia do Ó. 58
Figura 38– Manchas de eflorescência e fuligem em uma das lajes – Ponte da Casa Verde. 60
Figura 39 – Aparelho de apoio com falha de contato – Ponte da Casa Verde. 60
Figura 40– Fissuras e mancha de umidade em uma das vigas travessas – Ponte da Casa Verde. 60
Figura 41 – Buraco e afundamento do pavimento em região de reparo – Ponte da Casa Verde. 60
Figura 42– Fissura com eflorescência e mancha de fuligem na laje – Ponte das Bandeiras. 61
Figura 43 – Concreto disgregado com armadura exposta na laje do arco – Ponte das Bandeiras. 61
Figura 44– Mancha de umidade em uma das paredes – Ponte das Bandeiras. 62
Figura 45 – Junta de dilatação encoberta por pavimento flexível – Ponte das Bandeiras. 62
Figura 46– Acúmulo de água no interior da seção celular – Ponte Presidente Jânio Quadros. 63

Figura 47 – Armadura exposta devido a baixo cobrimento em uma das vigas transversinas – Ponte Presidente Jânio Quadros. 63
Figura 48– Erosão sob a base do arco – Ponte Presidente Jânio Quadros. 63
Figura 49 – Pista de rolamento com fissuras no pavimento flexível – Ponte Presidente Jânio Quadros. 63
Figura 50– Resto de forma na face inferior da laje superior da seção celular – Ponte Presidente Dutra. 64
Figura 51 – Fissuras na borda da laje em balanço – Ponte Presidente Dutra. 64
Figura 52– Fissura horizontal no bloco de fundação de um dos pilares – Ponte Presidente Dutra. 65
Figura 53 – Concreto disgregado e vazio sob a cortina – Ponte Presidente Dutra. 65
Figura 54– Cordoalhas rompidas devido a choque de veículos – Ponte Tatuapé. 66
Figura 55 – Concreto disgregado com armadura exposta e mancha de fuligem na laje inferior – Ponte Tatuapé. 66
Figura 56– Fissuras mapeadas com eflorescência na laje inferior – Ponte Tatuapé. 67
Figura 57 – Concreto disgregado e segregado com armadura exposta em um dos pilares – Ponte Tatuapé. 67
Figura 58 - Esclerometria - Ponte Freguesia do Ó. 68
Figura 59 - Esclerometria - Ponte da Casa Verde. 68
Figura 60 - Esclerometria - Ponte das Bandeiras. 69
Figura 61 - Ultrassom - Ponte da Casa Verde. 70
Figura 62 - Ultrassom - Ponte das Bandeiras. 70
Figura 63 - Ultrassom - Ponte Presidente Jânio Quadros. 71
Figura 64 – Ultrassom - Ponte Tatuapé. 71
Figura 65 - Resistência à compressão axial - Ponte Freguesia do Ó. 73
Figura 66 - Resistência à compressão axial - Ponte da Casa Verde. 73
Figura 67 - Resistência à compressão axial - Ponte das Bandeiras. 74
Figura 68 - Resistência à compressão axial - Ponte Presidente Jânio Quadros. 74
Figura 69 - Resistência à compressão axial da Ponte Presidente Dutra. 75
Figura 70 - Resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé. 75
Figura 71 - Carbonatação - Ponte Freguesia do Ó. 76
Figura 72 - Cobrimento - Ponte Freguesia do Ó. 77
Figura 73 - Carbonatação - Ponte da Casa Verde. 77

Figura 74 - Cobrimento - Ponte da Casa Verde. 78
Figura 75 - Carbonatação - Ponte das Bandeiras..... 78
Figura 76 - Cobrimento - Ponte das Bandeiras. 79
Figura 77 - Carbonatação– Ponte Presidente Jânio Quadros..... 79
Figura 78 - Cobrimento – Ponte Presidente Jânio Quadros. 80
Figura 79 - Carbonatação - Ponte Presidente Dutra. 80
Figura 80 - Cobrimento - Ponte Presidente Dutra. 81
Figura 81 - Carbonatação - Ponte Tatuapé. 81
Figura 82 - Cobrimento - Ponte Tatuapé. 81
Figura 83 - Aspecto do concreto no qual se observa bordas de reação no contorno de agregado graúdo (G) e gel expansivo sobre argamassa (A) – Ponte Freguesia do Ó..... 82
Figura 84 - Detalhe do concreto no qual se observa um poro com a argamassa preenchido por tufos de etringita (Et). A=areiato – Ponte Freguesia do Ó. 82
Figura 85 - Aspecto do concreto na Amostra 01 no qual se observa massas brancas amorfas (gel) que se desenvolvem no contrato da argamassa com o agregado graúdo – Ponte da Casa Verde. 83
Figura 86 - Aspecto da amostra 02 no qual se observa material branco (gel) depositado sobre a superfície de quebra do agregado (G), borda de reação e a formação tufos de etringita (Et). A=argamassa – Ponte da Casa Verde. 83
Figura 87 - Aspecto do concreto na Amostra 01 no qual se observa o gel de aspecto leitoso recobrindo a superfície de descolamento do agregado graúdo (G). A=argamassa– Ponte das Bandeiras. 83
Figura 88 - Aspecto da amostra 03 no qual se observa material branco (possível gel) depositado sobre a superfície de quebra do agregado (G). A=argamassa – Ponte das Bandeiras. 83
Figura 89 - Aspecto do concreto no qual se observa o contato entre o agregado graúdo (G) e a argamassa sem evidências de reação álcali agregado. A=argamassa – Ponte Presidente Dutra. 85
Figura 90 – Detalhe do concreto no qual se observa o contato entre o agregado graúdo (G) e a pasta (P). – Ponte Presidente Dutra. 85
Figura 91 - Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte da Casa Verde..... 86
Figura 92 - Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte dos Bandeiras. 86
Figura 93 – Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte Presidente Dutra. ... 86

Figura 94 – Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte Tatuapé. 87
Figura 95 – Teor de íons sulfato sobre a massa de concreto (%) - Ponte Freguesia do Ó. 87
Figura 96 - Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte da Casa Verde. 88
Figura 97 – Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte dos Bandeiras. 88
Figura 98 - Teor de íons sulfato sobre a massa de concreto (%) - Ponte Presidente Jânio Quadros. 88
Figura 99 – Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte Presidente Dutra. 89
Figura 100 - Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte Tatuapé. 89
Figura 101 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte da Casa Verde. 90
Figura 102 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte das Bandeiras. 90
Figura 103 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte Presidente Jânio Quadros. 90
Figura 104 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte Presidente Tatuapé. 91
Figura 105 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte da Casa Verde. 91
Figura 106 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte das Bandeiras. 92
Figura 107 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Jânio Quadros. 92
Figura 108 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte da Casa Verde. 93
Figura 109 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte das Bandeiras. 93
Figura 110 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Jânio Quadros. 93
Figura 111 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Dutra. 94
Figura 112 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Tatuapé 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição do objetivo e frequência da manutenção dos sistemas relacionados aos tabuleiros da superestrutura. 32
Tabela 2 – Definição do objetivo e frequência da manutenção dos sistemas relacionados aos sistemas de drenagem dos tabuleiros da superestrutura. 33
Tabela 3 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado às juntas de dilatação da superestrutura. 33
Tabela 4 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado aos elementos de proteção e faixas especiais da superestrutura. 33
Tabela 5 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado aos elementos dos sistemas de sinalização da superestrutura. 34
Tabela 6 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionados às vigas da mesoestrutura. 34
Tabela 7 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionados aos pilares e fundações. 35
Tabela 8 – Situação das inspeções especiais nas pontes da Marginal Tietê. 37
Tabela 9– Relação entre a velocidade média da onda e a qualidade do concreto. 45
Tabela 10 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Freguesia do Ó. 58
Tabela 11 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte da Casa Verde. 59
Tabela 12 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte das Bandeiras. 61
Tabela 13 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Presidente Jânio Quadros. 62
Tabela 14 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Presidente Dutra. 64
Tabela 15 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Tatuapé. 65
Tabela 16 - Análise da qualidade do concreto por meio da média da velocidade de propagação linear. 72
Tabela 17 – Resistência à compressão axial (fck) de projeto. 76
Tabela 18 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Freguesia do Ó. 82
Tabela 19 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte da Casa Verde. 83
Tabela 20 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte das Bandeiras. 83
Tabela 21 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Presidente Jânio Quadros. 84
Tabela 22 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Presidente Dutra. 84
Tabela 23 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Tatuapé. 85

Tabela 24 – Número de pontos descartados e aceitos para a previsão da VUE. 95
Tabela 25 – Vida útil estimada para as pontes sobre a Marginal Tietê. 95
Tabela A1 – Dados do ensaio de esclerometria – Ponte Freguesia do Ó..... 107
Tabela A2 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Freguesia do Ó. .. 108
Tabela A3 – Dados do ensaio de determinação de profundidade de carbonatação..... 109
Tabela A4 – Vida útil estimada para a Ponte Freguesia do Ó – Método de Tuutti. 111
Tabela A5 – Vida útil estimada para a Ponte Freguesia do Ó – Método de Possan..... 111
Tabela B1 - Dados do ensaio de esclerometria – Ponte da Casa Verde..... 112
Tabela B2 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte da Casa Verde..... 113
Tabela B3 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte da Casa Verde. 114
Tabela B4 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte da Casa Verde. 115
Tabela B5- Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte da Casa Verde. 116
Tabela B6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte da Casa Verde. 116
Tabela B7 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé. 117
Tabela B8 – Vida útil estimada para a Ponte Casa Verde – Método de Tuutti. 118
Tabela B9 – Vida útil estimada para a Ponte Casa Verde – Método de Possan. 118
Tabela C1 - Dados do ensaio de esclerometria – Ponte da Casa Verde..... 120
Tabela C2 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte da Casa Verde. 121
Tabela C3 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte da Casa Verde..... 123
Tabela C4 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte da Casa Verde. 123
Tabela C5- Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte das Bandeiras. 125
Tabela C6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte das Bandeiras. 126
Tabela C7 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte das Bandeiras... 127

Tabela C8 – Vida útil estimada para a Ponte das Bandeiras – Método de Tuutti. 127
Tabela C9 – Vida útil estimada para a Ponte das Bandeiras – Método de Possan.....128
Tabela D1 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte Presidente Jânio Quadros.....129
Tabela D2 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Presidente Jânio Quadros.....131
Tabela D3 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte Presidente Jânio Quadros. 132
Tabela D4 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Jânio Quadros. 134
Tabela D5 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Jânio Quadros. 136
Tabela D6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Presidente Jânio Quadros.....138
Tabela D7 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Jânio Quadros – Método de Tuutti. 139
Tabela D8 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Jânio Quadros – Método de Possan. 140
Tabela E1 – Dados para ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Presidente Dutra.141
Tabela E2 – Dados do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação – Ponte Presidente Dutra. 141
Tabela E3 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Presidente Dutra. 142
Tabela E4 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Dutra – Método de Tuutti. 143
Tabela E5 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Dutra – Método de Possan.....144
Tabela F1 - Dados do ensaio de ultrassom – Ponte Tatuapé.....145
Tabela F2 – Dados para ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé.....149
Tabela F3 – Dados do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação – Ponte Tatuapé. 149
Tabela F4 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Tatuapé. 150

Tabela F5 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé. 150
Tabela F6 – Vida útil estimada para a Ponte Tatuapé – Método de Tuutti. 151
Tabela F7 – Vida útil estimada para a Ponte Tatuapé – Método de Possan.....151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

pH	Potencial hidrogeniônico
VUE	Vida Útil Estimada
NBR	Norma Brasileira
SP-OBRAS/DPR-NOA	Núcleo de Apoio às Inspeções e Manutenções de Obras de Arte Especiais
OAEs	Obras de Arte Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
OAE	Obra de Arte Especial
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
$C_{20}H_{14}O_4$	Fenolftaleína
CO_2	Dióxido de Carbono
ISO	International Organization for Standardization
ELD	Estado Limite de Durabilidade
MT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
IPR	Instituto de Pesquisas em Transportes
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
SEI	Sistema Eletrônico de Informações
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
SIURB	Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras
TT	Trem Tipo
RILEM	Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux
BS EN	British Standart European Norm
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society For Testing And Materials
NB	Norma Brasileira
kg	Quilograma
m^3	Metro cúbico
SO_3	Trióxido de Enxofre
g	Gramas

mol	Massa molar
SO_4	Sulfato
M	Massa molar
CP-I	Cimento Portland Comum
CP-V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
fck	Resistência à compressão axial do concreto
ppm	Partes por milhão
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
UR	Umidade Relativa
mm	Milímetros
cm	Centímetros
MPa	Mega Pascal
s	Segundos
RAA	Reatividade Álcali-Agregado
CP	Corpo de Prova
Et	Etringita
Pt.	Ponto
Cob.	Cobrimento
Carb.	Carbonatação

SUMÁRIO

1. Introdução 21

1.1. Justificativa 21

1.2. Objetivos 22

2. Revisão bibliográfica 25

2.1. Obras de Arte Especiais 25

2.2. Inspeções em OAEs 26

2.2.1. Tipos de inspeção 27

2.2.2. Manifestações patológicas 28

2.2.3. Ensaios 28

2.3. Conceito de vida útil 29

2.3.1. Previsão de vida útil 30

2.4. Manutenção 30

2.4.1. Manutenção da superestrutura 32

2.4.2. Manutenção da meso e infraestrutura 34

3. Metodologia 36

3.1. Obras estudadas 36

3.1.1. Ponte Freguesia do Ó 39

3.1.2. Ponte da Casa Verde 39

3.1.3. Ponte das Bandeiras 40

3.1.4. Ponte Presidente Jânio Quadros 41

3.1.5. Ponte Presidente Dutra 42

3.1.6. Ponte Tatuapé 42

3.2. Inspeções visuais 43

3.3. Métodos de ensaio 43

3.3.1. Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão 44

3.3.2. Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas 45

3.3.1. Determinação da resistência do concreto à compressão axial 46

3.3.2. Determinação da profundidade de carbonatação, cobrimento e pacometria 47

3.3.1. Reatividade álcali-agregado 48

3.3.2. Teor de íons cloreto 48

3.3.3. Teor de íons sulfato 49

3.4. Previsão da vida útil 50

4. Resultados 57
4.1. Inspeção visual 57
4.1.1. Ponte Freguesia do Ó 57
4.1.2. Ponte da Casa Verde 59
4.1.3. Ponte das Bandeiras 60
4.1.4. Ponte Presidente Jânio Quadros 62
4.1.5. Ponte Presidente Dutra 63
4.1.6. Ponte Tatuapé 65
4.2. Ensaios 67
4.2.1. Avaliação da dureza superficial pelo uso de esclerômetro de reflexão 67
4.2.2. Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas 69
4.2.3. Determinação da resistência à compressão axial 72
4.2.4. Determinação da profundidade de carbonatação, cobrimento e pacometria 76
4.2.1. Reatividade álcali-agregado 82
4.2.2. Teor de íons cloreto 85
4.2.3. Teor de íons sulfato 87
4.2.4. Resistência à compressão axial versus Velocidade de ultrassom 89
4.2.5. Profundidade de carbonatação versus Velocidade de ultrassom 91
4.2.6. Profundidade de carbonatação versus Resistência à compressão axial 92
4.3. Determinação da vida útil estimada através dos resultados de profundidade de carbonatação máxima da estrutura 94
5. Conclusões 99
Referências 101
Apêndices 107
Apêndice A – Ponte Freguesia do Ó 107
Apêndice B – Ponte da Casa Verde 112
Apêndice C – Ponte das Bandeiras 120
Apêndice D – Ponte Presidente Jânio Quadros 129
Apêndice E – Ponte Presidente Dutra 141
Apêndice F – Ponte Tatuapé 145

1. Introdução

As Obras de Arte Especiais são elementos essenciais do sistema rodoviário e ferroviário, sendo projetadas para durar por dezenas de anos. Sendo as pontes em sua maioria feitas de concreto armado ou protendido, sua principal degradação advém da corrosão das armaduras. O concreto é responsável por proteger tais armaduras por meio de seu pH alcalino, porém agentes agressivos presentes no ambiente podem atacá-lo de fora para dentro, permitindo que as armaduras sejam também atingidas. Por meio de métodos probabilísticos, é possível estimar o tempo necessário até que a degradação do concreto pelos agentes agressivos chegue às armaduras, tempo este chamado de Vida Útil Estimada (VUE), possibilitando que sejam realizados processos de manutenção e realcalinização do concreto antes do início da corrosão.

Apesar de haver estudos sobre o assunto e diversos trabalhos que propõem métodos probabilísticos de determinação da VUE, não é tão vasto o número de pesquisas que os apliquem a situações reais, demonstrando sua necessidade e possibilidade de utilização. Foram realizados trabalhos como A Previsão da Vida Útil da 3a Ponte de Vitória (2002), no qual foram traçadas curvas de degradação através de resultados de ensaios e avaliação climatológica da obra de arte, a fim de determinar o melhor intervalo para manutenções preventivas e corretivas.

Em relação aos métodos de previsão, foram propostos modelos como o de Andrade (2005), que utiliza a resistividade e potencial de corrosão; e o de Bob (1996), que pode ser utilizado com relação à carbonatação ou penetração de cloretos. A presente pesquisa valeu-se dos métodos de Tuutti (1982) e Possan (2010) para determinar a vida útil através dos resultados de cobrimento e profundidade de carbonatação.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho se dá pela aplicação dos modelos de Tuutti e Possan às obras de arte especiais presentes sobre a Marginal Tietê, estruturas que, em sua maioria, possuem mais de 60 anos de existência. A pesquisa busca avaliar as obras em questão por meio das inspeções especiais realizadas pela prefeitura do município de São Paulo, que compilam inspeção visual, análise estrutural e ensaios não destrutivos e semi-destrutivos, dentre os quais está o ensaio de determinação da profundidade de carbonatação, utilizado no cálculo da vida útil estimada pelos métodos propostos.

1.1. Justificativa

À medida que as obras vêm envelhecendo, as manifestações patológicas e manutenção das estruturas de concreto têm sido temas cada vez mais discutidos. Grande parte das obras de

arte especiais brasileiras foram construídas entre os anos de 1950 e 1970, quando o país construiu boa parte de seu sistema rodoviário. Sendo obras de tanta importância e cujo colapso representa um imenso risco aos usuários, o acompanhamento destas obras deve ser realizado de forma frequente, com inspeções rotineiras e especiais conforme NBR 9452:2019, além das devidas manutenções.

A lei de Sitter (1984) demonstra que a manutenção corretiva custa cinco vezes mais que a preventiva, fato que pôde ser percebido na prática no município de São Paulo após a queda parcial de um viaduto que fazia parte do Complexo Jaguaré, na Marginal Pinheiros. O incidente deu início a uma série de inspeções e manutenções especiais e emergenciais nas obras da PMSP, num processo que já deveria ser rotineiro para o Núcleo de Apoio às Inspeções e Manutenções de Obras de Arte Especiais (SP-OBRAS/DPR-NOA).

Sabendo que as inspeções possuem tamanha importância, sobretudo para as obras de arte especiais, esta pesquisa se justifica por representar uma previsão do tempo máximo para a realização de manutenção preventiva com relação a ação do dióxido de carbono sobre o concreto (carbonatação), de forma a evitar que o custo de manutenção se multiplique e, principalmente, não permitir que ocorram colapsos estruturais devidos a corrosão, protegendo os usuários das estruturas de concreto armado e protendido.

A escolha pelo fator carbonatação se deu pela localização das obras, que se encontram em local altamente urbanizado, com tráfego intenso de veículos sobre e sob as estruturas. Os métodos utilizados para previsão foram os de Tuutti e Possan devido a suas diferenças de fatores considerados, além de sua aplicabilidade.

1.2.Objetivos

O objetivo geral do trabalho é definir a vida útil restante para as pontes sobre a Marginal Tietê, localizada na região nordeste da cidade de São Paulo. Para cumprir o objetivo geral, foram definidos os 3 objetivos específicos descritos a seguir:

I. Verificar a condição das obras administradas pela Prefeitura Municipal de São Paulo por meio da inspeção visual auxiliada por análise estrutural, análise de ensaios e cálculo da vida útil restante.

II. Demonstrar a possibilidade de se prever a vida útil durante as inspeções especiais realizadas nas obras de arte especiais.

III. Comparar métodos de previsão, contribuindo com a escolha dos engenheiros e patólogos em suas futuras análises.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo foi elaborada uma análise das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, normas e manuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, livros, artigos e teses; todos referentes ao objetivo desta monografia, de forma a demonstrar as bases técnicas para análise dos resultados.

2.1.Obras de Arte Especiais

As Obras de Arte Especiais (OAEs) são estruturas que têm a finalidade transpor obstáculos como avenidas, vales, rios e outros. Quando as estruturas se encontram sobre os cursos da água, são denominadas de pontes. Com o decorrer do tempo essas estruturas são submetidas a ações externas devido a cargas móveis de veículos, forças do vento, ações da água de rios diretamente na meso e infraestrutura, variações de temperatura, retração e fluência do concreto, causando patologias e danos (ARAUJO, 2014).

Ao realizar projetos de construções das OAEs, deve-se levar em consideração normas que ditam padrões e diretrizes de segurança, como a norma ABNT NBR 6118:2014 – Projetos de estruturas de concreto, que determina uma série de requisitos para a elaboração de projetos de concreto simples, armado e protendido e definindo os estados limites das estruturas, sendo:

- Estado limite último;
- Estado limite de formação de fissuras;
- Estado limite de abertura das fissuras;
- Estado limite de deformações excessivas;
- Estado limite de descompressão;
- Estado limite de descompressão parcial;
- Estado limite de vibrações excessivas.

Estas estruturas devem ter a capacidade de resistir às influências ambientais previstas durante a elaboração do projeto, quando é prevista a Vida Útil de Projeto, que é o período durante o qual deve haver garantia de se manter as características das estruturas de concreto. Outros fatores citados pela NBR 6118:2014 que também auxiliam são os mecanismos de envelhecimento e deterioração das OAEs, sendo eles:

- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto: causados

pela lixiviação (ações de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas), expansão por ação de águas e solos, expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e agregados e reações deletérias superficiais de agregados decorrentes da ferrugem;

- Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura: causada pela carbonatação e o elevado teor de cloro;
- Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita: devido as ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação.

Nos projetos das estruturas devem ser analisadas as influências ambientais através das classes de agressividade do meio ambiente, conforme NBR 6118:2014. A Figura 1 apresenta a definição das classes citadas.

Figura 1 – Definição das classes de agressividade ambientais, conforme 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	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana[1), 2)]	Pequeno
III	Forte	Marinha[1)]	Grande
		Industrial[1), 2)]	
IV	Muito forte	Industrial [1), 3)]	Elevado
		Respingos de maré	

[1)] Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível 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).

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

[3)] Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

2.2.Inspeções em OAEs

As inspeções são de grande importância para análise das estruturas, de modo a avaliar anomalias existentes e estudar o desencadeamento das manifestações aparentes. A norma DNIT 010/2014 – Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido, define inspeção de pontes como atividades técnicas especializadas, coleta de elementos, de projeto e de construção, exame minucioso da ponte, elaboração de relatórios, avaliação do estado da obra e as recomendações, que podem ser de nova vistoria, de obras de manutenção, de obras de

recuperação, de reforço ou de reabilitação.

Na presente monografia, as obras de estudo são classificadas como estruturas de concreto, onde as inspeções foram definidas segundo ABNT NBR 9452:2019 – Inspeções de pontes, viadutos e passarelas de concreto, como um conjunto de procedimentos técnicos e especializados que compreendem a coleta de dados necessários à formulação de um diagnóstico da estrutura, visando manter ou reestabelecer os requisitos de segurança estrutural, de funcionalidade e de durabilidade.

2.2.1. Tipos de inspeção

Ainda segundo a NBR 9452:2019 as inspeções podem ser de cunho cadastral, rotineiro, especial ou extraordinário, as quais a norma regulariza conforme descrição a seguir:

- Inspeção cadastral: realizada logo após a conclusão da obra. Quando se é feita mudança em relação ao sistema estrutural também há a necessidade de se refazer este tipo de inspeção, para que se atualize o sistema de monitoramento;
- Inspeção rotineira: realizada periodicamente a cada ano. Está é uma inspeção visual que pode ou não contar com artefatos para melhor análise. Há o acompanhamento da evolução das manifestações patológicas observadas em inspeções anteriores, além de se examinar quanto às novas anomalias, reparos e/ou recuperação realizadas;
- Inspeção especial: realizada de forma periódica a cada cinco anos, podendo ser postergada até oito anos, para as obras que obtiverem nota de classificação excelente ou boa em inspeções anteriores. Contudo, a inspeção especial pode ser antecipada caso sua inspeção anterior apresente necessidade de intervenção de curto prazo, ou seja, notas de classificação crítica ou ruim. Caso seja previsto modificação quanto a estrutura ou reforços a inspeção especial poderá também ser solicitada antes do período de cinco anos. Seu objetivo é formular o diagnóstico e prognostico da estrutura, podendo haver a necessidade de utilização de equipamentos para acesso aos componentes da OAE;
- Inspeção extraordinária: realizada devido a uma ação não programada, devido a impacto de veículo, trem ou embarcação na obra, ou ainda por eventos da natureza. Este tipo de inspeção, que pode caracterizar avaliação minuciosa de elemento ou parte da OAE, apresenta relatório específico, com descrição da

obra, registro de anomalias, sendo necessário o mapeamento, relatório fotográfico e recomendação de terapia. Assim como na inspeção especial, pode ser necessário o uso de equipamentos especiais para o acesso ao elemento ou parte da estrutura da OAE a ser avaliado.

2.2.2. Manifestações patológicas

As manifestações patológicas identificadas em inspeções visuais das OAEs são um indicativo de possíveis problemas que possam prejudicar o funcionamento pleno da estrutura, ocasionando necessidade de se estabelecer classificação para os parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade, tal classificação obedecendo parâmetros previamente estabelecidos pela NBR 9452:2019.

> O ofício de inspecionar, diagnosticar, avaliar e propor intervenções em uma estrutura se parece em muitos aspectos ao de um médico e talvez, por essa razão, muitos dos termos empregados nesse campo da Engenharia tenham sido "herdados" da Medicina. Os sintomas são as manifestações patológicas que podem ser estudados por meio de exames clínicos ou em laboratórios (observações visuais e ensaios realizados "in loco" ou em laboratório). A coleta de informações preliminares sobres as condições e histórico do paciente é importante para que o médico formule as hipóteses de diagnostico que serão testadas na investigação minuciosa, etapa similar as denominadas de inspeção preliminar e anamnese (MITRE, 2005).

2.2.3. Ensaios

As inspeções em obras de arte especiais por muitas vezes são de caráter visual, porém para um estudo de condição de durabilidade da obra é necessário o uso de mecanismos que possibilitem um diagnóstico mais preciso, pois as manifestações patológicas encontradas superficialmente podem indicar um problema de maior gravidade, fato que pode ser descoberto através da análise de dados dos elementos estruturais ensaiados.

Mitre (2005) diz que os ensaios exploratórios devem servir para esclarecer ideias que se formulem sobre os possíveis mecanismos e causas dos problemas encontrados. São exemplos: extração de pequenas amostras de concreto para observação da pasta de cimento e dos agregados, percussão com um objeto metálico para verificar pontos com destacamento do concreto ou som cavo, ensaio de profundidade de carbonatação do concreto, entre outros.

Segundo Sahuinco (2011), tanto os ensaios não destrutivos quanto os semidestrutivos são utilizados para obter informações mais concretas e que sejam suporte para uma tomada de

decisão posteriormente, sendo que os ensaios colaboram quando não se pode observar a presença de deterioração aparente ou prevista, quando a condição de deterioração da estrutura se mostra extrema, ou ainda caso não se tenha desempenho estrutural satisfatório.

Um dos ensaios mais importantes é o que mede a profundidade de carbonatação, através do qual se obtém informação se o ponto estudado apresenta ou não carbonatação, e se há proteção às armaduras. A realização do processo se dá após a remoção de uma camada do concreto, podendo ser também com o pó do material. É feita então a aspersão de um líquido caracterizado por fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) diluída em álcool etílico. A análise visual se faz possível através da reação entre material e substância, que produz colorações que indicam o resultado que deve ser interpretado por aquele que faz o ensaio. Quando aplicado em meio básico, este apresenta coloração rosa e em meio ácido a coloração não se modifica. Com a análise se torna possível concluir a profundidade em que o concreto reagiu com o gás carbônico (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE, 2019, p. 177).

É possível afirmar que a corrosão das armaduras é a principal causa de deterioração precoce do concreto armado, onde o fator mais importante está associado à carbonatação do concreto. Por ser tratar de um fenômeno físico-químico, ocorre a neutralização dos produtos alcalinos hidratados do cimento, onde o pH do concreto é reduzido de 13 ou 12 para um fator inferior a 9. Isto ocorre devido à presença de hidróxidos de cálcio e o CO_2 presente na atmosfera, já que o avanço da carbonatação está associado diretamente com a facilidade em que este CO_2 tem de atingir o interior do concreto (PAULETTI, 2004 apud SAHUINCO, 2011).

Logo, os principais fatores que fortalecem a ação da carbonatação estão relacionados com: condições ambientais (concentração de CO_2, temperatura e umidade relativa do ar); condições de exposição (ambiente interno, externo, protegido ou desprotegido da chuva); e características do concreto (composição química do aglomerante, traço especificado e a qualidade da execução) (POSSAN, 2010).

2.3.Conceito de vida útil

A Vida Útil Estrutural está associada às condições de segurança e de utilização da estrutura, de modo que se garanta que não ocorra situações de colapso, deformações excessivas etc., dependendo diretamente da evolução e o desencadeamento da ação do tempo em relação aos materiais da estrutura (BRANCO, PAULO e GARRIDO, 2015).

Segundo NBR 6118:2014, por vida útil de projeto compreende-se o período durante o

qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que não haja intervenções de grande importância, atendendo os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, assim como os requisitos de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

A ISO 13823 (2008) define o ELD, ou Estado Limite de Durabilidade, um estado que corresponde ao início de deterioração significativa de um componente da estrutura. Neste sentido pode-se considerar a despassivação das armaduras como o momento no qual o concreto atinge seu ELD.

2.3.1. Previsão de vida útil

O monitoramento e cálculo da vida útil é de grande importância para uma OAE, pois, devido à sua grande importância como parte dos sistemas de transporte rodoviário e ferroviário, sua interdição acarreta perdas sociais, ambientais e econômicas. Desta forma, ao estimar a vida útil, de modo a prever um intervalo de duração das condições funcionais e estruturais das obras, se permite a implantação de um plano de manutenção preventiva, bem como a priorização das atividades de manutenção e recuperação de obras (VERDERESI, et al., 2015).

> Em relação às situações limite que definem o fim da Vida Útil Estrutural, no projeto das estruturas de concreto armado considera-se habitualmente este limite como correspondendo ao início da oxidação nas armaduras de flexão/tração dos elementos estruturais principais. É um critério conservador, mas que garante o conceito de nível de segurança do projeto estrutural (HELENE, 1993; BRANCO, 2000 apud BRANCO, PAULO e GARRIDO, 2015).

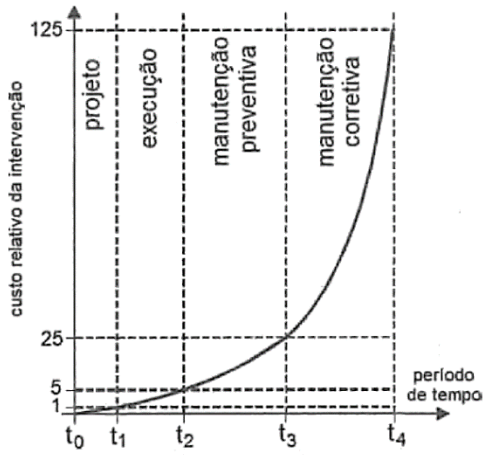
2.4.Manutenção

O objetivo de realizar manutenções em OAEs é garantir a integridade da estrutura e preservá-la de possíveis deteriorações, tendo como foco os elementos das pontes ou estruturas relacionados diretamente a vida útil, realizando pequenos reparos e mantendo assim em boas condições sem que ocorra grandes gastos com reabilitação ou substituição. Uma adequada manutenção é capaz de reduzir os danos causados pela corrosão e aparições de aberturas no concreto, diretamente associada a umidade e condições ambientais. Após a realização das inspeções cadastrais ou rotineiras, faz-se necessário realizar manutenções, podendo ser classificadas entre programada e corretiva (MT/DNIT/IPR, 2016).

> Manutenção programada ou rotineira: é definida como um conjunto de atividades básicas que visam preservar componentes da ponte em sua condição atual, impedindo o desenvolvimento de uma deficiência estrutural.
>
> [...]
>
> Manutenção corretiva: são atividades específicas de consertos menores, identificados nos processos de inspeção, quais sejam de pintura, substituição de pista de rolamento, recomposição e selagem das juntas, remoção dos detritos, colocação ou substituição de drenos ou de elementos básicos de drenagem, danos de choques de veículos que não apresentam risco estrutural, entre outros. (MT/DNIT/IPR, 2016, p. 18)

Segundo Helene (1992), é correto afirmar que as correções serão mais duráveis, efetivas, de fácil execução e mais viável economicamente quanto mais cedo forem executadas, como é possível observar na "lei de Sitter" ou "lei dos cinco", onde o custo é demonstrado em um crescimento geométrico de acordo com as etapas de projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva, como é possível observar na Figura 2.

Figura 2 – Demonstrativo da evolução dos custos, Lei de Sitter.



Fonte: Sitter (1984, apud Helene, 1992, p. 24).

Onde podemos observar que:

- Projeto: são as medidas tomadas com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura. Implicam em um custo que pode ser associado ao número 1 (um);
- Execução: medidas tomadas durante a execução. Implicam em um custo 5 (cinco) vezes superior ao que teria sido acarretado à etapa de projeto, para obter-se o mesmo grau de proteção e durabilidade da estrutura;
- Manutenção preventiva: quando tomada após a execução, porém antes do surgimento de manifestações patológicas. Está associada a um custo 25 (vinte e

cinco) vezes maior do que uma decisão de projeto, contudo será 5 (cinco) vezes menor do que o valor empregado a uma manutenção corretiva;

- Manutenção corretiva: por se tratar de trabalhos de diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas com manifestações patológicas, esta atividade é associada a um custo 125 (cento e vinte e cinco) vezes superior ao nível de projeto.

Logo, "adiar uma intervenção significa aumentar os custos diretos em uma progressão geométrica de razão 5 (cinco) [...]" (SITTER, 1984 apud HELENE, 1992, p. 25).

2.4.1. Manutenção da superestrutura

Segundo o Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais (MT/DNIT/IPR, 2016) a manutenção da superestrutura é subdivida em quatro sistemas, sendo eles: o tabuleiro, que suporta o tráfego e protege os elementos inferiores a ele contra intempéries, que acarretam desgastes mecânicos e deterioração devido à agressividade ambiental; o sistema de drenagem do tabuleiro, responsável pela condição hidráulica de evacuação e condução da água no sistema, evitando possíveis infiltrações e lixiviação em elementos de concreto; os elementos de proteção e faixas especiais, constituídos por barreiras de concreto, defesas metálicas e guarda-corpos, garantindo a segurança da OAE tanto para os veículos quanto para os pedestres; e por fim, os sistemas de sinalização vertical e horizontal da OAE, colaborando também com a segurança em atendimento às normas de trânsito.

Ainda no Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais, são definidas as características da manutenção para cada sistema, como podemos ver nas tabelas a seguir.

Tabela 1 – Definição do objetivo e frequência da manutenção dos sistemas relacionados aos tabuleiros da superestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza das superfícies exposta e/ou da superfície de rolamento	Manutenção programada	Garantir a limpeza e conservação da superfície de rolamento	2 anos
Limpeza e restauração de concreto atacado pela corrosão	Manutenção corretiva	Restaurar a integridade estrutural dos elementos de concreto e retirar o material contaminado	Sob demanda
Remendos de concreto	Manutenção preventiva	Restaurar a integridade estrutural do elemento de concreto	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial
Selagem de trincas e fissuras de concreto	Manutenção preventiva	Selar as fissuras de tabuleiros de concreto, evitando a entrada de água através delas	2 anos

(Continua)

(Término)

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Inclusão de superfície de desgaste (ou rolamento)	Manutenção corretiva	Garantir a proteção do tabuleiro em concreto e proporcionar uma superfície de trafegabilidade segura	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial
Substituição da superfície de rolamento ou de desgaste	Manutenção corretiva	Garantir uma superfície de rolamento adequada às condições do tráfego e a impermeabilização dos elementos inferiores	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial
Selagem de fissuras na superfície de rolamento	Manutenção programada	Garantir que a superfície de rolamento traga proteção ao tabuleiro e à estrutura	1 ano
Cobertura de selagem em todo o tabuleiro	Manutenção preventiva	Melhorar a impermeabilização e a integridade do tabuleiro da estrutura	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial
Pintura de elementos metálicos	Manutenção preventiva	Prevenir a corrosão e a perda de área dos elementos	2 anos

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 2 – Definição do objetivo e frequência da manutenção dos sistemas relacionados aos sistemas de drenagem dos tabuleiros da superestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza do sistema de drenagem	Manutenção preventiva	Garantir o fornecimento do sistema de drenagem da ponte	1 ano
Construção de elementos do sistema de drenagem	Manutenção corretiva	Garantir a existência de um sistema de evacuação de água	Sob demanda

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 3 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado às juntas de dilatação da superestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza de juntas do tabuleiro	Manutenção preventiva	Garantir a funcionalidade e impermeabilidade	1 ano
Reparação e/ou substituição de juntas	Manutenção corretiva	Garantir a operação do sistema e segurança do tráfego	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 4 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado aos elementos de proteção e faixas especiais da superestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza e manutenção de elementos de proteção	Manutenção programada	Garantir a limpeza dos elementos de proteção	2 anos

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 5 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionado aos elementos dos sistemas de sinalização da superestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza de sinalização	Manutenção preventiva	Garantir a funcionalidade das sinalizações	Todos os anos
Recolocação de sinalização	Manutenção corretiva	Garantir o fluxo do tráfego	Sob demanda

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

2.4.2. Manutenção da meso e infraestrutura

Com relação à mesoestrutura, o Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais (MT/DNIT/IPR, 2016) define que sua manutenção é baseada em manter os elementos limpos, restaurados e recuperados, garantindo a sua funcionalidade. Os elementos da mesoestrutura são responsáveis por receber as cargas da superestrutura e sua manutenção deve ser realizada com frequência, principalmente em apoios sob juntas de dilatação, já que possuem maior chance de apresentar corrosão, eflorescências e deterioração mecânica ou química. Também é função da mesoestrutura transmitir as cargas recebidas da super para a infraestrutura, que por sua vez transfere-as para o solo.

Os principais problemas que ocorrem na infraestrutura são a deterioração dos elementos que se encontram dentro da água, fissuração devido a recalques, danos mecânicos por conta do tráfego e danos de sobretensões. O processo de reparação destes elementos requer um alto investimento, devido a necessidade dos suportes e os possíveis serviços submersos (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 6 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionados às vigas da mesoestrutura.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza das superfícies expostas das vigas	Manutenção programada	Garantir a limpeza e funcionalidade dos elementos de suporte da superestrutura	2 anos
Limpeza e restauração de concreto atacado pela corrosão	Manutenção corretiva	Restaurar a integridade estrutural dos elementos de concreto e retirar o material contaminado	Sob demanda
Selagem de trincas e fissuras de concreto	Manutenção preventiva	Selar as fissuras de tabuleiros de concreto, evitando a entrada de água através delas	2 anos
Cobertura de selagem em vigas de concreto	Manutenção preventiva	Garantir a integridade estrutural, evitando que o aço seja atingido por cloretos	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial
Pinturas e proteção de vigas metálicas	Manutenção preventiva	Prevenir a corrosão e a perda de área dos elementos	2 anos

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Tabela 7 – Definição do objetivo e frequência da manutenção do sistema relacionados aos pilares e fundações.

Serviço	Tipo	Objetivo	Frequência
Limpeza das superfícies expostas dos pilares e as fundações	Manutenção programada	Garantir a limpeza de elementos de concreto da infraestrutura	2 anos
Limpeza e restauração de concreto atacado pela corrosão	Manutenção corretiva	Restaurar a integridade estrutural dos elementos de concreto e retirar o material contaminado	Sob demanda
Selagem de trincas e fissuras de concreto	Manutenção preventiva	Selar as fissuras de tabuleiros de concreto, evitando a entrada de água através delas	2 anos
Cobertura de selagem em vigas de concreto	Manutenção preventiva	Melhorar a impermeabilização e a integridade do tabuleiro da estrutura	Conforme resultado da inspeção rotineira ou especial

Fonte: Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs (MT/DNIT/IPR, 2016).

Também fazem parte da mesoestrutura os aparelhos de apoio, responsáveis por transmitir as cargas da super à mesoestrutura, permitir os movimentos longitudinais e rotações da superestrutura motivadas pela retração própria dos materiais e deflexões provocadas pelas cargas permanentes e móveis. A recuperação dos aparelhos de apoio requer conhecimento de seu funcionamento e das solicitações e comportamento da estrutura. Sua substituição, requerida periodicamente, é uma operação que requer projeto desenvolvido por Engenheiro Especialista (MT/DNIT/IPR, 2016).

3. Metodologia

O presente trabalho baseia-se principalmente em estudar as inspeções especiais que vêm sendo realizadas nos últimos anos na cidade de São Paulo e sua relação com a previsão de vida útil e manutenção das obras de arte existentes na cidade. Para cumprir tal objetivo, foi definido como escopo as OAEs sobre a Marginal Tietê, sendo buscado o material referente às inspeções destas obras junto à consulta pública da prefeitura da cidade.

Uma vez de posse do material referente às inspeções, foram analisados os dados coletados pelas empresas contratadas pela PMSP e as conclusões dadas pelos patólogos para verificar a possibilidade de determinação da vida útil restante das obras inspecionadas, e se há alguma referência a este conceito nos relatórios técnicos elaborados.

3.1.Obras estudadas

Para obtenção do material de estudo foi utilizado o SEI (Sistema Eletrônico de Informações), onde são concentradas as informações e documentos da Prefeitura de São Paulo, sejam eles públicos ou restritos. Foram buscadas no modo de "Pesquisa Pública" as obras conhecidas sobre a Marginal Tietê, estas extraídas de lista oficial obtida no site da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego), apresentada a seguir (Figura 3):

Figura 3 – Lista de pontes existentes na Marginal Tietê.

Relação das Pontes – Marginal Tietê

NOME OFICIAL DA PONTE/ NOME POPULAR		MARCO KM
Ponte Imigrante Nordestino		23
Ponte Milton Tavares de Souza		22
Ponte Aricanduva		21
Ponte Tatuapé		18 C
Ponte Pres. Dutra		18 A e B
Ponte Pres. Jânio Quadros (Vila Maria)		17
Ponte da Vila Guilherme		15
Ponte Cruzeiro do Sul		14
Ponte das Bandeiras		13
Ponte da Casa Verde		10
Ponte do Limão		9
Ponte Júlio de Mesquita Neto		8
Ponte Freguesia do Ó		7
Ponte do Piqueri		5
Ponte Ulysses Guimarães (Rodovia Bandeirantes)		4
Ponte Atílio Fontana (Anhanguera)		3
Ponte dos Remédios		1

Fonte: CET (2007).

As obras foram buscadas através de trechos de seus nomes no campo "Pesquisa Livre", pesquisando em Processos, Documentos Gerados e Documentos Externos e na unidade geradora "SP-OBRAS/DPR-NOA - Núcleo de Apoio às Inspeções e Manutenção de Obras de

Arte Especiais". Através desta busca foram encontrados os processos 040660000 e 026322581, nos quais foi possível encontrar informações sobre as inspeções já realizadas nos últimos anos e as que estão em curso atualmente, além de haver indicação do número do processo dos relatórios das inspeções existentes. A Tabela 8 apresenta as informações obtidas sobre as obras existentes na lista da Figura 3.

Tabela 8 – Situação das inspeções especiais nas pontes da Marginal Tietê.

Obra	Última inspeção	Tipo	Chamamento público
Ponte dos Remédios	Em curso	Especial	007/19/SIURB
Ponte Atílio Fontana (Ponte Anhanguera)	Em curso	Especial	005/19/SIURB
Ponte Ulysses Guimarães (Viaduto dos Bandeirantes)	Em curso	Especial	005/19/SIURB
Ponte do Piqueri	Em curso	Especial	005/19/SIURB
Ponte Freguesia do Ó	Maio/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Júlio de Mesquita Neto	Em curso	Especial	007/19/SIURB
Ponte do Limão	Em curso	Especial	004/19/SIURB
Ponte da Casa Verde	Março/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte das Bandeiras	Fevereiro/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Cruzeiro do Sul	Fevereiro/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte da Vila Guilherme	Em curso	Especial	002/20/SIURB
Ponte Presidente Jânio Quadros (Ponte da Vila Maria)	Maio/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Presidente Dutra (Pista Expressa – 18A)	Fevereiro/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Presidente Dutra (Pista Local – 18B)	Fevereiro/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Tatuapé	Março/2019	Emergencial	002/18/SIURB
Ponte Aricanduva	Em curso	Especial	004/19/SIURB
Ponte Domingos Franciulli Netto (Ponte Gen. Milton Tavares de Souza)	Em curso	Especial	004/19/SIURB
Ponte Imigrante Nordestino	Não localizada	-	-

Fonte: SEI – PMSP (2021).

As obras com inspeções em curso não foram estudadas neste trabalho pois não foi possível ter acesso a documentos relacionados a elas. A Ponte Imigrante Nordestino, especificamente, possui jurisdição do município de Guarulhos, não havendo, portanto, sua documentação no SEI. O material referente à Ponte Cruzeiro do Sul não apresentou os valores quantitativos de resultados dos ensaios necessários a este trabalho, sendo assim descartada esta OAE. Algo similar ocorreu à Ponte Presidente Dutra (Pista Expressa – 18A), uma vez que sua documentação foi localizada, porém um dos arquivos que apresenta o resultado dos ensaios

encontrava-se corrompido, tendo que se descartar esta OAE.

Por fim, o objeto de estudo deste trabalho resume-se às seguintes obras:

- Ponte Freguesia do Ó;
- Ponte da Casa Verde;
- Ponte das Bandeiras;
- Ponte Presidente Jânio Quadros;
- Ponte Presidente Dutra (Pista Local – 18B);
- Ponte Tatuapé.

A maior parte destas obras foi construída na década de 1950, antes mesmo da construção da Marginal Tietê, que se deu entre as décadas de 1950 e 1970 (Estadão, 2013).

Figura 4 – Notícia de 1956 sobre a entrega de parte das obras de construção da Marginal Tietê.

AV. MARGINAL DO RIO TIETÊ

Foi entregue ao trafego, anteontem, trecho da avenida Marginal Direita do Rio Tietê, compreendido entre a ponte das Bandeiras e a ponte do Limão, numa extensão aproximada de 2 quilometros e meio.

Segundo os dados fornecidos pelo Distrito de Obras 3, a area pavimentada é de cerca de 26 mil metros quadrados e o tipo usado para a pavimentação foi concreto asfaltico de 40 milimetros sobre base de macadame hidraulico de 20 centimetros de espessura. A obra foi executada em cerca de seis meses sendo entregue ao trafego, com um mês de antecedencia prevista no contrato. Foi concluida, também, uma via de acesso para a avenida, a rua João Rudge, proximo da ponte da Casa Verde.

Fonte: Estadão (2013).

Figura 5 – Registro da Marginal Tietê em 1974, com a Ponte Comunidade Húngara à frente e Ponte do Piqueri ao fundo.

Fonte: São Paulo in Foco (2016).

As tipologias das OAEs escolhidas para este trabalho são variadas, e devido a sua idade, muitas já sofreram alterações como alargamentos, reforços e prolongamentos, principalmente entre 2009 e 2010, quando foi construída a Nova Marginal Tietê, com ampliação das faixas centrais. As características individuais das pontes estudadas foram coletadas através dos relatórios de inspeção obtidos no SEI e estão descritas nos itens a seguir.

3.1.1. Ponte Freguesia do Ó

Inaugurada em 1956, a Ponte Freguesia do Ó foi inicialmente construída para o trem-tipo TT-24. Ao longo do tempo foram executadas obras de prolongamento, resultando na situação atual da OAE, que hoje possui 240 metros de extensão e 25 metros de largura, com 8 tabuleiros e 11 vãos, alguns projetados para suportar o TT-45. A ponte possui arranjo estrutural isostático em alguns trechos e hiperestático em outros, variando de acordo com a tipologia estrutural. Esta se dá em grelha e pórtico em 6 dos tabuleiros, e em arco no tabuleiro central, que se localiza sobre o Rio Tietê. Estes são os trechos originais da ponte, sendo constituídos de concreto armado. O último trecho da ponte é mais recente, tendo sido executado com a Nova Marginal Tietê (2010), e é composto por vigas pré-moldadas tipo laje alveolar em concreto protendido. Os apoios da OAE são compostos de pilares para os trechos em grelha e conjunto viga travessa e pilares no trecho em laje alveolar; o trecho central é sustentado pelo arco triarticulado associado a pilares parede. Há ainda junta de dilatação longitudinal ao longo de toda a obra e sobre a ponte os dispositivos de segurança são barreiras rígidas e guarda-corpos.

Figura 6 – Vista lateral do trecho central da Ponte Freguesia do Ó, em arco triarticulado.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 7 – Vista inferior de um dos trechos em grelha da Ponte Freguesia do Ó.

Fonte: SIURB (2020).

3.1.2. Ponte da Casa Verde

Com largura variável entre 28,30 e 44,12 metros, a Ponte da Casa Verde distribui seus 230 metros de extensão em 8 tabuleiros e 12 vãos, sendo o arranjo estrutural isostático em

alguns pontos e hiperestático em outros. O trecho original da ponte, inaugurado em 1954 e projetado para o TT-36, possui tabuleiros constituídos de concreto armado, sendo 6 com tipologias em grelha e pórtico e 1, o tabuleiro central, em seção celular arqueada. O trecho mais novo foi executado em conjunto com as obras de ampliação da Marginal Tietê, por volta de 2010, e possui seção transversal em grelha com vigas longarinas protendidas projetadas para o TT-45. A mesoestrutura é composta por pilares contraventados por vigas travessas.

Não foi possível identificar a geometria dos apoios do tabuleiro em arco devido às paredes de fechamento existentes no local. Nesta obra foram identificados ainda reforços em alguns pontos, dentes Gerber na superestrutura e, sobre a ponte, dispositivos de segurança como barreiras rígidas e guarda-corpos.

Figura 8 – Vista lateral do trecho central da Ponte da Casa Verde, em seção celular arqueada.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 9 – Vista lateral de um dos trechos em grelha da Ponte da Casa Verde, com destaque para o Dente Gerber existente.

Fonte: SIURB (2019).

3.1.3. Ponte das Bandeiras

Esta ponte histórica da cidade de São Paulo foi criada para substituir a antiga Ponte Grande, possuindo estruturas internas e altas torres de concreto, de modo que a população pudesse assistir às competições esportivas que ocorriam no Rio Tietê à época de sua construção, finalizada inicialmente em 1942.

Seu arranjo estrutural é isostático em todos os tabuleiros e foi modificado ao longo dos anos, tendo sido concebida com apenas três tabuleiros em concreto armado, com tipologia em arco triarticulado e grelha, no trem-tipo TT-24. No ano de 1965 foi construído mais um vão, este em seção celular protendida em TT-36. Já no ano de 2010, em decorrência da construção da Nova Marginal, a ponte foi expandida para mais dois vãos em seção celular de concreto armado, projetados para o TT-45.

Além dos vãos citados, há também um trecho intermediário no qual a travessia da ponte é feita diretamente sobre solo aterrado. No total, a extensão desta obra de 6 vãos e 6 tabuleiros

é de 215 metros, com largura variável entre 33 e 40 metros. A mesoestrutura desta OAE é formada principalmente por pilares parede e vigas travessas e seus dispositivos de segurança são barreiras rígidas.

Figura 10 – Vista inferior de um dos trechos em grelha da Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 11 – Vista de uma das torres da Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

3.1.4. Ponte Presidente Jânio Quadros

A tradicional Ponte da Vila Maria, que possui nome oficial de Presidente Jânio Quadros e foi construída em 1956, distribui seus 280 metros de comprimento em 12 tabuleiros, sendo 11 isostáticos e 1 hiperestático, totalizando 14 vãos com largura de 25,50m. Destes, 10 possuem seção transversal em grelha, 2 em pórtico, 1 em arco triarticulado celular e 1 em laje alveolar, sendo este último o único vão em concreto protendido, tendo sido construído em 2010. Os demais vãos são constituídos de concreto armado.

Pela variação entre as datas de construção, parte dos vãos atende ao trem-tipo TT-45, enquanto os trechos originais possuem geometria projetada para o TT-24. Assim como na Ponte das Bandeiras, na presente obra há também um trecho intermediário apenas em solo aterrado, não havendo tabuleiro.

A mesoestrutura da OAE é composta de pilares de concreto armado, em alguns trechos contraventados por vigas travessas. A obra contempla duas pistas e ciclovia, com seus dispositivos de segurança sendo barreiras rígidas e guarda-corpos metálicos. Há também reforços nas vigas longarinas de um dos vãos, executado na década de 90, possivelmente para reparar danos causados por choque de veículos pelo baixo gabarito.

Figura 12 – Vista lateral da Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 13 – Vista lateral de um dos trechos em grelha da Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

3.1.5. Ponte Presidente Dutra

Esta ponte, construída por volta de 2010 em atendimento ao TT-45, possui traçado curvilíneo e tipologia em seção celular, com 3 tabuleiros hiperestáticos e 2 isostáticos, estes localizados na região dos encontros. Seus 9 vãos cruzam a Marginal Tietê através de 366 metros de extensão com 12,20 metros de largura, sendo sustentados por pilares e vigas travessas e tendo como dispositivos de segurança barreiras rígidas.

Figura 14 – Vista lateral do trecho central da Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 15 – Vista inferior do trecho central da Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2019).

3.1.6. Ponte Tatuapé

Inaugurada em 1975, a Ponte Tatuapé abrange o trecho sobre o Rio Tietê e suas marginais, bem como os 4 acessos de chegada ou saída da ponte na região dos encontros principais. No total, são 24 vãos em seção celular de concreto protendido, distribuídos em 9 tabuleiros hiperestáticos que compreendem 484 metros de comprimento no trecho principal e 375 metros nos acessos, todos projetados para o trem-tipo TT-36. A mesoestrutura da OAE é composta por pilares de concreto armado em seção variável.

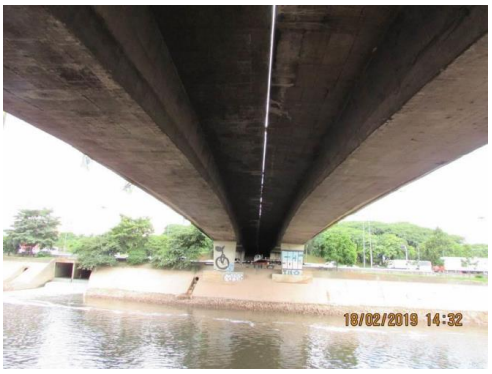
Sobre a obra, cuja largura varia entre 11 e 36,50 metros, são divididas duas pistas em

sentidos opostos, possuindo como dispositivos de segurança barreiras rígidas e guarda-corpos. No ano de 1996, estrutura recebeu obras de reforço devido a um incêndio de grandes proporções, sendo reparados alguns dos pilares e trechos da superestrutura que foram também atingidos.

Figura 16 – Vista lateral da Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 17 – Vista inferior da Ponte Tatuapé.



Fonte: SIURB (2019).

3.2.Inspeções visuais

A inspeção visual é realizada em conformidade com a norma ABNT NBR 9452:2019 – Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de concreto.

O método a ser empregado é a condensação de anomalias por trechos estruturais, assim como a compatibilização dos termos utilizados para identificar as manifestações patológicas.

3.3.Métodos de ensaio

Os ensaios realizados são uma forma de diagnóstico das anomalias que são identificadas durante a inspeção visual, além de possibilitar uma análise de como o ambiente agressivo responde quanto a estrutura. Através dos ensaios feitos no local e em laboratório pode-se realizar um maior e melhor estudo quanto a durabilidade e estado da estrutura.

Os ensaios podem ser não destrutivos, ou seja, não degradam a estrutura, ou semidestrutivos, o que indica que há uma coleta de material do elemento sem que se tenha perda de funcionalidade dele.

A Figura 18 relaciona quais métodos de ensaio foram realizados em cada uma das obras estudadas.

Figura 18– Ensaios realizados nas obras estudadas.

OAE / Ensaio	Ponte Freguesia do Ó	Ponte da Casa Verde	Ponte das Bandeiras	Ponte Presidente Jânio Quadros	Ponte Presidente Dutra	Ponte Tatuapé
Esclerometria	X	X	X			
Ultrassom		X	X	X		X
RAA	X	X	X	X	X	X
Cloreto	X	X	X		X	X
Sulfato	X	X	X	X	X	X
Compressão axial	X	X	X	X	X	X
Carbonatação	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)	X
(1) Espessura de cobrimento obtida através do ensaio de pacometria.						

Fonte: Autoras (2021).

A realização de ensaios visa acompanhar o estado do concreto e aço no decorrer de sua vida útil, possibilitando prever possíveis degradações em função do tempo e do local onde a obra se encontra, bem como a qualidade do concreto em virtude de suas solicitações. Desta forma será apresentada comparação entre ensaios onde seja possível uma maior compreensão na variação existente e ao que isso corresponde quanto à vida útil.

Ressalta-se que no caso de divergência entre os valores e informações obtidos no boletim emitido pelo laboratório e no corpo do relatório de ensaios, será utilizado os dados emitidos pelo laboratório.

Para análise comparativa entre ensaios foram utilizados os pontos ensaiados no mesmo elemento e, num mesmo gráfico, entre elementos de mesma idade; de forma a ser possível observar as possíveis tendências de forma mais clara e com menor grau de interferência de outros fatores.

3.3.1. Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

Os ensaios foram realizados seguindo determinação normativa da NBR 7584:2012 “Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio”. O equipamento utilizado para a realização é o esclerômetro de reflexão Schmidt.

Figura 19– Esclerômetro de reflexão.

Fonte: Medina (2013).

Figura 20 – Ensaio de esclerometria realizado na Ponte das Bandeiras em uma das vigas longarinas.

Fonte: SIURB (2019).

3.3.2. Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

As instruções de realização do ensaio são dadas pela NBR 8802:2019 "Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica". Para avaliação dos valores obtidos, foram utilizados os parâmetros dados por Whitehurst (1966), apresentados na Tabela 9. Nas obras onde foi realizado mais de um ponto por elemento, foi utilizada a média dos resultados para a avaliação.

Tabela 9– Relação entre a velocidade média da onda e a qualidade do concreto.

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

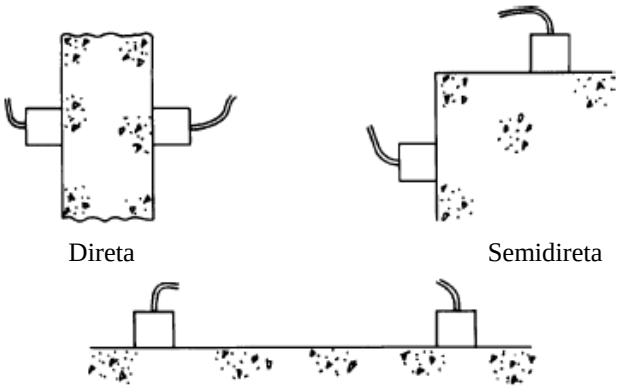
Fonte: Whitehurst (1966, apud Ramírez, 2015).

Nas obras avaliadas utilizou-se equipamento da marca Proceq (Figura 21). A Figura 22 demonstra os meios de transmissão existentes, sendo estes: direto, semidireto e indireto. A Figura 23 e Figura 24 ilustram o ensaio de ultrassom realizado na Ponte Presidente Jânio Quadros.

Figura 21–Equipamento para realização de ensaio de ultrassom no concreto.

Fonte: PCTE (2020).

Figura 22–Métodos de transmissão de ondas durante o ensaio de ultrassom.



Fonte: Medina (2013).

Figura 23– Ultrassom realizado pelo método direto em uma das vigas longarinas da Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 24 – Ultrassom realizado pelo método indireto em uma das vigas longarinas da Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

3.3.1. Determinação da resistência do concreto à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados sobre orientação da NBR 7680-1:2015 “Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de

concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial".

Para a extração do corpo de prova cilíndrico utiliza-se perfuratriz com coroa diamantada, conforme demonstra a Figura 25.

Figura 25– Extração de CP em um dos pilares da Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 26 – Ensaio de resistência à compressão.

Fonte: SIURB (2019).

3.3.2. Determinação da profundidade de carbonatação, cobrimento e pacometria

Em virtude de não haver prescrição normativa brasileira para o ensaio de determinação de profundidade de carbonatação, foi utilizado o método de ensaio referência RILEM CPC-18 "Measurement of hardened concrete carbonation depth" e a norma britânica BS EN 14630:2006 "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method".

Para algumas obras a profundidade de cobrimento foi obtida através da pacometria, para isso utilizou-se o método de ensaio descrito em ACI 228.2R-13 "Report on nondestructive of concrete in structures".

Figura 27– Ponto de ensaio de carbonatação em um dos pilares da Ponte Freguesia do Ó, com armaduras passivadas.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 28 – Ponto de ensaio de carbonatação em uma das vigas longarinas da Ponte Freguesia do Ó, com armaduras despassivadas.

Fonte: SIURB (2020).

3.3.1. Reatividade álcali-agregado

O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da NBR 15577-1:2018 “Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto” e NBR 15577-3:2018 “Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto”.

3.3.2. Teor de íons cloreto

Ensaio realizado por meio das prescrições normativas da ASTM C 1152 “Standart Test Method for Water-Souble Chloride in Mortar and Concrete”, utilizado em laboratório.

O nível que define a concentração máxima que leva ao processo de despassivação da armadura depende das características ambientais do local da estrutura, assim como do consumo de cimento do concreto. Dessa forma, são utilizados como base os valores de teores de cloreto limites presentes na norma NBR 12655:2015 “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento”, de acordo com as particularidades de cada estrutura.

Figura 29– Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto (Tabela 5 da NBR 12655:2015).

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

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015).

Segundo a norma de referência citada, os valores limite de íons cloreto são dados através da massa de cimento, sendo necessário relacionar o consumo de cimento para determinar o valor limite sobre o concreto. Para as obras estudadas, estimou-se um consumo de cimento de 280kg/m^3, visto que as normas aplicáveis às datas de projeto são a NB-1/40, NB-1/60 e NBR 6118:2007, que estabelecem valores que variam de 280 a 300kg/m^3 para os casos em questão.

Estabelecendo um peso específico de 2400kg/m^3 para o concreto e teor limite de cloretos de 0,3% sobre a massa de cimento (classe de agressividade II), a relação entre os valores limite do cimento e do concreto é determinada conforme Equação 1.

$$\%_{Con} = \frac{\%_{Cim} . C_{Cim}}{\gamma_{Con}} \quad (1)$$

Onde:

$\%_{Con}$ = Teor limite de íons cloreto sobre a massa de concreto (%)

$\%_{Cim}$ = Teor limite de íons cloreto sobre a massa de cimento (%)

C_{Cim} = Consumo de cimento no concreto (kg/m³)

γ_{Con} = Massa específica do concreto (kg/m³)

Desta forma, o teor limite utilizado para avaliar a contaminação por cloretos nas obras estudadas é de 0,0035% sobre a massa de concreto.

3.3.3. Teor de íons sulfato

Não há norma regulamentadora brasileira para teor máximo de sulfato em massa de concreto, porém usualmente utiliza-se a tabela 3 da norma NBR 16697:2018 "Cimento Portland – Requisitos", que especifica a porcentagem do trióxido de enxofre (SO_3) em 4,5% da massa de cimento. Encontra-se no relatório de ensaios de algumas obras o uso de norma própria empregada pelo laboratório responsável pela análise.

Figura 30– Requisitos químicos do cimento Portland (Tabela 3 da NBR 16697:2018).

Sigla [a]	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO_3)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	–	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP IV	–	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP V [b]	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

[a] Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

[b] No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

,

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

Assim como para os teores de cloreto, os limites estabelecidos pela NBR 16697:2018 são dados sobre a massa de cimento. Além disso, a taxa é dada para o trióxido de enxofre (SO_3), sendo necessário relacionar este elemento ao sulfato através de sua massa molar. Para os elementos citados, as massas são de 80,06g/mol e 96,06 g/mol, respectivamente.

A Equação 2 demonstra a transformação do teor de SO_3 em função da massa de cimento,

dado pela NBR 16697, em teor de sulfatos em função da massa de concreto, que resulta em 0,63% para as obras estudadas.

$$\%_{SO_4 Con} = \frac{\%_{SO_3 Cim}.M(SO_4).C_{Cim}}{M(SO_3).\gamma_{Con}} \quad (2)$$

Onde:

$\%_{SO_4 Con}$ = Teor limite de SO_4 sobre a massa de concreto (%)

$\%_{SO_3 Cim}$ = Teor limite de SO_3 sobre a massa de cimento (%)

$M(SO_4)$ = Massa molar do SO_4 (g/mol)

$M(SO_3)$ = Massa molar do SO_3 (g/mol)

C_{cim} = Consumo de cimento no concreto (kg/m³)

γ_{con} = Massa específica do concreto (kg/m³)

3.4.Previsão da vida útil

Em questão de durabilidade, os agentes agressivos presentes no ambiente, como os íons cloreto e o dióxido de carbono são os principais fatores de deterioração, uma vez que destituem a camada passivadora do concreto por meio da diminuição do pH, permitindo assim que se abra caminho para a corrosão das armaduras, o que efetivamente causará perda estrutural, colocando em risco a utilização da estrutura e seus usuários.

Visto que os fatores de deterioração que definem a vida útil são múltiplos, escolheu-se para o presente trabalho o foco na carbonatação, uma vez que as obras estudadas se localizam em ambiente altamente urbanizado, no qual o teor de dióxido de carbono se torna o principal meio agressivo.

Foram considerados na avaliação da vida útil todos os pontos da super e mesoestrutura para os quais havia dados do ensaio de carbonatação, com exceção dos pontos enquadrados nos seguintes critérios de descarte:

- Profundidade de carbonatação máxima maior ou igual à espessura de cobrimento (armaduras já despassivadas);
- Cobrimento formado apenas por revestimento de reparo, não sendo possível identificar sua data de execução;
- Profundidade de carbonatação atingindo apenas o revestimento, não sendo possível estimar a difusividade do CO_2 no concreto;
- Elementos que passaram por reformas ou reforços, impedindo a determinação

da idade real do cobrimento e difusividade do CO_2 no concreto;

- Profundidade de carbonatação igual a zero.

Nos pontos não eliminados pelos critérios de descarte foram aplicados os métodos de previsão de Tuutti (1982) e Possan (2010), de forma a ser possível comparar os resultados de cada método.

O método apresentado por Tuutti considera a concentração de CO_2 no ambiente, permeabilidade do concreto e sua possibilidade de absorção de CO_2, fatores que são agrupados pelo coeficiente "k". A Equação 3 demonstra a aplicação do método de Tuutti.

$$e_c = k.\sqrt{t} \tag{3}$$

Onde:

$e_c =$ Profundidade de carbonatação (mm)

$k =$ Coeficiente de difusividade efetiva do CO_2 no concreto

$t =$ Tempo (anos)

Para as obras avaliadas, o coeficiente "k_e" foi determinado através da espessura de carbonatação obtida nos ensaios analisados e pela idade de cada elemento avaliado, segundo Equação 4.

$$k_e = \frac{e_{cef}}{\sqrt{t}} \tag{4}$$

Onde:

$e_{cef} =$ Profundidade de carbonatação efetiva (mm)

$k_e =$ Coeficiente de difusividade estimada do CO_2 no concreto

$t =$ Idade do elemento avaliado (anos)

Após a determinação do coeficiente k_e, utilizou-se a Equação 5 para determinação da vida útil estimada, considerando a espessura de cobrimento restante a ser carbonatada.

$$VUE = \left(\frac{e_{cob} - e_{cef}}{k_e}\right)^2 \tag{5}$$

Onde:

$e_{cob} =$ Espessura de cobrimento (mm)

$e_{cef} =$ Profundidade de carbonatação efetiva (mm)

$k_e =$ Coeficiente de difusividade estimada do CO_2 no concreto

$VUE =$ Vida útil estimada (anos)

O modelo de Possan (2010) para determinação da vida útil, demonstrado na Equação 6, é mais complexo e considera fatores como a umidade relativa do ar, resistência à compressão e teor de pozolana presente tanto no cimento utilizado como em possíveis adições no traço do concreto.

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} . \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} . exp\left[\left(\frac{k_{ad}.ad^{\frac{3}{2}}}{40+f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2}.CO_2{}^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR}.(UR-0{,}58)^2}{100+f_c}\right)\right] k_{ce} \quad (6)$$

Onde:

$y =$ Profundidade de carbonatação (mm)

$k_c =$ Fator referente ao tipo de cimento

$f_c =$ Resistência do concreto à compressão axial (MPa)

$k_{fc} =$ Fator referente à resistência à compressão axial e tipo de cimento

$t =$ Idade da estrutura (anos)

$k_{ad} =$ Fator referente ao teor de adição pozolânica do concreto e tipo de cimento

$ad =$ Teor de adição pozolânica do concreto em relação à massa de cimento (%)

$k_{CO_2} =$ Fator referente ao teor de CO_2 presente no ambiente e tipo de cimento

$CO_2 =$ Teor de CO_2 presente no ambiente (%)

$k_{UR} =$ Fator referente à umidade relativa do ar no ambiente e tipo de cimento

$UR =$ Umidade relativa do ar no ambiente (*0,01%)

$k_{ce} =$ Fator referente às condições de exposição da estrutura à chuva

As tabelas para obtenção dos fatores k são dadas pela Figura 31. O fator k_{ce} é dado através da condição de exposição da estrutura à chuva; os demais fatores k podem ser obtidos pelo tipo de cimento utilizado.

Figura 31– Fatores k para determinação da vida útil pelo método de Possan.

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	kco_2	k_{UR}
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	k_{ce}
Ambiente interno Protegido da chuva	1,30
Ambiente externo Protegido da chuva	1,00
Ambiente externo Desprotegido da chuva	0,65

Fonte: Possan (2010).

Para as obras avaliadas, sendo estruturas já existentes das quais não é possível obter

todas as informações de forma detalhada, foram adotados valores e informações de acordo com as técnicas de execução usuais da época de construção de cada trecho. Com relação às adições pozolânicas, desprezou-se seu valor, uma vez que não foram encontradas informações sobre o traço do concreto utilizado.

O tipo de cimento foi determinado com base nos dados de produção de cimento no Brasil na época de construção de cada trecho das obras (Figura 32), estimando-se que as obras executadas até a década de 1980 utilizavam majoritariamente o cimento CP-I, enquanto os trechos recentes, inaugurados por volta de 2010, possuem grande probabilidade de terem sido executados com o cimento CP-V ARI, principalmente por se tratar de elementos pré-moldados ou locais onde as obras causam grande transtorno, se fazendo necessário liberar o local o mais rápido possível.

Figura 32– Produção de cimento no Brasil ao longo dos anos.

Tipo de cimento	Ano										
	1960	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
CPI	95,5	89,7	80,8	73,2	75,0	2,9	1,2	2,0	0,2	0,2	0,1
CPII	-	-	-	-	-	74,1	79,7	65,0	66,5	63,1	61,1
CPIII	3,8	7,6	11,4	10,1	12,3	10,9	6,5	17,5	14,4	15,2	15,4
CPIV	-	2,1	7,5	16,2	12,5	9,4	5,8	6,6	11,6	13,4	14,8
CPV	-	-	-	-	0,02	2,6	6,7	5,3	7,3	8,1	8,6
Branco	-	-	-	-	0,17	0,12	0,05	0,2	-	-	-

Fonte: Revista Concreto & Construções (2014, p.34).

Com relação à resistência à compressão axial do concreto (*fc*), foram utilizados tanto os dados obtidos nos ensaios anexados aos relatórios de inspeção, quanto os dados de projeto, também relatados nos documentos. Desta forma, havendo mais de um valor a ser utilizado para o cálculo, a seguinte ordem de importância foi seguida quando da escolha do valor adotado:

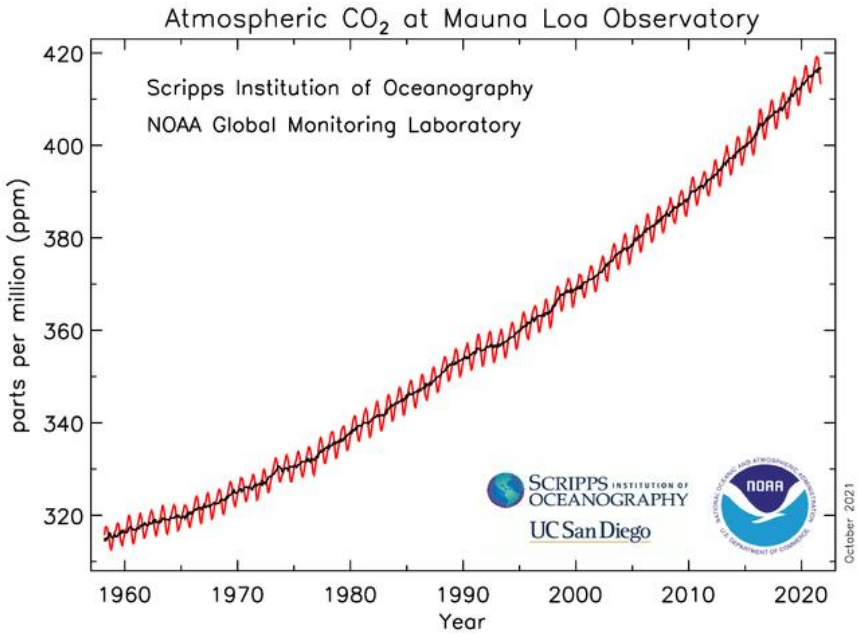
- Média de valores obtidos no ensaio de resistência à compressão para o tipo de elemento estudado;
- Ensaio realizado no mesmo elemento do ponto de carbonatação avaliado;
- Fck de projeto;
- Fck de elemento similar de mesma idade e tipologia.

A influência do ambiente na vida útil calculada pelo método de Possan faz necessária a utilização do teor de CO_2 na atmosfera. Não foram encontrados valores específicos para a cidade de São Paulo, porém Pauletti (2009) define teor de 0,063% para o centro de Porto Alegre, local também altamente urbanizado. Considerando que as taxas de CO_2 têm crescido a cada

ano, como demonstra a Figura 33, foi utilizado valor de 0,07% para a previsão da VUE.

A taxa de umidade relativa do ar foi baseada no relatório anual do Sistema de Informação de Qualidade do Ar da CETESB para o período de 2019, com dados coletados na região da Ponte dos Remédios, na Marginal Tietê; resultando em uma UR média de 69%. Já para o fator k_{ce}, que se relaciona à exposição do concreto à chuva, considerou-se um ambiente externo protegido da chuva, uma vez que a maior parte dos elementos principais não recebem precipitações diretamente.

Figura 33– Teor de CO_2 na atmosfera de 1960 a 2020 (ppm).



Fonte: Scripps Institute of Oceanography (2021).

Por fim, a variável *y* foi considerada como a espessura de concreto ainda sã, ou seja, igual à profundidade efetiva de carbonatação subtraída da espessura total de cobrimento. Nos resultados são apresentadas as porcentagens carbonatadas, dadas pela coluna Carb (%), que representa a profundidade de carbonatação sobre a espessura de cobrimento. Para os dois métodos foi considerada a idade da estrutura a partir do ano de 2019, quando foram realizadas as inspeções. A VUE deve também ser contada a partir desta data.

Aplicando-se as considerações apresentadas, a Equação 7 demonstra o cálculo realizado para determinação da VUE das obras estudadas através do método de Possan.

$$VUE = 20\left\{\frac{y_{cob} - y_{cef}}{k_c\left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} . exp\left[\left(\frac{k_{CO_2}.CO_2{}^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR}.(UR - 0{,}58)^2}{100 + f_c}\right)\right] k_{ce}}\right\}^2 \quad (7)$$

Onde:

$VUE =$ Vida útil estimada (anos)

$y_{cob} =$ Espessura de cobrimento (mm)

$y_{cef} =$ Profundidade de carbonatação (mm)

$k_c =$ Fator referente ao tipo de cimento

$f_c =$ Resistência do concreto à compressão axial (MPa)

$k_{fc} =$ Fator referente à resistência à compressão axial e tipo de cimento

$k_{CO_2} =$ Fator referente ao teor de CO_2 presente no ambiente e tipo de cimento

$CO_2 =$ Teor de CO_2 presente no ambiente (%)

$k_{UR} =$ Fator referente à umidade relativa do ar no ambiente e tipo de cimento

$UR =$ Umidade relativa do ar no ambiente (*0,01%)

$k_{ce} =$ Fator referente às condições de exposição da estrutura à chuva

4. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados apresentados através das inspeções e ensaios realizados nas obras inspecionadas.

4.1.Inspeção visual

Após análise dos relatórios, foram identificadas as principais manifestações patológicas encontradas nos elementos de superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, além de encontros, taludes e elementos de pista ou funcionais; que seguem.

4.1.1. Ponte Freguesia do Ó

De modo geral, a obra apresenta deficiências estruturais, de execução e de manutenção. Por se tratar de obra antiga, com mais de sessenta anos de existência, foi projetada para o TT-24, vigente na época. Em consequência, muitos dos danos encontrados, como fissuras nas vigas longarinas, são decorrentes de excesso de carga não previsto em projeto. Também devido a sua idade, o gabarito existente na maior parte das pistas é inferior aos exigidos pelas normas vigentes, levando a que ocorram por muitas vezes choques de veículos com a superestrutura, fato este que acarretou danos como armaduras principais rompidas e expostas, ocasionando perda da capacidade portante da OAE e maior exposição do concreto e aço a agentes agressivos.

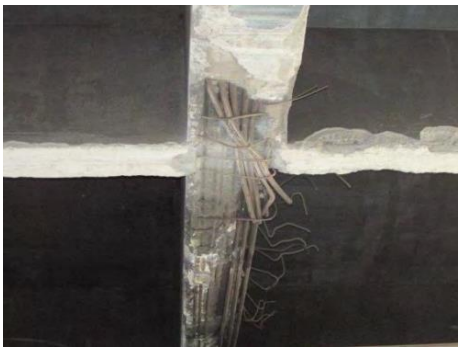
Devido à falta de manutenção, observou-se corrosão em diversos pontos da obra, tanto em seu trecho original como de prolongamento. A não substituição dos elementos de vedação das juntas de dilatação na época correta têm ocasionado percolação de água pelas articulações metálicas do arco central, onde a possibilidade de corrosão é um fator que prejudica a segurança estrutural. Em todos os trechos estruturais, observou-se a presença de armaduras e estribos rompidos causados devido a choque de veículos (Figura 34), de fissuras possivelmente causadas por esforços excessivos de flexão (Figura 35) e concreto disgregado e segregado (Figura 36 e Figura 37). As manifestações patológicas encontradas em cada trecho estrutural estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Freguesia do Ó.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Fissuras ≤0,3 mm; armaduras e/ou estribos rompidos; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; resto de forma; pontas de aço remanescentes; defeito no revestimento, manchas de umidade e eflorescência
Mesoestrutura	Fissuras >0,3mm; fissuras mapeadas; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; pontas de aço remanescentes; defeito no revestimento; manchas de umidade e eflorescência
Infraestrutura	Fissuras com abertura >0,3mm e concreto segregado
Encontros e taludes	Erosão; fissuras >0,3mm; concreto disgregado; defeito no revestimento; manchas de umidade
Pavimento e passeios	Deterioração do pavimento; fissuras; afundamento do pavimento; concreto disgregado
Juntas de dilatação	Lábio e perfil deteriorados; fissuras >0,3mm; concreto disgregados com e sem armadura exposta
Dispositivos de segurança	Pilaretes não fixados; fissuras >0,3mm; concreto disgregado com e sem armadura exposta

Fonte: Autoras (2021).

Figura 34– Armadura e estribos rompidos em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: SIURB (2020).

Figura 35 – Fissuras de posicionamento vertical em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 36– Concreto disgregado e segregado com armadura exposta em uma das vigas longarinas – Ponte Freguesia do Ó.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 37 – Concreto disgregado no lábio polimérico. Nota-se lábio e perfil deteriorados – Ponte Freguesia do Ó.

Fonte: SIURB (2020).

4.1.2. Ponte da Casa Verde

A ponte em questão apresenta danos estruturais consideráveis, sendo observado inclusive rompimento de mais de 50% das barras principais de uma das vigas longarinas, isto devido a choques de veículos. Umas das vigas travessas apresentou fissura com abertura de 0,7mm, na qual foi realizado monitoramento com placa de vidro por três meses, durante os quais a fissura permaneceu estável. Isto leva a crer que o problema possivelmente ocorreu durante a aplicação da carga quando da liberação da obra, imaginando-se que o concreto ainda não possuía resistência suficiente para suportar tal carregamento, o que foi solucionado naturalmente uma vez que o concreto atingiu maiores índices de resistência.

Com relação a manutenção, observou-se infiltrações na região das juntas de dilatação que acarretaram acúmulo de água entre as lajes e pré-lajes. Este acúmulo se deu pela má execução do lançamento do concreto das lajes, que permitiu a existência de nichos entre os elementos citados. Da Figura 38 à Figura 41, é possível observar a presença de manchas, fissuras, afundamento no pavimento e falhas de contato nos aparelhos de apoio existentes na Ponte da Casa Verde; assim como as demais manifestações em cada trecho estrutural, apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte da Casa Verde.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Fissuras; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado, desagregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; resto de forma; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade, eflorescência e fuligem; crescimento de vegetação; acúmulo de água; acúmulo de detritos
Aparelhos de apoio	Falha de contato; aparelho de apoio deslocado
Mesoestrutura	Fissuras>0,3mm; baixo cobrimento; concreto disgregado, desagregado e segregado; armadura exposta; defeito no revestimento; manchas de umidade, eflorescência e fuligem
Infraestrutura	Manchas de umidade
Encontros e taludes	Erosão; fissuras; acúmulo de detritos
Pavimento e passeios	Deterioração do pavimento; fissuras; fissuras mapeadas; afundamento do pavimento; buraco; placas do passeio deterioradas; afundamento do passeio

(Continua)

(Término)

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Juntas de dilatação	Junta encoberta por pavimento flexível; lábio e perfil deteriorados; fissuras; concreto disgregado; esborcinamento de perfil elastomérico; acúmulo de detritos
Dispositivos de segurança	Ausência de módulo de guarda-corpo; desalinhamento de guarda-corpo; concreto disgregado com armadura exposta; oxidação; defeito em pintura

Fonte: Autoras (2021).

Figura 38– Manchas de eflorescência e fuligem em uma das lajes – Ponte da Casa Verde.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 39 – Aparelho de apoio com falha de contato – Ponte da Casa Verde.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 40– Fissuras e mancha de umidade em uma das vigas travessas – Ponte da Casa Verde.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 41 – Buraco e afundamento do pavimento em região de reparo – Ponte da Casa Verde.

Fonte: SIURB (2019).

4.1.3. Ponte das Bandeiras

Sobressaiu-se durante a análise da Ponte das Bandeiras o fator durabilidade. Apesar de haver insuficiências estruturais, a corrosão devido à falta de manutenção e má execução dos cobrimentos, aliada à idade da estrutura, gera uma variedade de manifestações patológicas, dentre elas fissuras (Figura 42), disgregação do concreto e contaminação do concreto e aço por agentes agressivos. À época de execução do trecho original da obra vigorava a NB-1/40, que estabelece cobrimento de 2cm para elementos estruturais ao ar livre, pois não se levava em

conta na época as questões de durabilidade. Apesar deste fato, existem hoje tecnologias de manutenção para que este baixo cobrimento seja corrigido e não afete a proteção das armaduras.

Algumas das manifestações patológicas encontradas foram: fissuras com eflorescência, concreto disgregado com armadura exposta (Figura 43), manchas de umidade (Figura 44), junta de dilatação encoberta (Figura 45) e oxidação nos dispositivos de segurança, como descrito na Tabela 12.

Tabela 12 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte das Bandeiras.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Fissuras com e sem eflorescência; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado, desagregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; pontas de aço remanescentes; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade, eflorescência e fuligem
Mesoestrutura	Fissuras >0,3mm; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade e eflorescência
Infraestrutura	Fissuras; concreto disgregado e segregado; armadura exposta
Encontros e taludes	Acúmulo de detritos
Pavimento e passeios	Fissuras; afundamento do pavimento; buraco; concreto disgregado com armadura exposta; passeio deteriorado
Juntas de dilatação	Junta encoberta por pavimento flexível
Dispositivos de segurança	Fissuras; concreto disgregado com e sem armadura exposta; oxidação; defeito em pintura; defeito no revestimento; altura irregular do guarda-corpo; ausência de guarda-corpo

Fonte: Autoras (2021).

Figura 42– Fissura com eflorescência e mancha de fuligem na laje – Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 43 – Concreto disgregado com armadura exposta na laje do arco – Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 44– Mancha de umidade em uma das paredes – Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 45 – Junta de dilatação encoberta por pavimento flexível – Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

4.1.4. Ponte Presidente Jânio Quadros

A durabilidade da Ponte Presidente Jânio Quadros encontra-se deficiente, com pontos de corrosão das armaduras e baixo cobrimento; há também pontos de disgregação e segregação. No que diz respeito à capacidade estrutural, há excesso de carga em alguns pontos em função de seu projeto original ter sido calculado para o TT-24, bem como vigas longarinas com armaduras principais rompidas. No quesito funcional, foram observados pontos de acúmulo de água no pavimento e seção celular (Figura 46).

Ressalta-se a presença de erosão na base do arco (Figura 48), esmagamento e obstrução dos aparelhos de apoio, presença de fissuras mapeadas e pavimento deteriorado com presença de vegetação. Todas as manifestações patológicas nos elementos estruturais, exceto na infraestrutura, por falta de acesso, estão descritas na Tabela 13.

Tabela 13 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Presidente Jânio Quadros.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Fissuras >0,3mm com e sem eflorescência e/ou umidade; fissuras mapeadas; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; pontas de aço remanescentes; resto de forma; defeito no revestimento; defeito em reparo com e sem armadura exposta; furo; manchas de umidade, eflorescência e fuligem; crescimento de vegetação; acúmulo de água; acúmulo de detritos
Aparelhos de apoio	Esmagados e obstruídos
Mesoestrutura	Fissuras >0,3mm com e sem eflorescência e/ou umidade; fissuras mapeadas; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; pontas de aço remanescentes; resto de forma; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade, eflorescência e fuligem; acúmulo de detritos
Infraestrutura	Sem acesso

(Continua)

(Término)

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Encontros e taludes	Vazio; erosão; fissuras >0,3mm; fissuras mapeadas; armaduras rompidas; concreto disgregado com armadura exposta; defeito no revestimento; defeito em alvenaria; manchas de umidade
Pavimento e passeios	Deterioração do pavimento; fissuras>0,3mm; fissuras mapeadas; afundamento do pavimento; buraco; concreto disgregado; defeito em reparo; desgaste superficial no pavimento e passeio; crescimento de vegetação
Juntas de dilatação	Junta encoberta por pavimento flexível; lábio e perfil deteriorados; concreto disgregado; crescimento de vegetação; acúmulo de detritos
Dispositivos de segurança	Ausência de módulo de guarda-corpo; fixação deficiente; desalinhamento de guarda-corpo; concreto disgregado com e sem armadura exposta; corrosão superficial; defeito em pintura; crescimento de vegetação

Fonte: Autoras (2021).

Figura 46– Acúmulo de água no interior da seção celular – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 47 – Armadura exposta devido a baixo cobrimento em uma das vigas transversinas – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 48– Erosão sob a base do arco – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 49 – Pista de rolamento com fissuras no pavimento flexível – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Fonte: SIURB (2019).

4.1.5. Ponte Presidente Dutra

A Ponte Presidente Dutra não possui graves manifestações patológicas, sendo encontradas apenas anomalias leves, como fissuras devido à retração do concreto, disgregação por impacto, pequenos nichos de segregação e baixo cobrimento em pontos localizados (Figura 50 e Figura 53). Isto se deve à idade da OAE, sendo a mais nova das obras analisadas neste

estudo, permitindo que sejam percebidos os efeitos da passagem de tempo e falta de manutenção sobre as estruturas de concreto. Na Tabela 14 são descritas por trecho estrutural as anomalias observadas.

Tabela 14 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Presidente Dutra.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Fissuras ≤0,3mm com e sem eflorescência; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; resto de forma; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade, eflorescência e fuligem; acúmulo de detritos
Aparelhos de apoio	Obstruídos por vegetação e acúmulo de detritos
Mesoestrutura	Fissuras≤0,3mm com e sem eflorescência; junta de concretagem deficiente; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de umidade e fuligem
Infraestrutura	Fissuras >0,3mm; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta
Encontros e taludes	Vazio; erosão; fissuras ≤0,3mm com e sem eflorescência; concreto disgregado e segregado com armadura exposta; armadura exposta; defeito no revestimento; defeito em reparo; manchas de fuligem
Pavimento e passeios	Deterioração do pavimento; fissuras; buraco; defeito em reparo
Juntas de dilatação	Lábio e perfil deteriorados; fissuras; defeito em reparo
Dispositivos de segurança	Concreto disgregado com e sem armadura exposta

Fonte: Autoras (2021).

Figura 50– Resto de forma na face inferior da laje superior da seção celular – Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 51 – Fissuras na borda da laje em balanço – Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 52– Fissura horizontal no bloco de fundação de um dos pilares – Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2020).

Figura 53 – Concreto disgregado e vazio sob a cortina – Ponte Presidente Dutra.

Fonte: SIURB (2020).

4.1.6. Ponte Tatuapé

Nesta obra foram encontradas fissuras devido a causas estruturais como ausência de estribos e deficiência de armadura de pele, além de a análise estrutural ter identificado necessidade de reforço para cargas de torção. A anomalia que mais se sobressaiu nesta OAE foi a presença de cordoalhas de protensão rompidas (Figura 54), causadas por choques de veículos devido ao baixo gabarito da estrutura. As condições de durabilidade foram verificadas como regulares, com pontos de corrosão e algumas deficiências de uso e operação, bem como manifestações patológicas devido à execução do concreto.

Da Figura 55 à Figura 57, são mostradas manifestações de concreto disgregado, manchas de fuligem, fissuras mapeadas nas lajes em balanço e inferior, além de concreto segregado com armadura exposta na mesoestrutura. A Tabela 15 apresenta a relação completa de manifestações patológicas identificadas na OAE.

Tabela 15 – Manifestações patológicas identificadas na Ponte Tatuapé.

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Cordoalhas rompidas; fissuras >0,3mm com e sem eflorescência; fissuras mapeadas com e sem eflorescência; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; defeito no revestimento; manchas de umidade, eflorescência e fuligem
Aparelhos de apoio	Concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; com rasgos; falha de contato; aparelho de apoio deslocado; obstruídos por acúmulo de detritos
Mesoestrutura	Fissuras >0,3mm com e sem eflorescência; fissuras mapeadas; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; defeito no revestimento; manchas de umidade e fuligem

(Continua)

(Término)

Elemento ou trecho estrutural	Anomalias constatadas
Superestrutura	Cordoalhas rompidas; fissuras >0,3mm com e sem eflorescência; fissuras mapeadas com e sem eflorescência; armaduras rompidas; baixo cobrimento; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; defeito no revestimento; manchas de umidade, eflorescência e fuligem
Aparelhos de apoio	Concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; armadura exposta; com rasgos; falha de contato; aparelho de apoio deslocado; obstruídos por acúmulo de detritos
Mesoestrutura	Fissuras >0,3mm com e sem eflorescência; fissuras mapeadas; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta; defeito no revestimento; manchas de umidade e fuligem
Infraestrutura	Fissuras >0,3mm; fissuras mapeadas; concreto disgregado e segregado com e sem armadura exposta
Encontros e taludes	Acúmulo de detritos
Pavimento e passeios	Deterioração do pavimento e do passeio; fissuras; afundamento do pavimento; buraco; concreto disgregado com e sem armadura exposta; defeito em reparo
Juntas de dilatação	Junta encoberta por pavimento flexível; juntas danificadas; acúmulo de detritos
Dispositivos de segurança	Fissuras; concreto disgregado com e sem armadura exposta; crescimento de vegetação

Fonte: Autoras (2021).

Figura 54– Cordoalhas rompidas devido a choque de veículos – Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 55 – Concreto disgregado com armadura exposta e mancha de fuligem na laje inferior – Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 56– Fissuras mapeadas com eflorescência na laje inferior – Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

Figura 57 – Concreto disgregado e segregado com armadura exposta em um dos pilares – Ponte Tatuapé.

Fonte: SIURB (2019).

4.2.Ensaios

Os ensaios descritos nos próximos itens foram executados a fim de caracterizar com mais precisão o estado de deterioração ou comprometimento das estruturas, avaliando sua situação estrutural. Os resultados detalhados dos pontos e elementos avaliados nas obras podem ser observados nos Apêndices A a F.

4.2.1. Avaliação da dureza superficial pelo uso de esclerômetro de reflexão

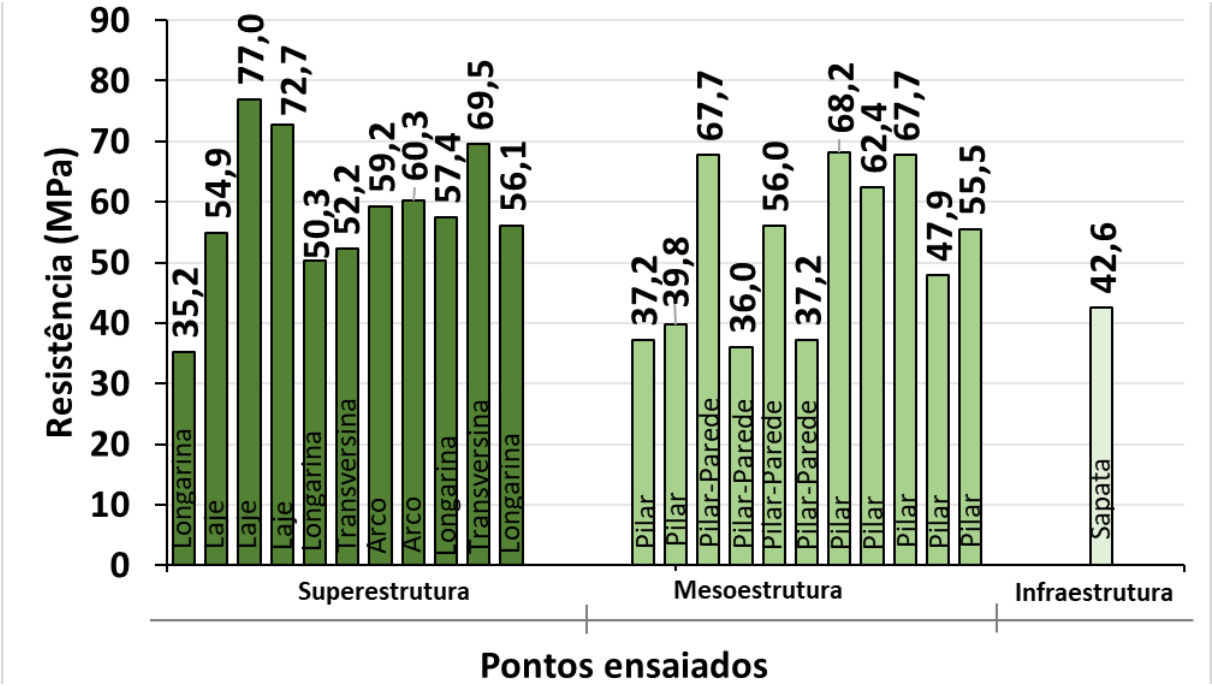
Na Figura 58 a Figura 60 são apresentados os resultados de esclerometria das obras avaliadas.

Com relação a Ponte Freguesia do Ó, verificou-se que os resultados de esclerometria variaram entre 35,2 MPa e 77,0 MPa na superestrutura e de 36,0 MPa e 68,2 MPa na mesoestrutura; enquanto na infraestrutura foi realizado somente um ensaio, que resultou em 42,6 MPa. Estes valores indicam que a resistência mecânica da superestrutura e mesoestrutura são superiores à infraestrutura, o que se relaciona com as técnicas de projeto usuais.

Na Ponte da Casa Verde o ensaio de esclerometria foi realizado somente na superestrutura e mesoestrutura (Figura 59). Os resultados variaram de 23,5 MPa a 40,0 MPa e 25,2 MPa a 43,1 MPa, na superestrutura e mesoestrutura, respectivamente.

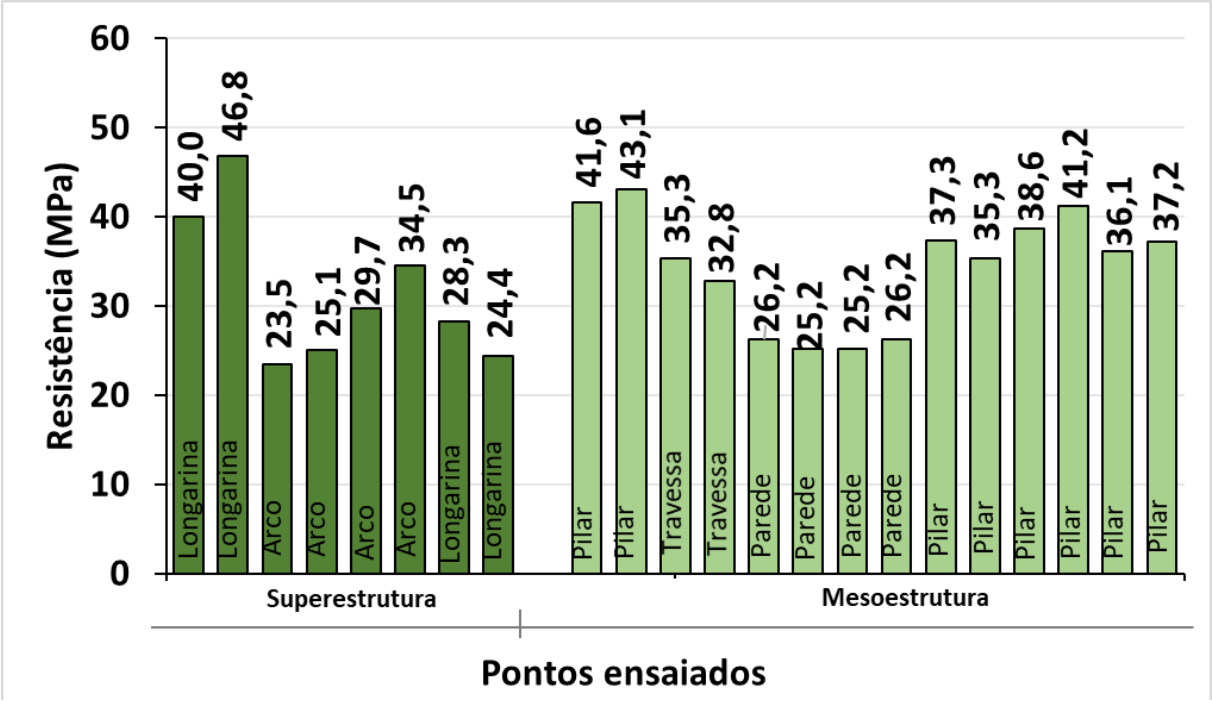
Já os resultados de esclerometria da Ponte das Bandeiras são apresentados na Figura 60, onde foram realizados também somente ensaios na superestrutura e mesoestrutura, cujos resultados variaram de 21,4 MPa a 31,8 MPa (superestrutura) e 9,1 MPa a 35,1 MPa (mesoestrutura).

Figura 58 - Esclerometria - Ponte Freguesia do Ó.



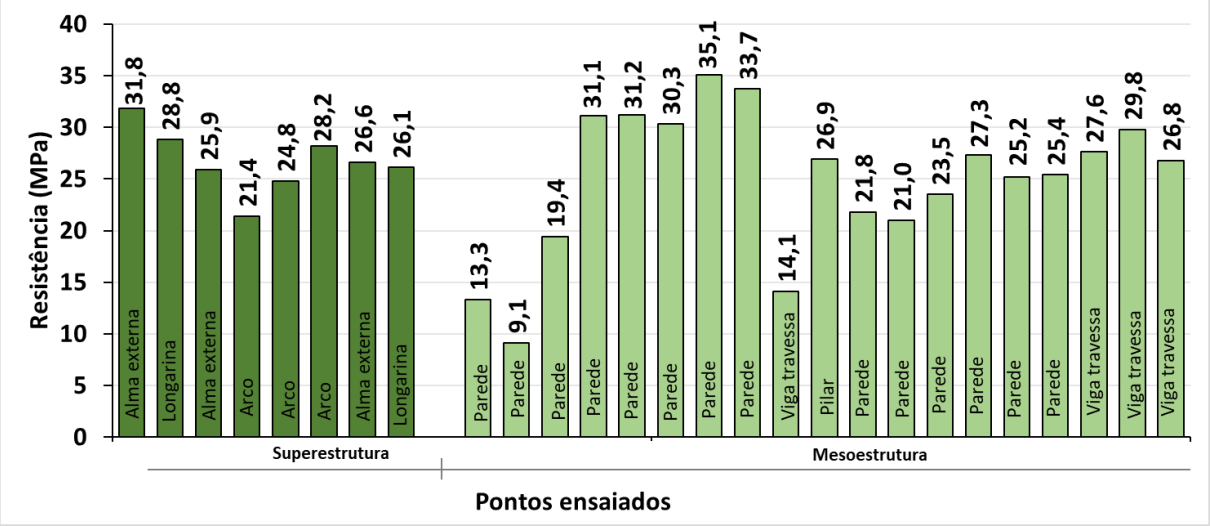
Fonte: Autoras (2021).

Figura 59 - Esclerometria - Ponte da Casa Verde.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 60 - Esclerometria - Ponte das Bandeiras.



Fonte: Autoras (2021).

De maneira geral, observou-se que os resultados de esclerometria foram maiores para a Ponte Freguesia do Ó, inferiores para a Ponte das Bandeiras e intermediários para a Ponte da Casa Verde. Essa observação pode ser justificada pois cada OAE possui seu fck de projeto de acordo com a concepção estrutural e época de execução.

4.2.2. Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A seguir são apresentados os gráficos com os resultados de ultrassom das obras avaliadas (Figura 61 a Figura 64).

Na Ponte da Casa Verde o ensaio de verificação de velocidade de propagação de ondas de ultrassom foi realizado na superestrutura e na mesoestrutura, onde ocorre uma variação de 2.424 m/s a 4.167 m/s e de 2.611 m/s a 4.541 m/s, respectivamente.

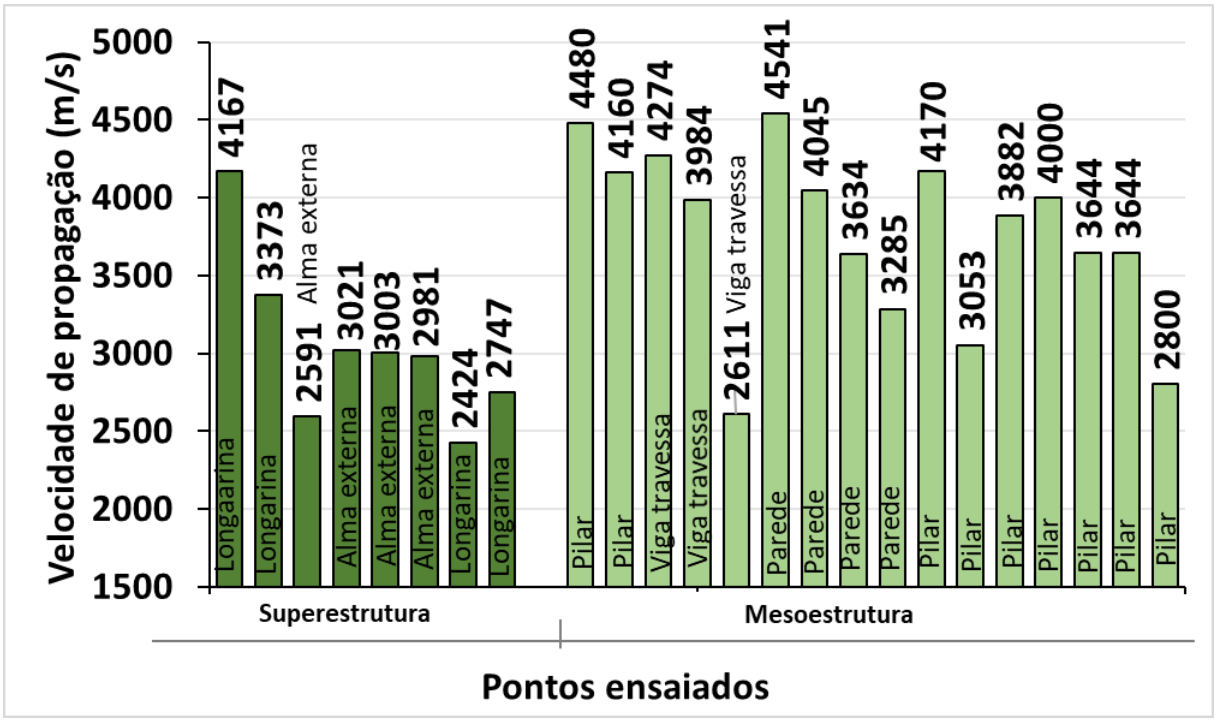
Os resultados apresentados na Ponte das Bandeiras vão de 2.817 m/s a 3.418 m/s e de 2.121 m/s a 4.902 m/s, na superestrutura e na mesoestrutura, nesta ordem. Como é possível observar na Figura 62, foram realizados mais pontos de ensaio na mesoestrutura do que na super.

Já na Ponte Presidente Jânio Quadros (Figura 63), a maior parte dos pontos ensaiados ocorreu na superestrutura, com uma velocidade variando de 1.999,0 m/s a 4857,4 m/s. Na mesoestrutura a variação ocorre de 3.557,0 m/s a 4.665,7 m/s, sinalizando um concreto de melhor qualidade.

Na superestrutura da Ponte Tatuapé (Figura 64) o valor máximo é de 4.221,7 m/s e o

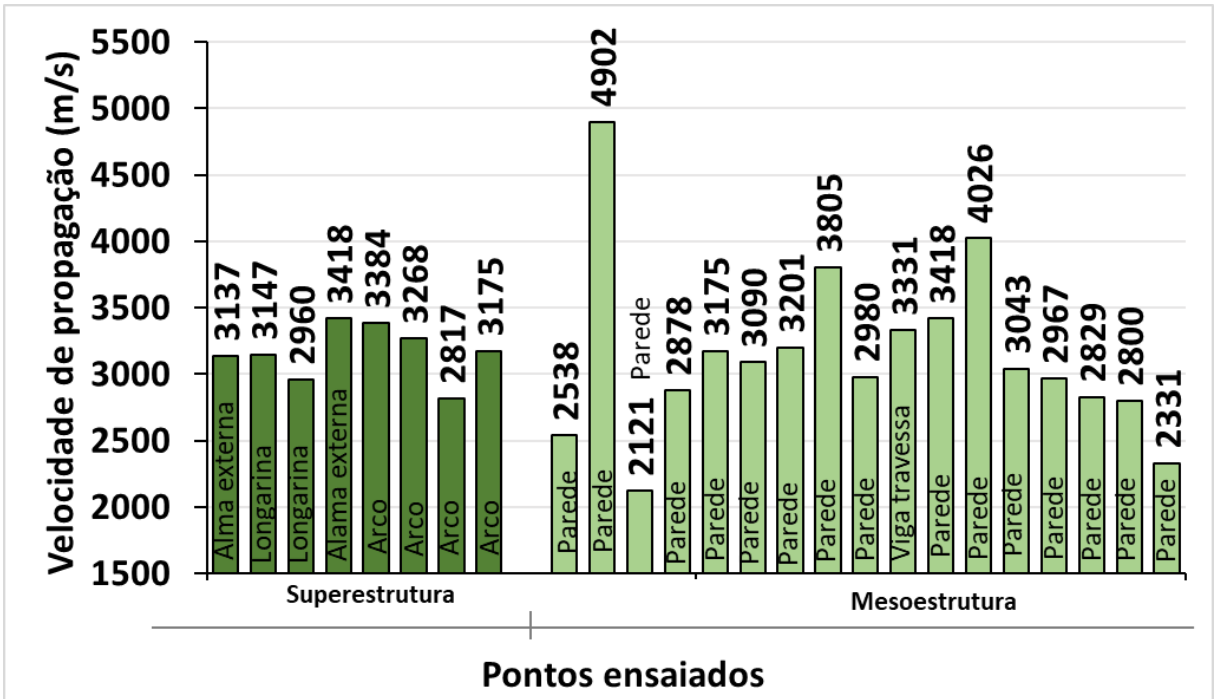
mínimo de 3.110,4 m/s e na mesoestrutura é de 4.170,3 m/s a 4.499,8 m/s.

Figura 61 - Ultrassom - Ponte da Casa Verde.



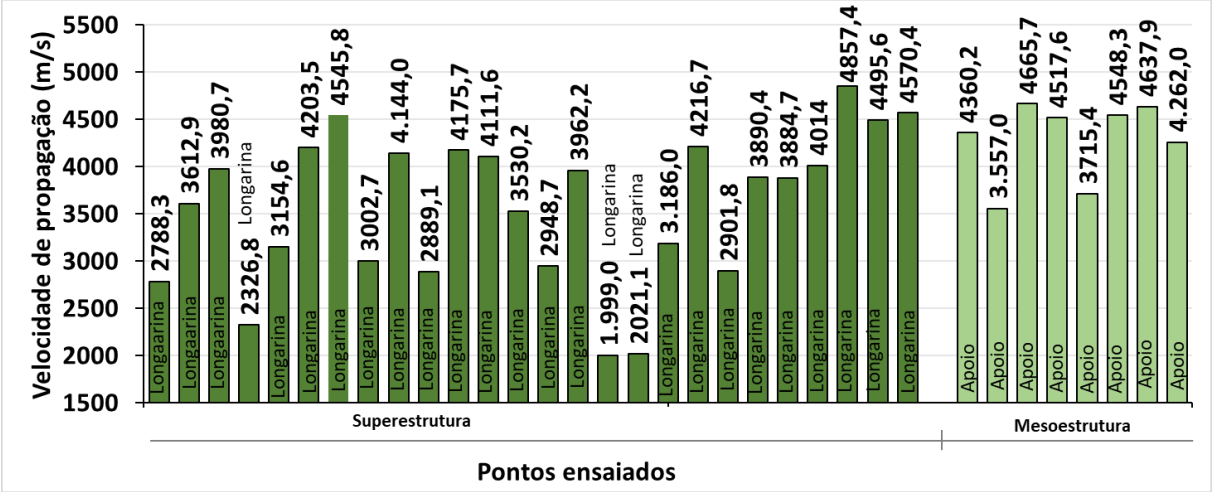
Fonte: Autoras (2021).

Figura 62 - Ultrassom - Ponte das Bandeiras.



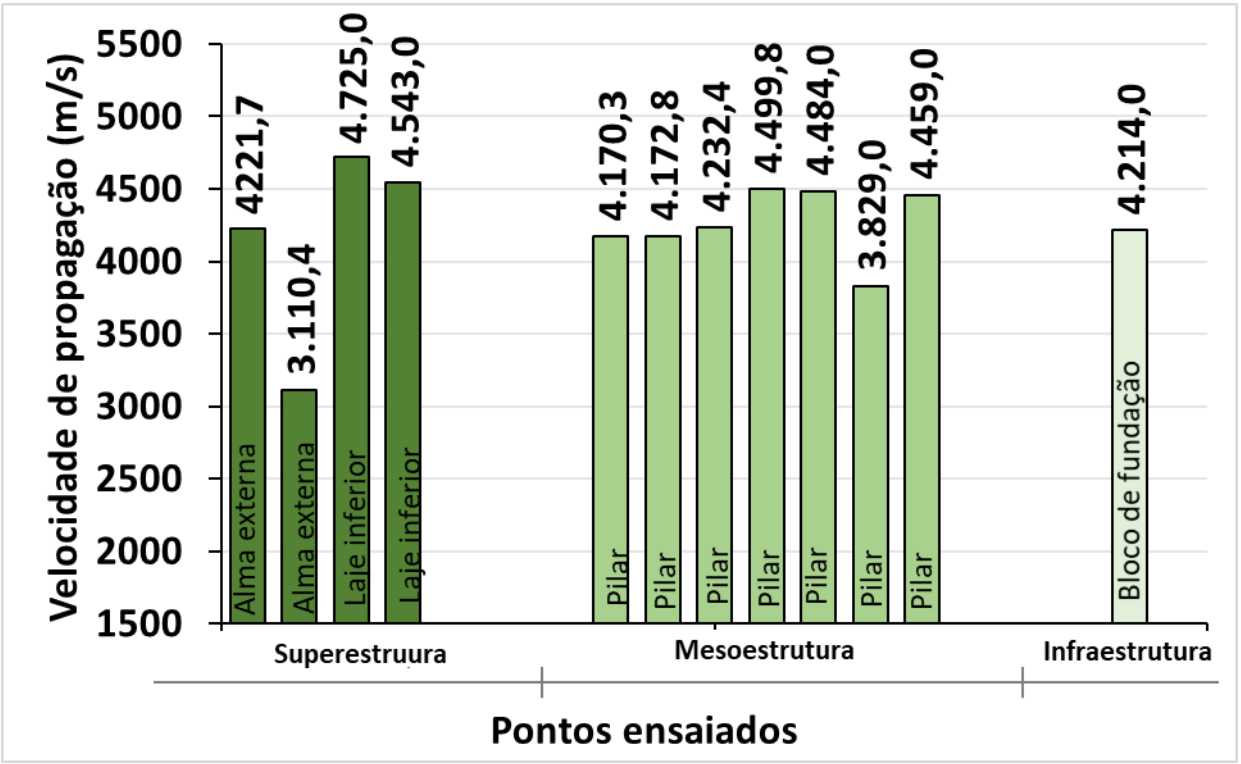
Fonte: Autoras (2021).

Figura 63 - Ultrassom - Ponte Presidente Jânio Quadros.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 64 – Ultrassom - Ponte Tatuapé.



Fonte: Autoras (2021).

Avaliando a qualidade do concreto em função da velocidade de propagação (Tabela 9) verificou-se que dos 23 pontos ensaiados da Ponte da Casa Verde, 4% apresentaram qualidade excelente, 22% qualidade regular, 26% qualidade ruim e 48% qualidade boa. Na Ponte das Bandeiras, foram ensaiados 24 pontos onde 4% foram classificados com qualidade excelente, 8% boa, 38% ruim e 50% regular. Em Jânio Quadros foram ensaiados 34 pontos da estrutura; 3% apresentaram péssima qualidade, 9% regular, 18% ruim, 21% excelente e 50% estão em

boa qualidade. Na Ponte Tatuapé, foram realizados diversos pontos no mesmo elemento estrutural, totalizando 65 pontos, onde 5% estão com qualidade ruim, 6% regular, 17% excelente e 72% boa.'

De modo geral, como demonstra a Tabela 16, observou-se que as obras em geral possuem concreto de qualidade boa ou regular, com valores médios acima de 3.000 m/s. Em comparação com as outras obras, executadas antes de 1960, a Ponte Tatuapé (inaugurada em 1975) apresentou valores que levam a crer que o controle de qualidade do concreto evoluiu com os anos. Considera-se que condição do concreto é um fator determinante para sua vida útil, visto que um concreto que apresenta maiores velocidades de propagação de ondas é mais coeso, dificultando a penetração de agentes agressivos.

Tabela 16 - Análise da qualidade do concreto por meio da média da velocidade de propagação linear.

Obra	Trechos	Média da velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade do concreto
Casa Verde	Superestrutura	3038,37	Regular
	Mesoestrutura	3770,87	Bom
Bandeiras	Superestrutura	3163,25	Regular
	Mesoestrutura	3164,69	Regular
Jânio Quadros	Superestrutura	3592,84	Bom
	Mesoestrutura	4283,01	Bom
Tatuapé	Superestrutura	4150,03	Bom
	Mesoestrutura	4263,89	Bom
	Infraestrutura	4214,00	Bom

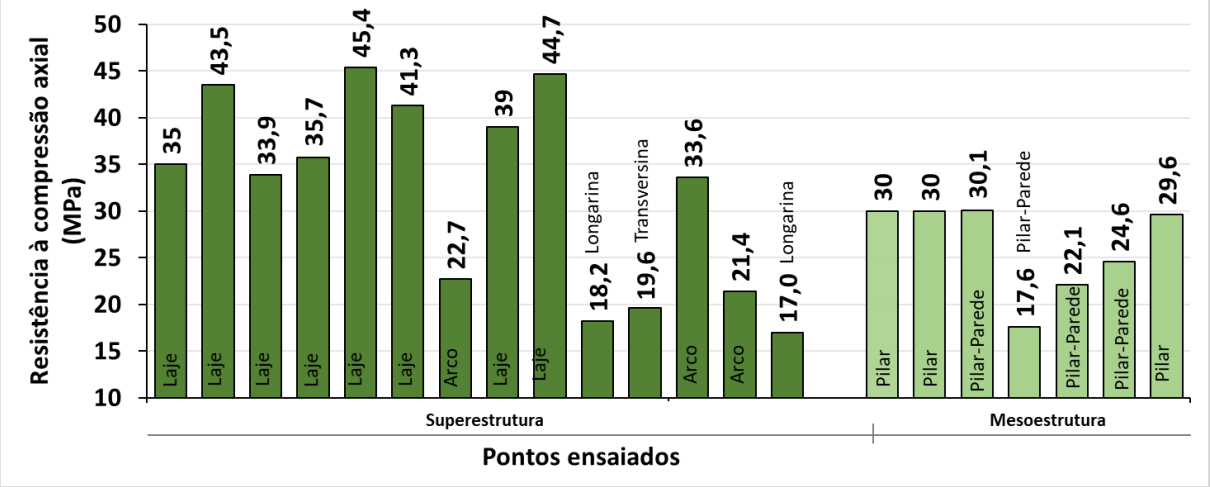
Fonte: Autoras (2021).

4.2.3. Determinação da resistência à compressão axial

A seguir serão apresentados os gráficos com os resultados dos pontos ensaiados de cada ponte (da Figura 65 a Figura 70), conforme os relatórios de patologia.

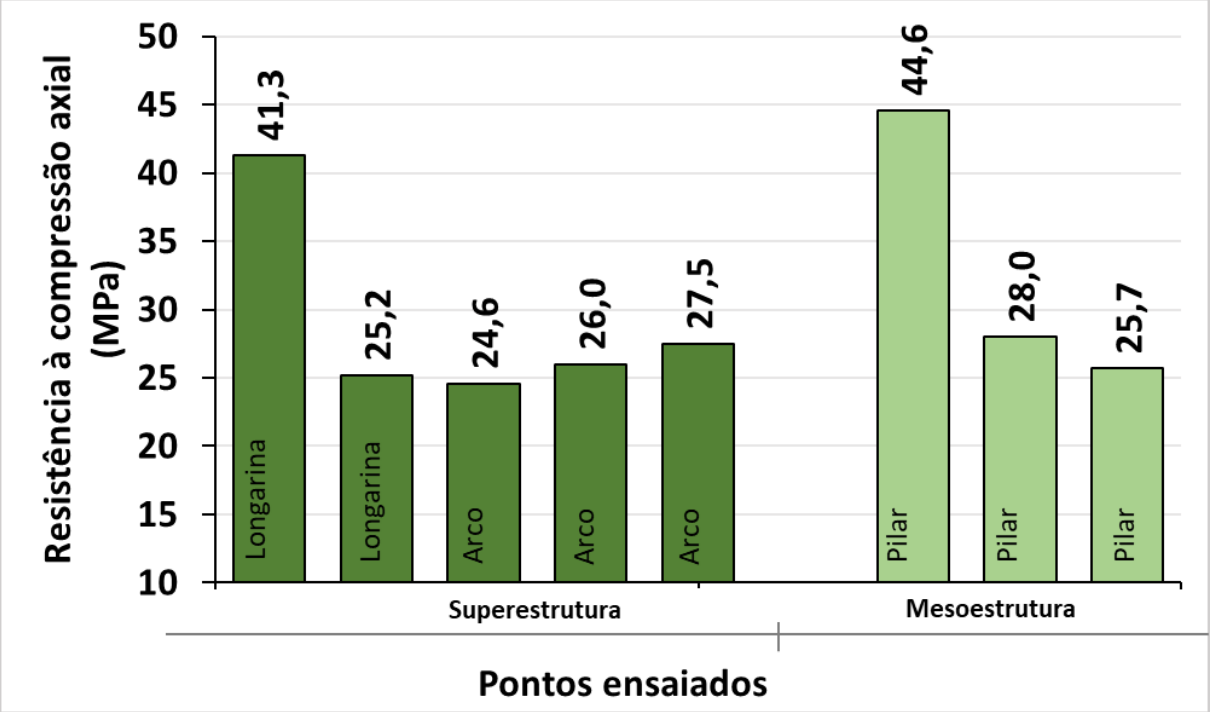
Na Ponte Freguesia do Ó e da Casa Verde, o ensaio de determinação da resistência foi realizado na superestrutura e mesoestrutura, onde os valores máximos obtido na Freguesia em ambos os trechos foram de 45,4 MPa e 30,1 MPa e os mínimos foram de17,0 MPa e 17,6 MPa (Figura 65). Já na Casa Verde a variação de resistência vai de 41,3 MPa a 24,6 MPa na superestrutura e de 44,6 MPa a 25,7 MPa na mesoestrutura (Figura 66).

Figura 65 - Resistência à compressão axial - Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: Autoras (2021).

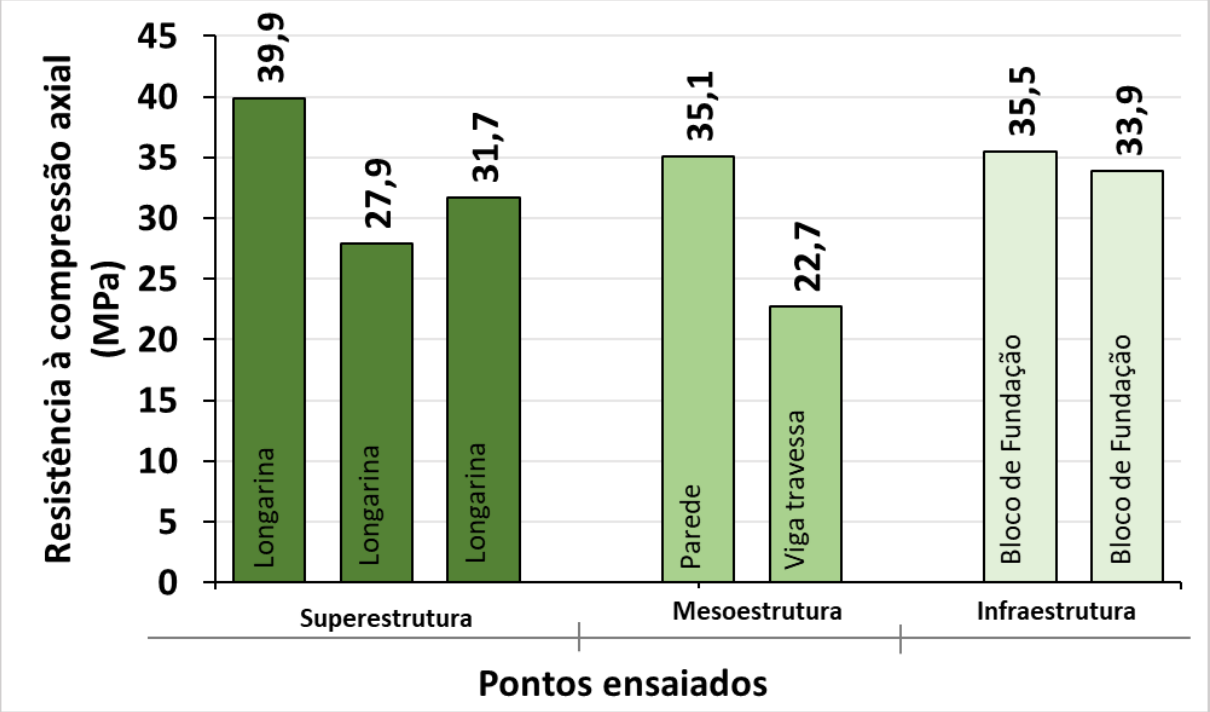
Figura 66 - Resistência à compressão axial - Ponte da Casa Verde.



Fonte: Autoras (2021).

Analisando os resultados apresentados no relatório de patologia da Ponte das Bandeiras, verificou-se que na superestrutura a resistência à compressão mínima é de 27,9 MPa e máxima de 39,9 MPa, na mesoestrutura e na infraestrutura foram realizados o ensaio em duas amostras, apresentando resultados de 35,1 MPa e 22,7 MPa e 35,5 MPa e 33,9 MPa (Figura 67).

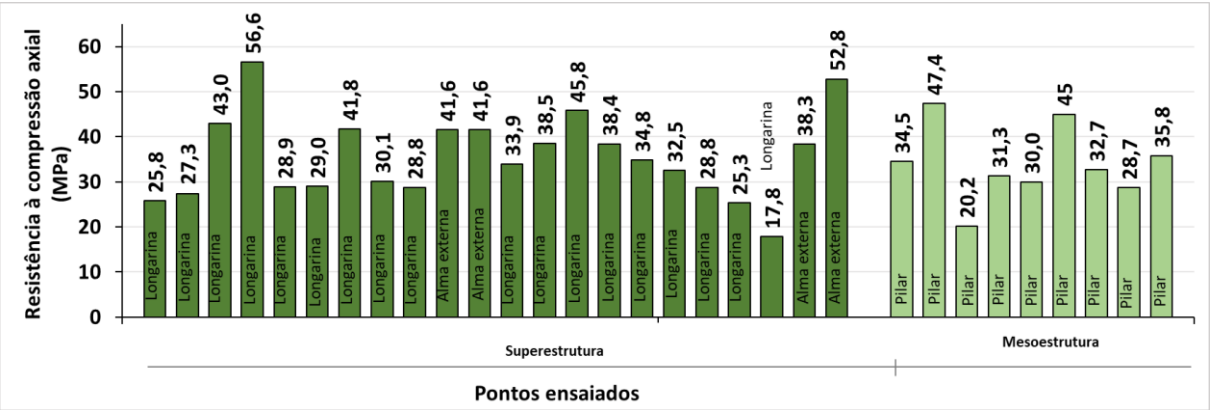
Figura 67 - Resistência à compressão axial - Ponte das Bandeiras.



Fonte: Autoras (2021).

Em Jânio Quadros a resistência à compressão axial teve uma variação de 56,6 MPa a 17,8 MPa na superestrutura e de 47,4 MPa a 20,2 MPa, como observado na Figura 68.

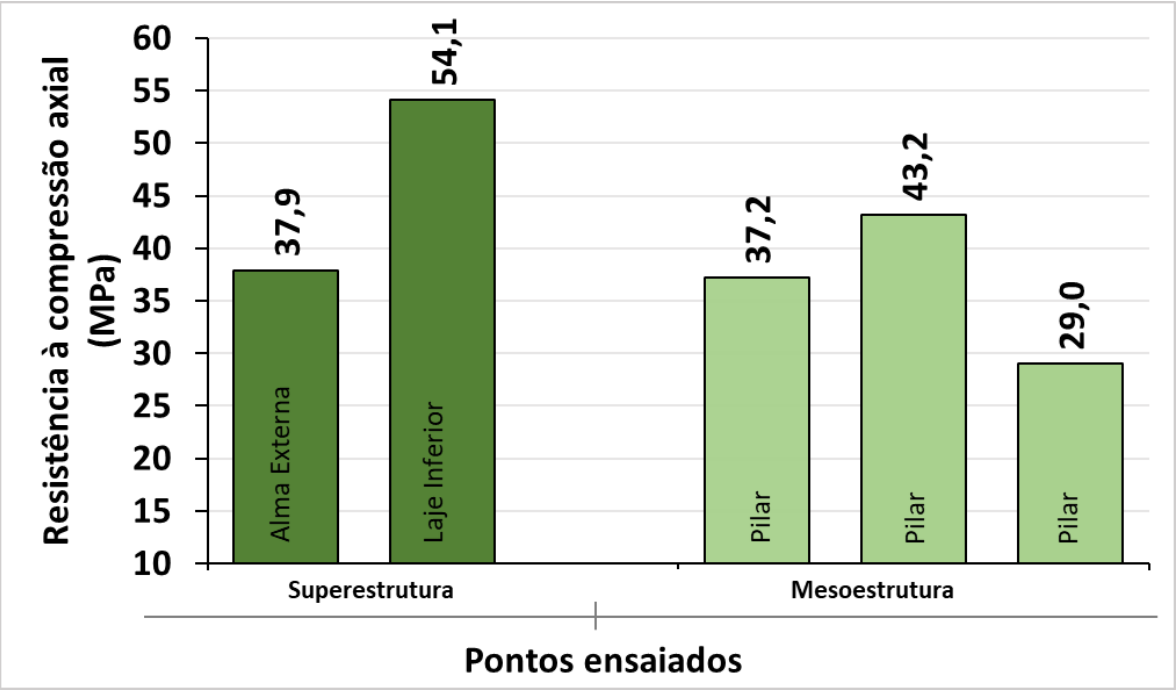
Figura 68 - Resistência à compressão axial - Ponte Presidente Jânio Quadros.



Fonte: Autoras (2021).

Realizado em poucos pontos, as resistências obtidas na Ponte Presidente Dutra (Figura 69) na superestrutura é de 54,1 MPa e 37,9 MPa e na mesoestrutura varia de 43,2 MPa e 29,0 MPa.

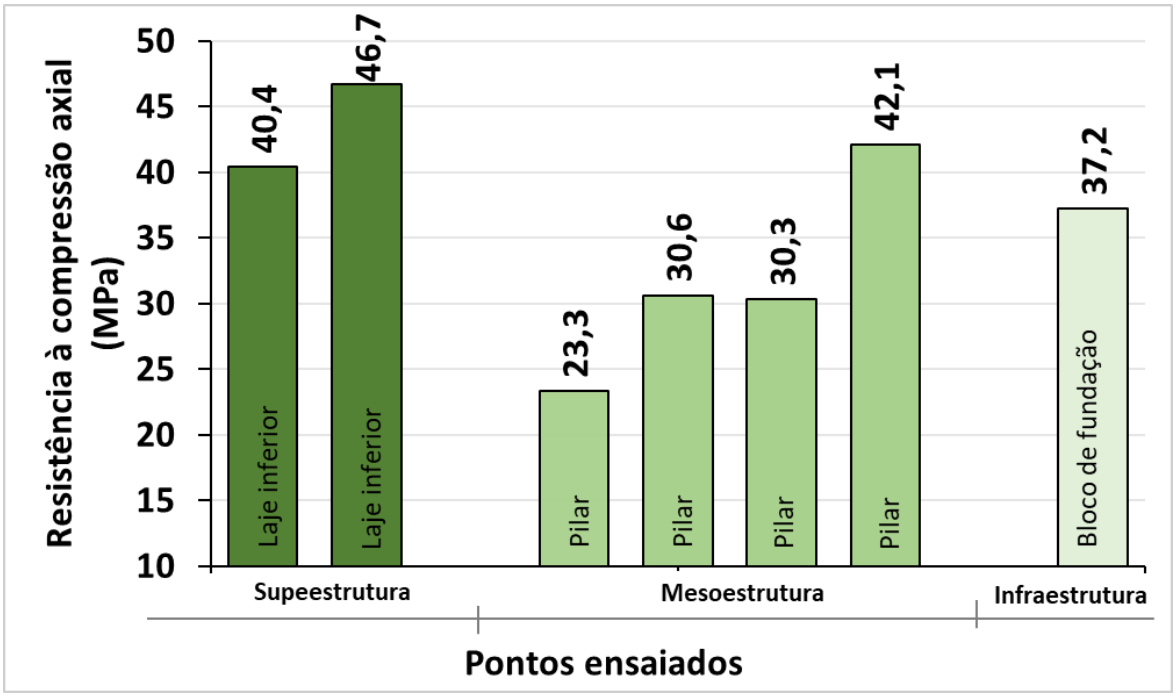
Figura 69 - Resistência à compressão axial da Ponte Presidente Dutra.



Fonte: Autoras (2021).

Por fim com mais amostras ensaiadas na mesoestrutura com relação ao demais trechos, a Ponte Tatuapé apresenta uma resistência máxima de 46,7 MPa e mínima de 40,4 MPa na superestrutura, uma variação de 23,3 MPa a 42,1 MPa na mesoestrutura e com apenas uma amostra na infraestrutura, resistência de 37,2 MPa (Figura 70).

Figura 70 - Resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé.



Fonte: Autoras (2021).

Analisando a Tabela 17 e todas as figuras descritas anteriormente, é possível verificar que todos os pontos ensaiados onde foi identificado a resistência à compressão axial definida de projeto, tanto original quanto os relacionados ao prolongamento dos trechos, estão acima do especificado.

Tabela 17 – Resistência à compressão axial (fck) de projeto.

Obra	Fck de projeto original
Ponte Freguesia do Ó	Não encontrado
Ponte da Casa Verde	24,0 MPa e 35 MPa (prolongamento)
Ponte das Bandeiras	24,0 MPa e 35 MPa (prolongamento)
Ponte Presidente Jânio Quadros	Não encontrado
Ponte Presidente Dutra	De 18,0 MPa a 28,0 MPa
Ponte Tatuapé	30,0 MPa para a superestrutura e 20,0 MPa para as demais

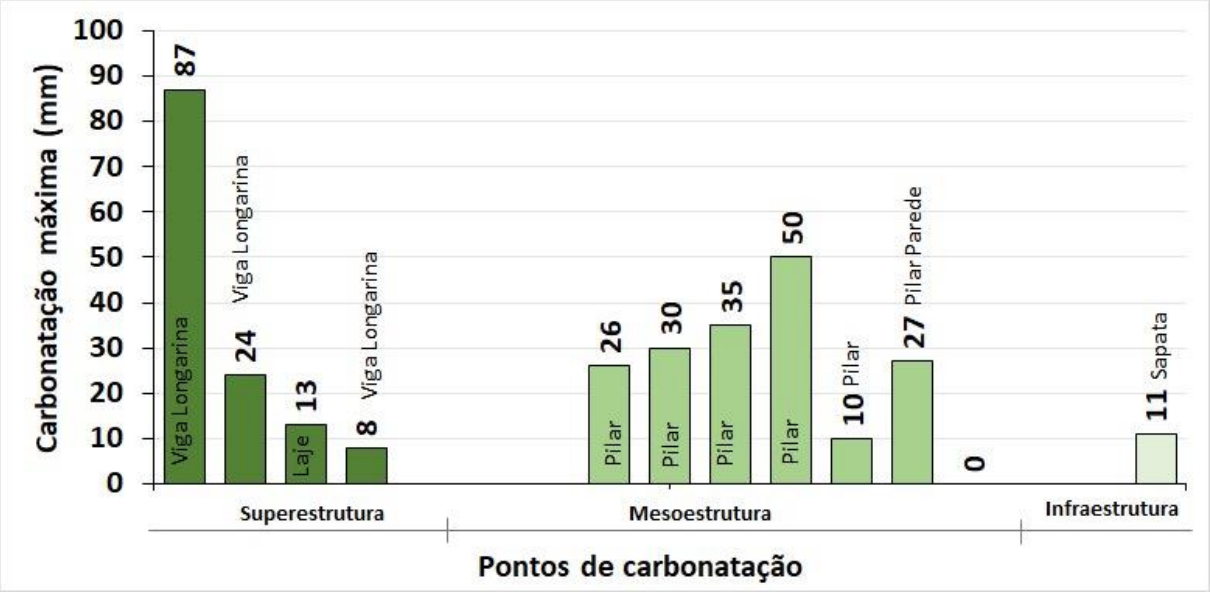
Fonte: Autoras (2021).

4.2.4. Determinação da profundidade de carbonatação, cobrimento e pacometria

São apresentadas a seguir os gráficos com os valores de carbonatação e cobrimentos nos pontos ensaiados, onde é possível observar da Figura 71 a Figura 82.

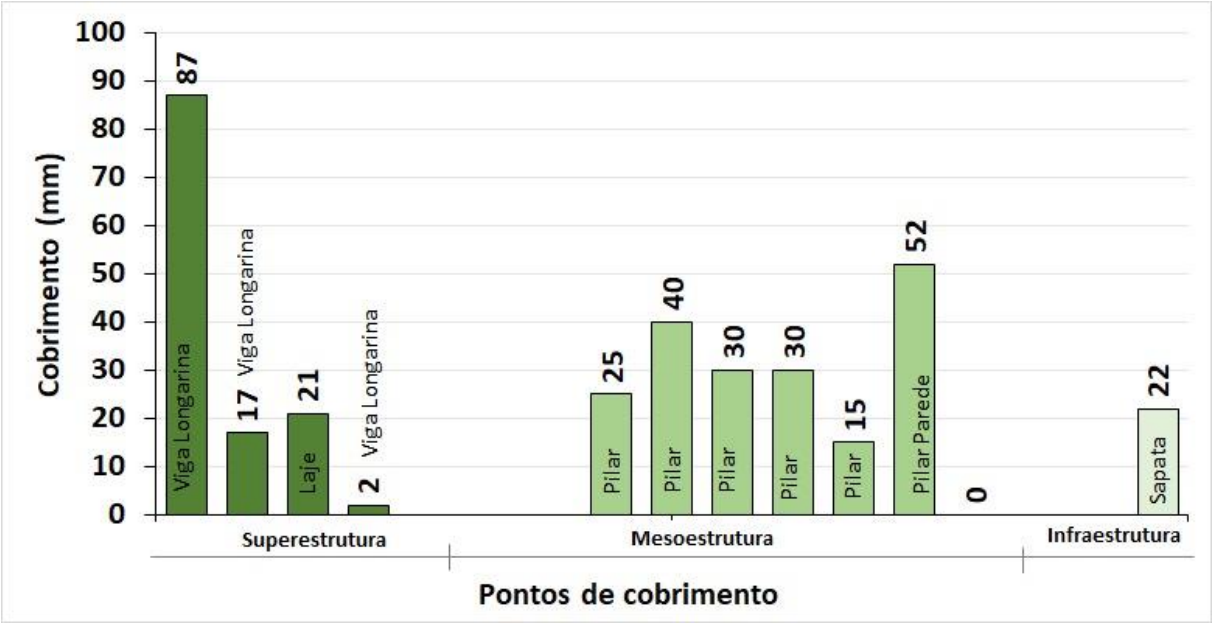
Na Ponte Freguesia do Ó (Figura 71 e Figura 72), é possível verificar que a menor profundidade de carbonatação relacionada ao seu cobrimento é de 27 mm para 52 mm, enquanto o pior caso é de 50 mm para 30 mm de cobrimento. Ambos os casos se encontram na mesoestrutura da ponte estudada.

Figura 71 - Carbonatação - Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: Autoras (2021).

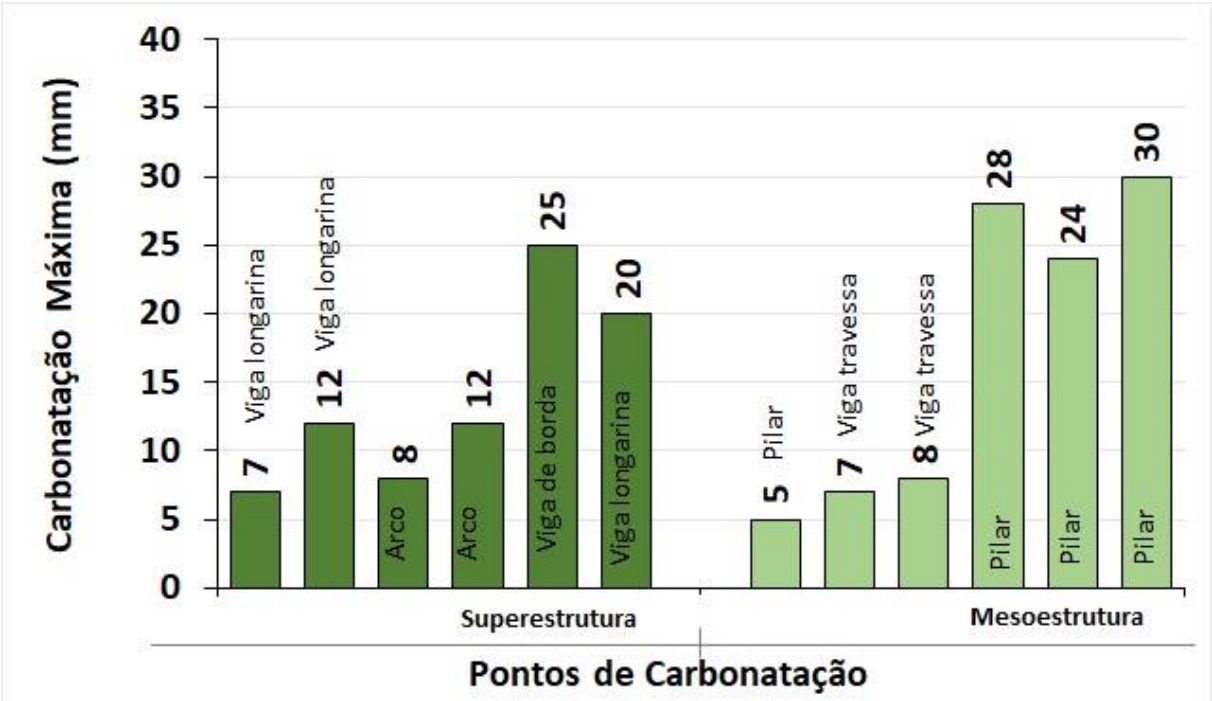
Figura 72 - Cobrimento - Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: Autoras (2021).

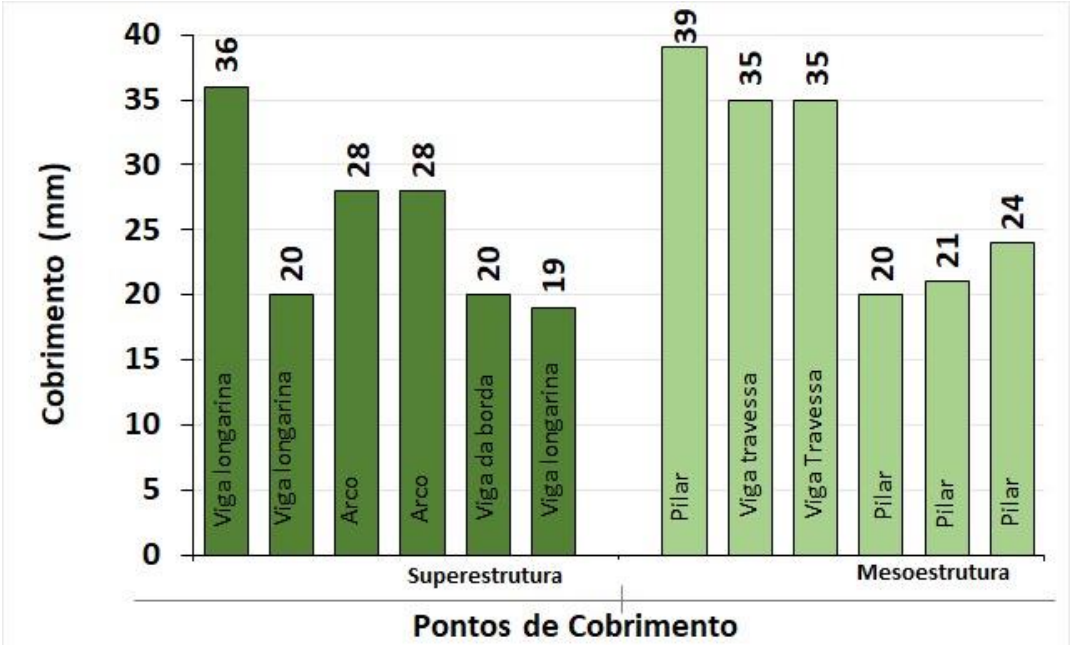
Na OAE analisada na Figura 73 e Figura 74 os ensaios só foram realizados na superestrutura e na mesoestrutura. Os casos que mais chamaram atenção estão localizados nos pilares, onde no trecho mais novo, construído no ano de 2010, atingiu uma carbonatação de 5 mm com cobrimento de 39 mm. Foi observado que o ponto mais desfavorável foi obtido no trecho antigo, atingindo 28 mm de carbonatação e 20 mm de cobrimento, indicando que a idade foi um fator preponderante para a evolução da frente de carbonatação.

Figura 73 - Carbonatação - Ponte da Casa Verde.



Fonte: Autoras (2021).

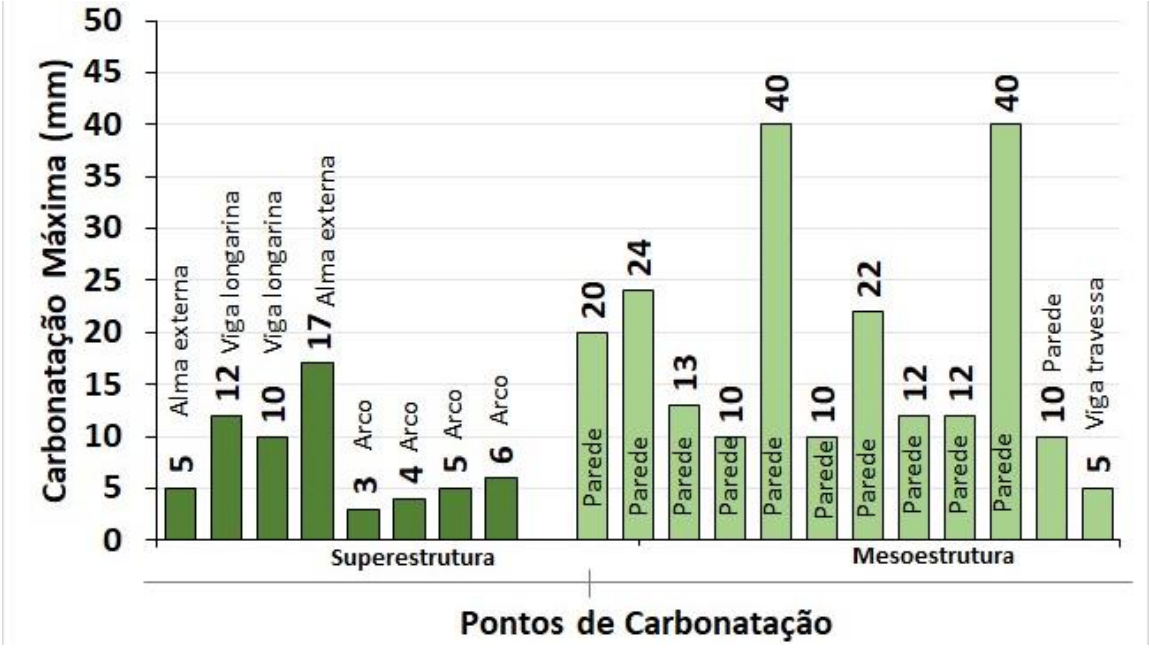
Figura 74 - Cobrimento - Ponte da Casa Verde.



Fonte: Autoras (2021).

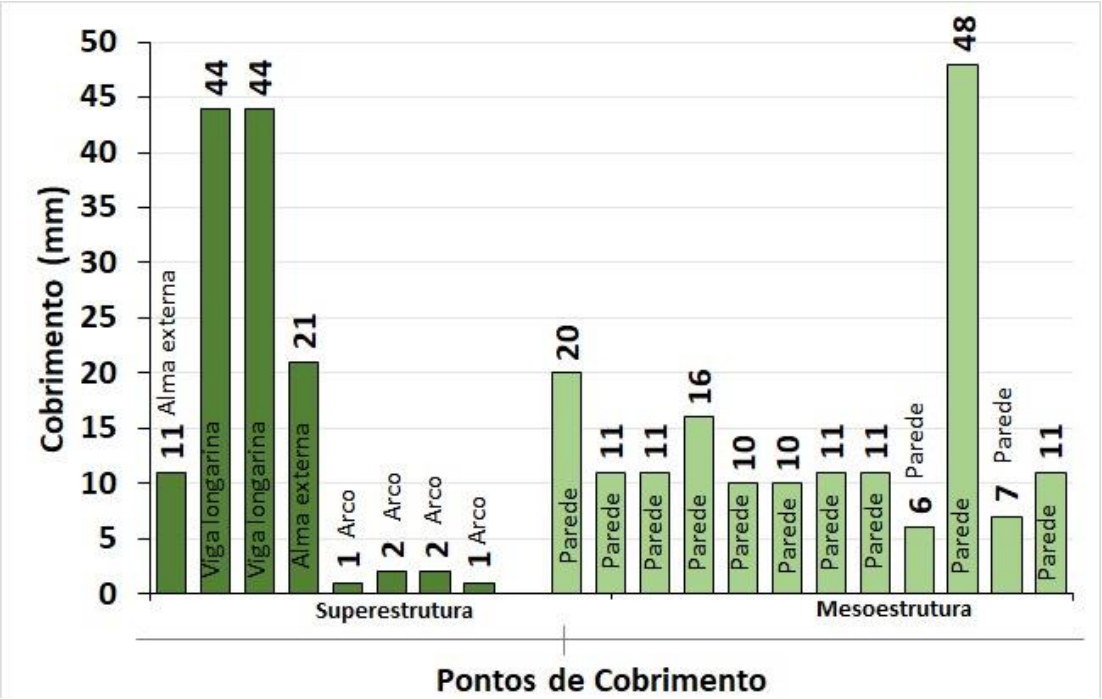
Na Figura 75 e Figura 76 é possível observar os dados da Ponte das Bandeiras, onde a maior parte dos pontos localizados na mesoestrutura encontram-se despassivados e a pior espessura carbonatada é de 40 mm com um cobrimento de 10 mm. Em contra partida, localizada na superestrutura, observa-se uma melhor situação com 10 mm de profundidade de carbonatação, com um cobrimento de 44 mm. Ambas as situações estão nos trechos antigos, porém pode-se especular que a superestrutura receba menores índices de dióxido de carbono, por estar mais distante do tráfego.

Figura 75 - Carbonatação - Ponte das Bandeiras.



Fonte: Autoras (2021).

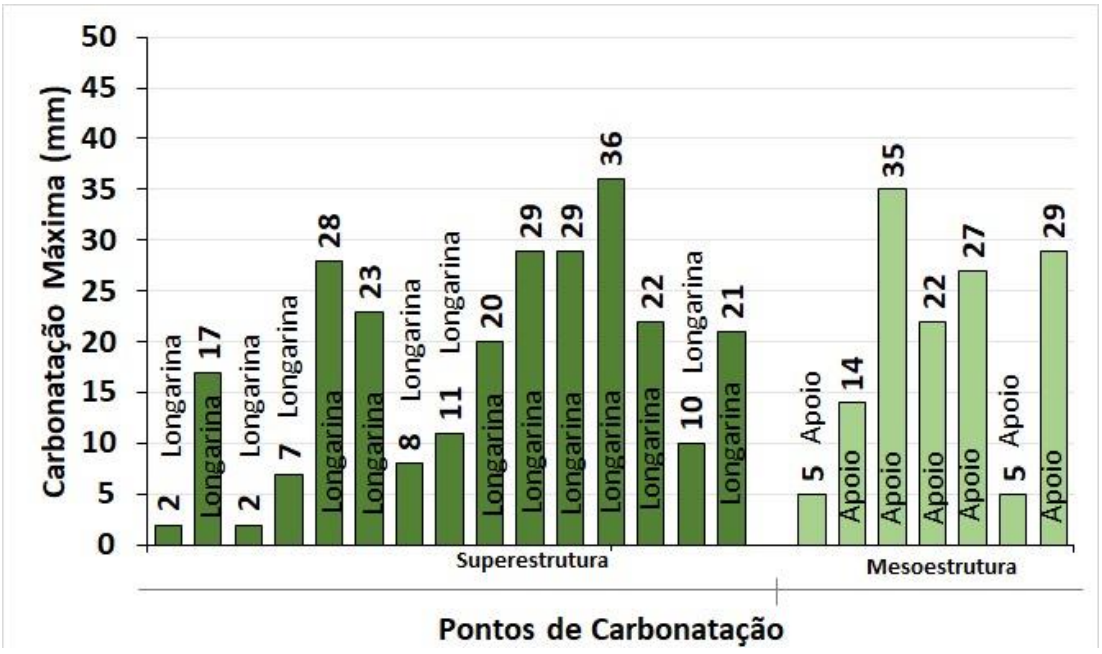
Figura 76 - Cobrimento - Ponte das Bandeiras.



Fonte: Autoras (2021).

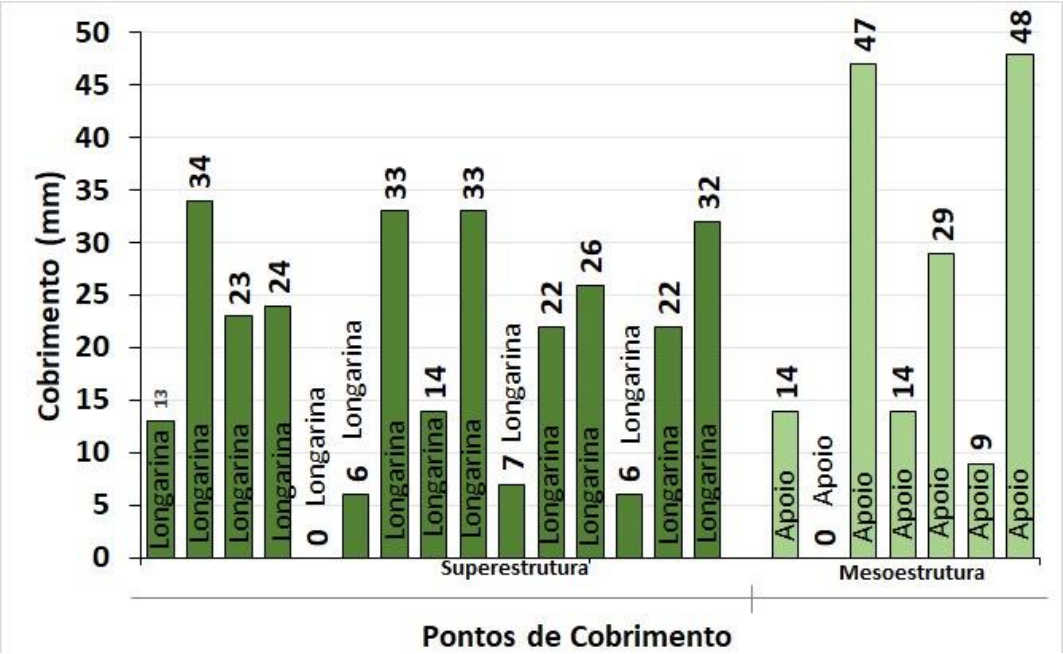
Na Ponte Presidente Jânio Quadros (Figura 77 e Figura 78), conforme análise dos resultados obtidos através da realização do ensaio, verificou-se que o melhor e o pior valor de profundidade carbonatada se encontram nas vigas longarinas da superestrutura, onde verificou-se o pior caso de cobrimento, sendo ele nulo, obteve um valor igual a 28 mm de carbonatação. Fator importante observado nesta OAE com relação a não uniformidade de cobrimentos, relacionado diretamente a uma possível má execução, sem o uso correto de espaçadores.

Figura 77 - Carbonatação– Ponte Presidente Jânio Quadros.



Fonte: Autoras (2021).

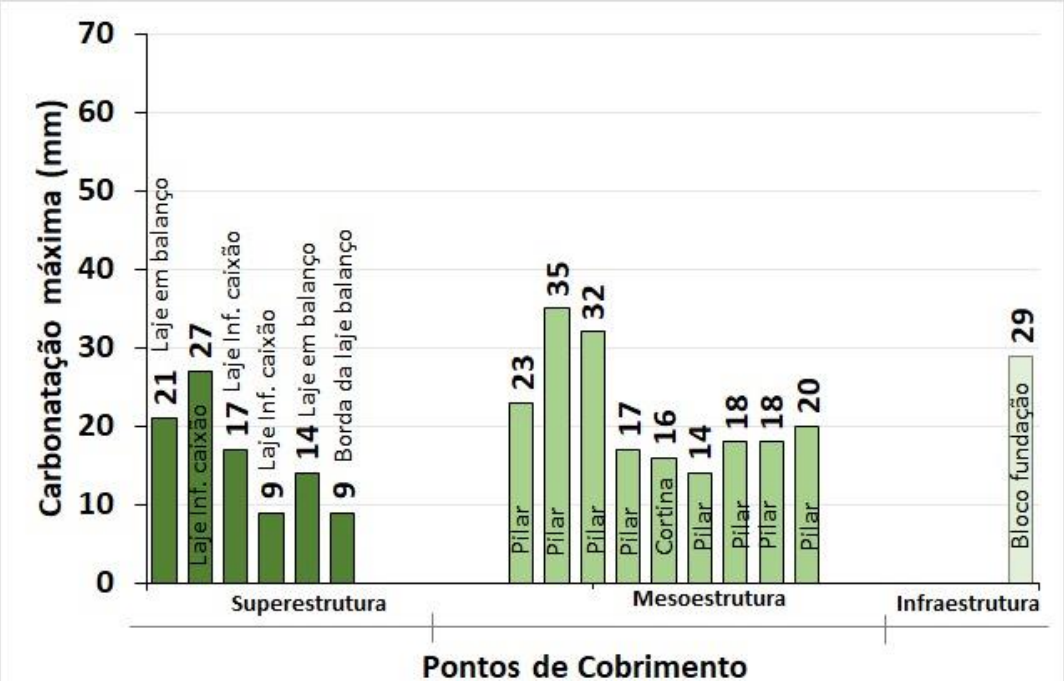
Figura 78 - Cobrimento – Ponte Presidente Jânio Quadros.



Fonte: Autoras (2021).

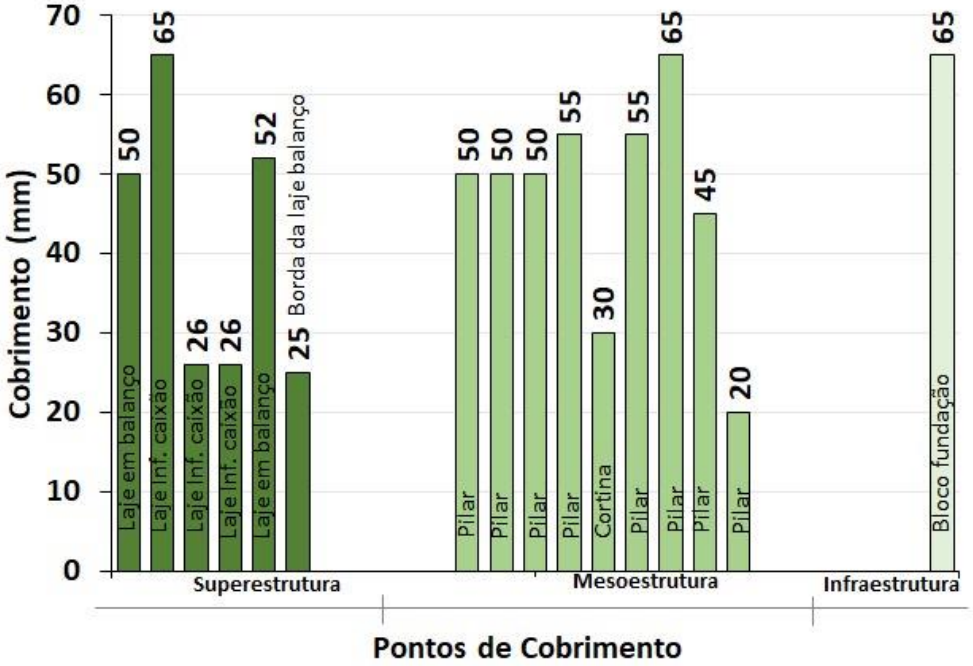
Analisando os valores encontrados na Ponte Presidente Dutra e na Ponte Tatuapé, o melhor e pior caso estão localizados em pilares da mesoestrutura. Na Dutra (Figura 79 e Figura 80), se obteve uma profundidade de carbonatação de 18 mm com 45 mm de cobrimento e de 20 mm de carbonatação para a mesma medida de cobrimento, respectivamente. Já na Tatuapé (Figura 81 e Figura 82), os valores foram de 13 mm com cobrimento de 72 mm no melhor ponto e de 20 mm com 35 mm de cobrimento no pior, sem armaduras despassivadas.

Figura 79 - Carbonatação - Ponte Presidente Dutra.



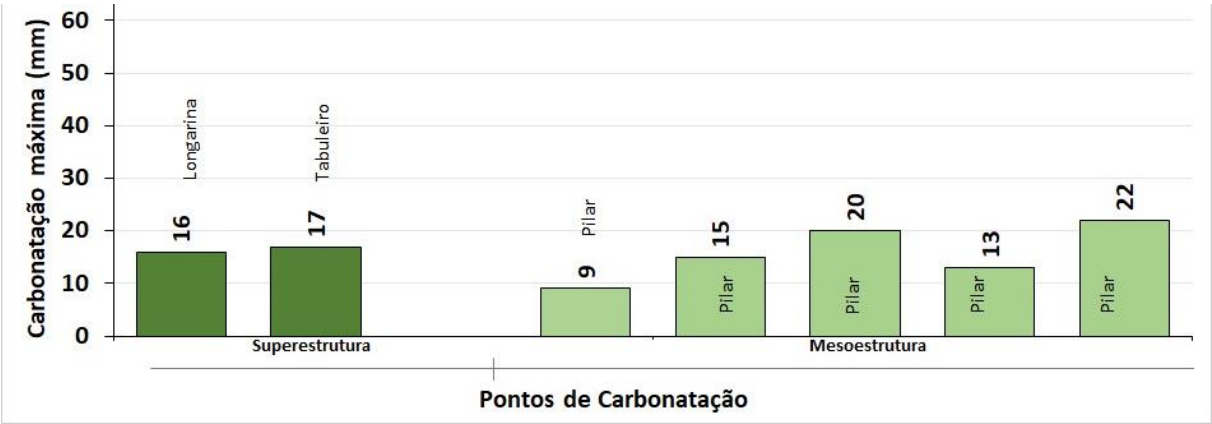
Fonte: Autoras (2021).

Figura 80 - Cobrimento - Ponte Presidente Dutra.



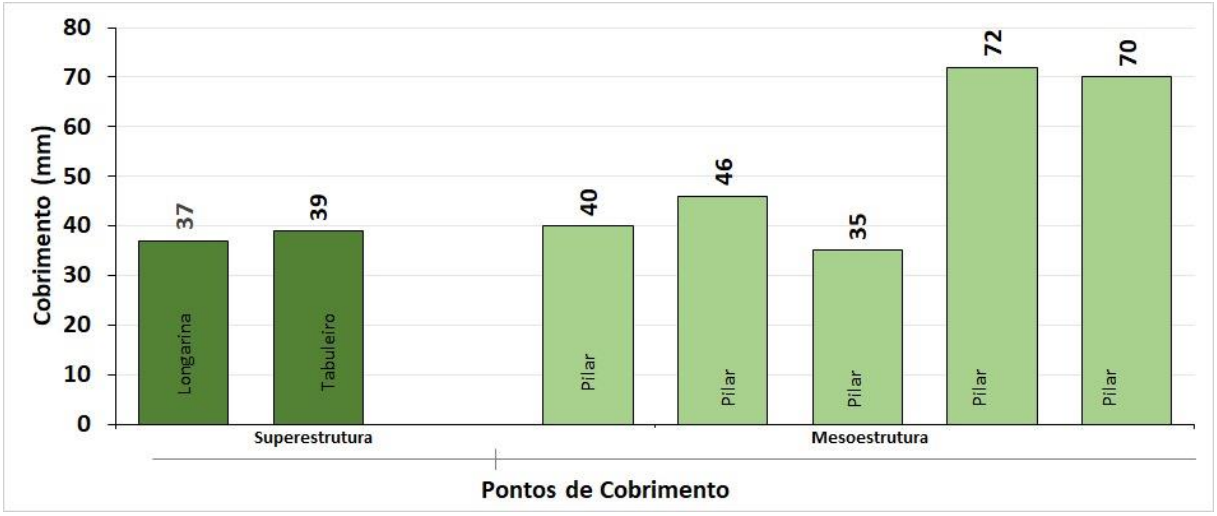
Fonte: Autoras (2021).

Figura 81 - Carbonatação - Ponte Tatuapé.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 82 - Cobrimento - Ponte Tatuapé.



Fonte: Autoras (2021).

4.2.1. Reatividade álcali-agregado

Os resultados de RAA são apresentados da Tabela 18 à Tabela 23, onde é possível verificar a presença ou ausência de reação.

Nas Pontes da Freguesia do Ó, da Casa Verde e das Bandeiras (Tabela 18 a Tabela 20), todas as amostras apresentaram reatividade. Também foi possível observar nos relatórios de cada uma, os aspectos gerias observados nos CP extraídos da infraestrutura, apresentando argamassa com coloração cinza, distribuição dos constituintes homogêneos, proporção dos constituintes argamassados, aderência da argamassa/agregado graúdo normais, pouca porosidade com poros milímetros e submilimétricos, compacidade compactos, adensamento normais e não observou fraturamentos.

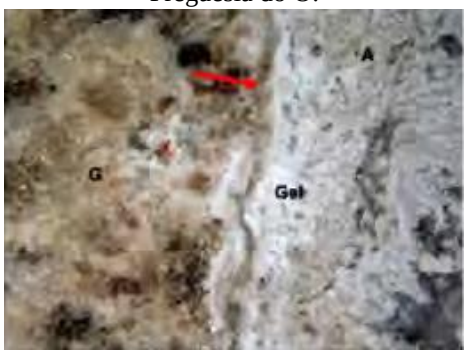
Os aspectos de reação Álcali-Agregado da Ponte Freguesia do Ó, foram observados nas bordas de reação (Figura 83) e nos poros preenchidos (Figura 84).

Tabela 18 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Freguesia do Ó.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Amostra 01 - Sapata	Infraestrutura	Positivo	Eixo E', sob o arco

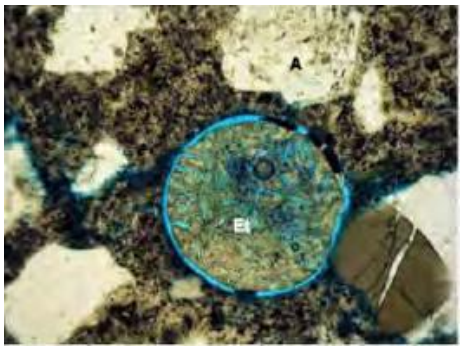
Fonte: Autoras (2021).

Figura 83 - Aspecto do concreto no qual se observa bordas de reação no contorno de agregado graúdo (G) e gel expansivo sobre argamassa (A) – Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: SIURB (2020).

Figura 84 - Detalhe do concreto no qual se observa um poro com a argamassa preenchido por tufos de etringita (Et). A=areiato – Ponte Freguesia do Ó.



Fonte: SIURB (2020).

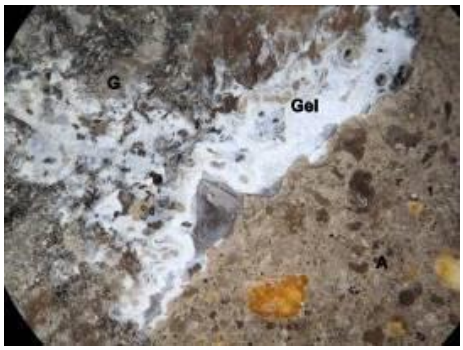
Na Ponte da Casa Verde observou-se a presença de RAA na borda de reação em ambas as amostras extraídas foram raras e mal definidas observados (Figura 85 e Figura 86) e raramente nos poros preenchidos.

Tabela 19 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte da Casa Verde.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Amostra 01 - Bloco	Infraestrutura	Positivo	Linha de apoio 10
Amostra 02 - Bloco	Infraestrutura	Positivo	Linha de apoio 08

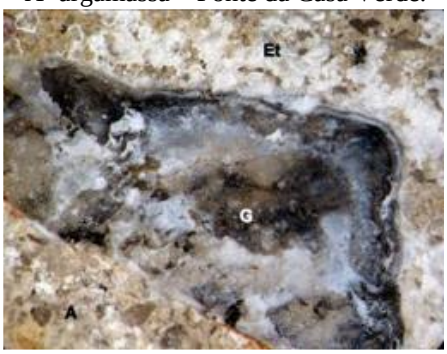
Fonte: Autoras (2021).

Figura 85 - Aspecto do concreto na Amostra 01 no qual se observa massas brancas amorfas (gel) que se desenvolvem no contrato da argamassa com o agregado graúdo – Ponte da Casa Verde.



Fonte: SIURB (2019).

Figura 86 - Aspecto da amostra 02 no qual se observa material branco (gel) depositado sobre a superfície de quebra do agregado (G), borda de reação e a formação tufos de etringita (Et). A=argamassa – Ponte da Casa Verde.



Fonte: SIURB (2019).

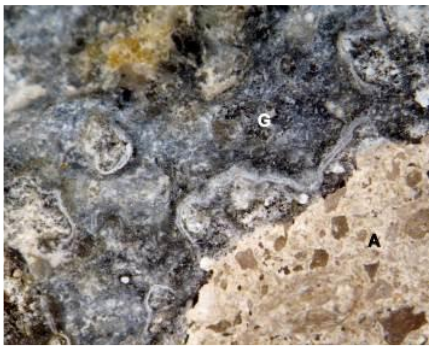
Como na Casa Verde, na Ponte das Bandeiras a presença de RAA na borda de reação e nos poros preenchidos são presentes, raras e mal definida na borda, como exposto nas Figura 87 e Figura 88.

Tabela 20 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte das Bandeiras.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Amostra 01 - Bloco	Infraestrutura	Positivo	Lado M.N./M.L.
Amostra 03 - Bloco	Infraestrutura	Positivo	Lado M.S./M.O.

Fonte: Autoras (2021).

Figura 87 - Aspecto do concreto na Amostra 01 no qual se observa o gel de aspecto leitoso recobrindo a superfície de descolamento do agregado graúdo (G). A=argamassa– Ponte das Bandeiras.



Fonte: SIURB (2020).

Figura 88 - Aspecto da amostra 03 no qual se observa material branco (possível gel) depositado sobre a superfície de quebra do agregado (G). A=argamassa – Ponte das Bandeiras.

Fonte: SIURB (2020).

Já na Ponte Presidente Jânio Quadros o ensaio foi realizado na superestrutura e na mesoestrutura, apresentando características gerais como coloração da argamassa na maioria das amostras na cor bege, exceto na alma externa 5 e 8 apresentando coloração cinza, presença de macrofissuras ou segregação da pasta somente nas amostras dos apoios 3 e 5 e na alma externa 1 e microfissuras na interface dos apoios 3 e 9 e na alma externa 1. Com relação ao resultado de RAA, das oitos amostras ensaiadas, cinco apresentaram resultado positivo, duas negativo e uma incipiente (Tabela 21).

Tabela 21 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Presidente Jânio Quadros.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Apoio 3	Mesoestrutura	Positivo	Vão 2
Apoio 5	Mesoestrutura	Positivo	Vão 3
Alma externa 5	Superestrutura	Negativo	Vão 4
Alma externa 1	Superestrutura	Incipiente	Vão 4
Alma externa 4	Superestrutura	Negativo	Vão 4
Alma externa 8	Superestrutura	Positivo	Vão 4
Apoio 8	Mesoestrutura	Positivo	Vão 5
Apoio 9	Mesoestrutura	Positivo	Vão 6

Fonte: Autoras (2021).

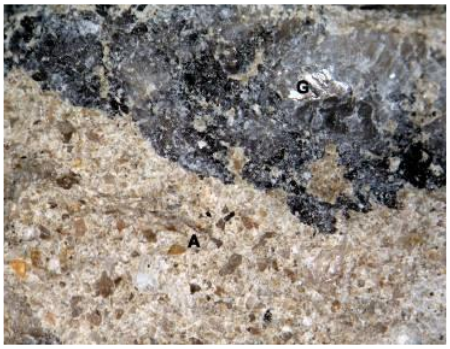
No caso da Ponte Presidente Dutra o resultado de reatividade, não foi observada nas bordas de reação, poros preenchidos e microfissuras, porém é válido ressaltar que, a presença de reação só é possível observar de forma bem localizada com uma formação de fina película de material, visível apenas com uma ampliação do microscópio de luz transmitida de 50 vezes (Figura 90), como teor comparação, nas OAEs anteriores a ampliação é de 6 vezes (Figura 84). Os aspectos gerais da análise da amostra de concreto apresentaram uma argamassa com a coloração cinza clara, distribuição dos constituintes normal, aderência argamassa/agregado graúdo com um descolamento normal e moderado, pouco porosa com poros submilimétricos, compacidade compacta, bem adensado com poucos vazios e sem faturamentos.

Tabela 22 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Presidente Dutra.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Bloco 1	Infraestrutura	Negativa	Localizado

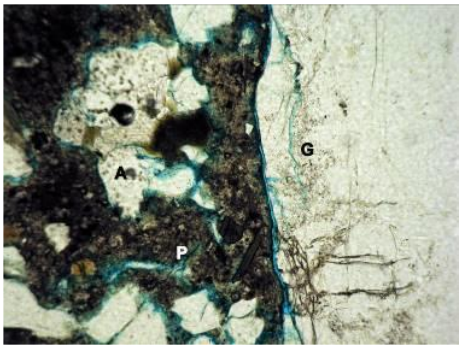
Fonte: Autoras (2021).

Figura 89 - Aspecto do concreto no qual se observa o contato entre o agregado graúdo (G) e a argamassa sem evidências de reação álcali agregado. A=argamassa – Ponte Presidente Dutra.



Fonte: SIURB (2020).

Figura 90 – Detalhe do concreto no qual se observa o contato entre o agregado graúdo (G) e a pasta (P). – Ponte Presidente Dutra.



Fonte: SIURB (2020).

Sendo a única obra a verificar o RAA de acordo com estudos petrográficos, as amostras da Ponte Tatuapé apresentaram como principal mineralogia o quartzo, feldspatos e biotila, coloração cinza com faixas claras e escuras, uma estrutura levemente foliada, granulação inequigranular média e fina e microfissuração fraca. Neste caso, a reatividade está relacionada à presença de quartzo microcristalino e a deformação dos agregados graúdos, que favorecem a ocorrência da reação.

Tabela 23 – Reatividade Álcali-Agregado - Ponte Tatuapé.

Elemento	Trecho	Resultado	Observação
Bloco	Infraestrutura	Positivo	Linha de apoio 06
Pilar	Mesoestrutura	Positivo	Linha de apoio 08

Fonte: Autoras (2021).

4.2.2. Teor de íons cloreto

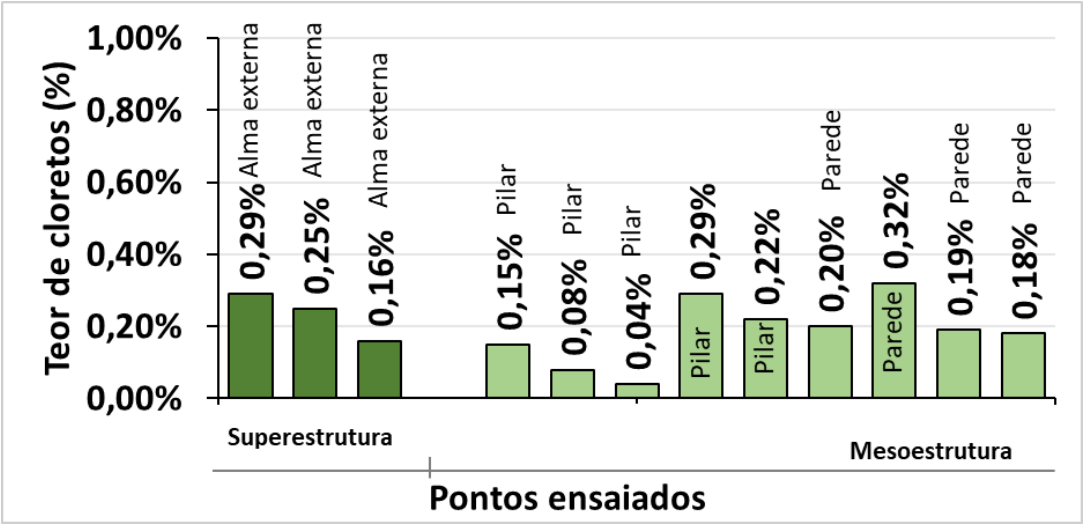
O valor limite a ser aceito na estrutura para íons cloreto (item 3.3.2) equivale a 0,0035% para resultados expressos sobre a massa de concreto e a 0,30% para resultados sobre a massa de cimento. Os valores a serem analisados se encontram da Figura 91 à Figura 94.

Na Ponte da Casa Verde, obteve-se um ponto acima do limite aceitável (0,32%) estando localizado na mesoestrutura (Figura 91). Com a análise da Ponte das Bandeiras (Figura 92) é possível verificar que em um dos arcos o limite de aceitação deste teor é excedido além do determinado, resultando em 0,70%.

Em contra partida com as OAEs citadas anteriormente, a Ponte Presidente Dutra (Figura 93) e a Ponte Tatuapé (Figura 94), não excederam os índices de cloreto nos elementos da mesoestrutura, trecho este em que o ensaio foi realizado. Na Ponte Freguesia do Ó não foram

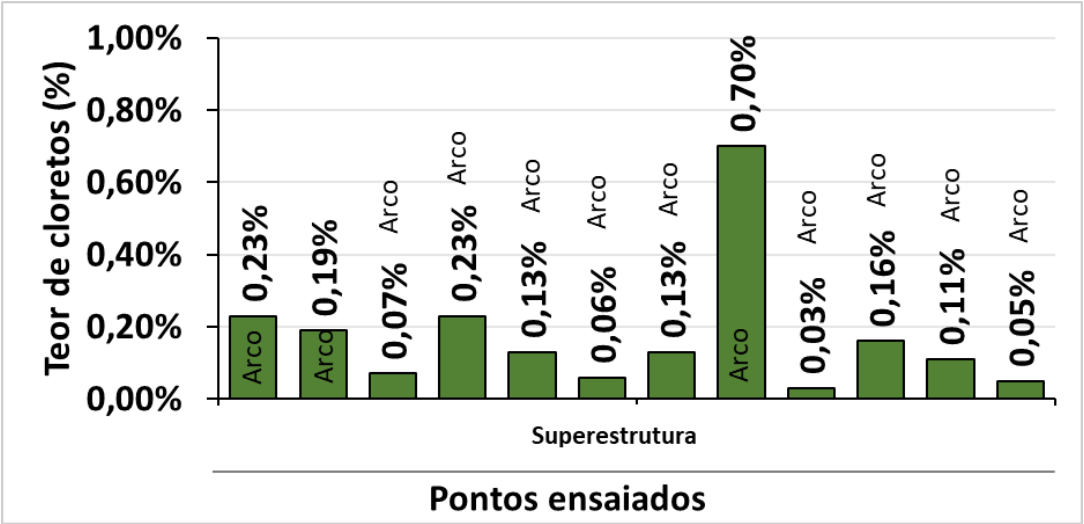
detectados íons cloreto no ensaio realizado.

Figura 91 - Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte da Casa Verde.



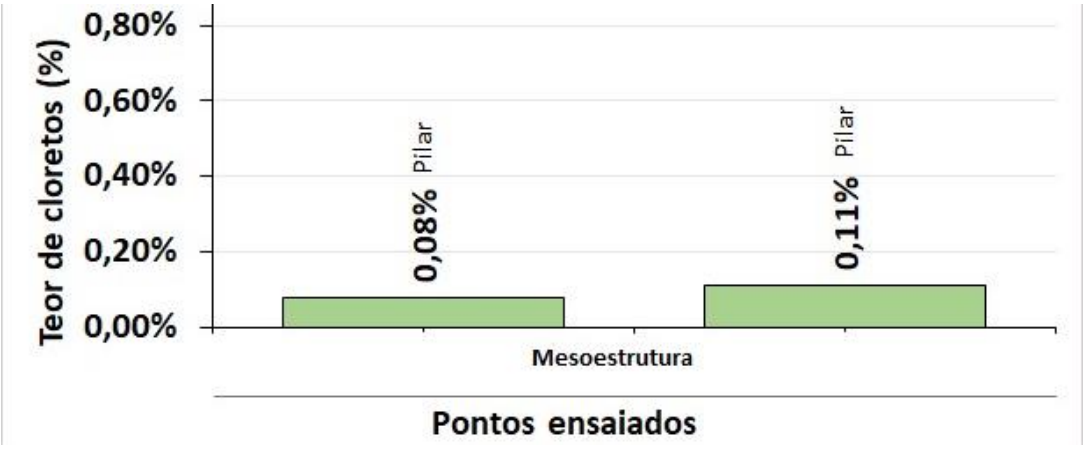
Fonte: Autoras (2021).

Figura 92 - Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte dos Bandeiras.



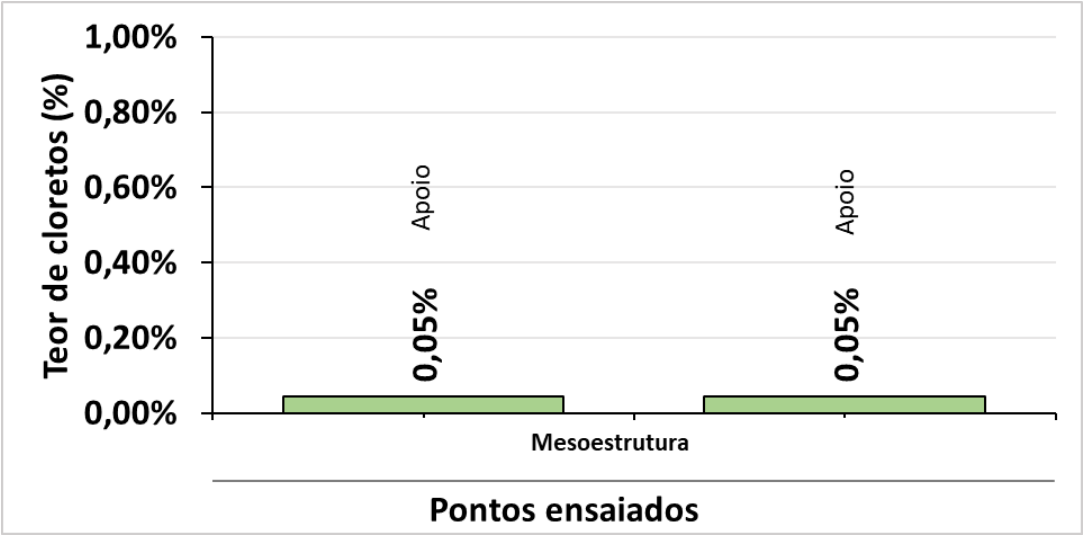
Fonte: Autoras (2021).

Figura 93 – Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte Presidente Dutra.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 94 – Teor de íons cloreto sobre a massa de cimento (%) - Ponte Tatuapé.



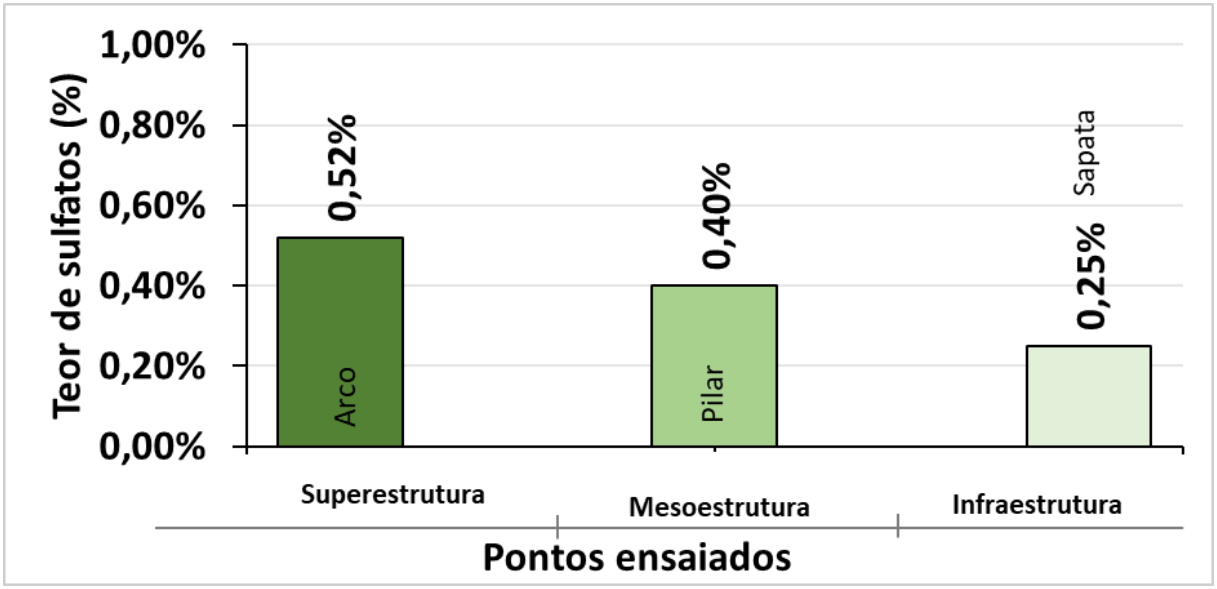
Fonte: Autoras (2021).

4.2.3. Teor de íons sulfato

O teor limite de íons sulfatos (item 3.3.3) equivale a 4,5% referente a valores sobre a massa de cimento e de 0,63% em relação à massa de concreto.

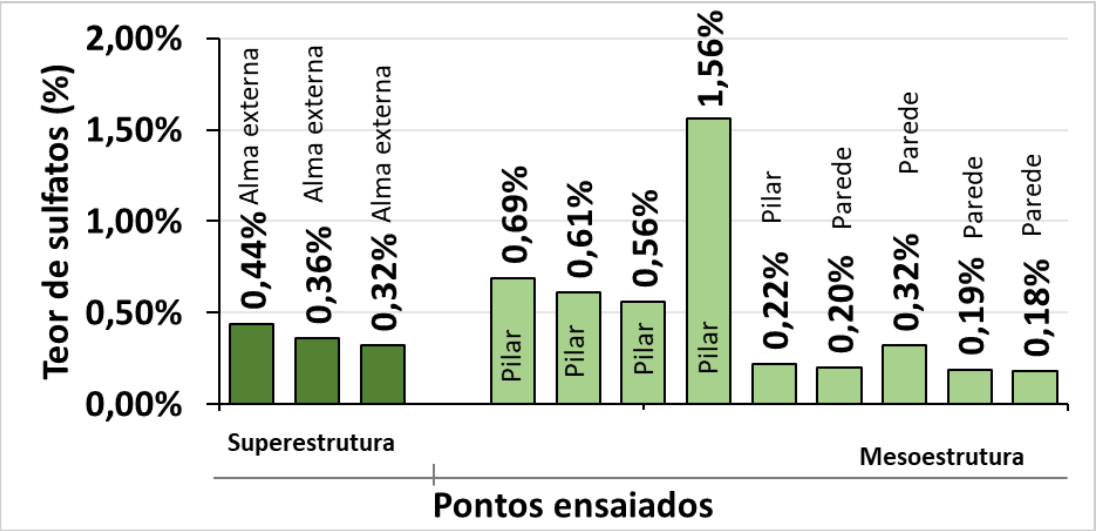
Analisando os teores explícitos da Figura 95 à Figura 100 todos os pontos dos trechos estruturais ensaiados apresentaram íons sulfato, porém se encontram dentro dos limites determinados. Apesar da poluição existente nas águas do Rio Tietê, onde se localizam as obras, o concreto ensaiado demonstra suficiente resistência aos sulfatos advindos dos esgotos.

Figura 95 – Teor de íons sulfato sobre a massa de concreto (%) - Ponte Freguesia do Ó.



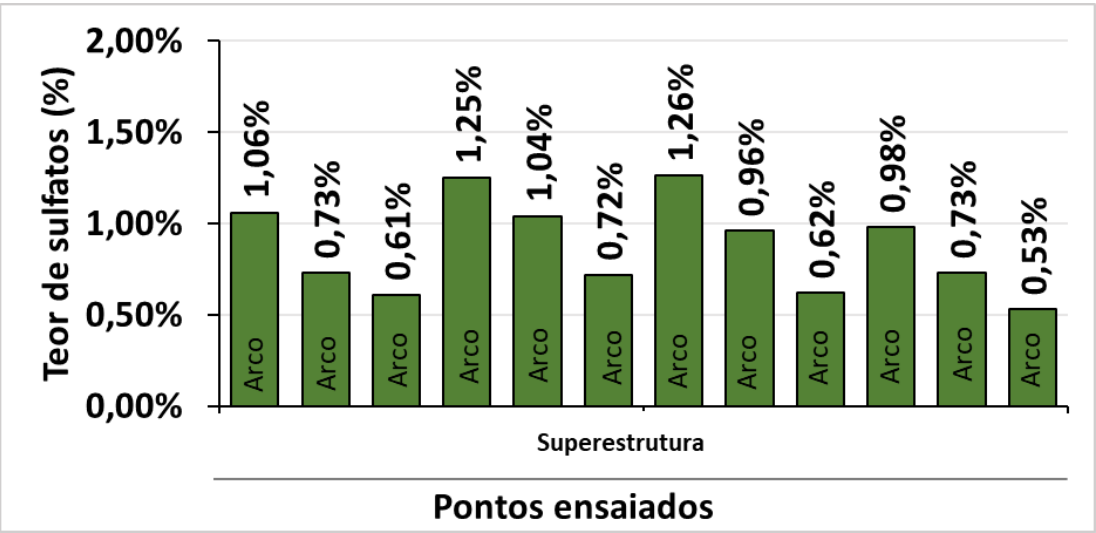
Fonte: Autoras (2021).

Figura 96 - Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte da Casa Verde.



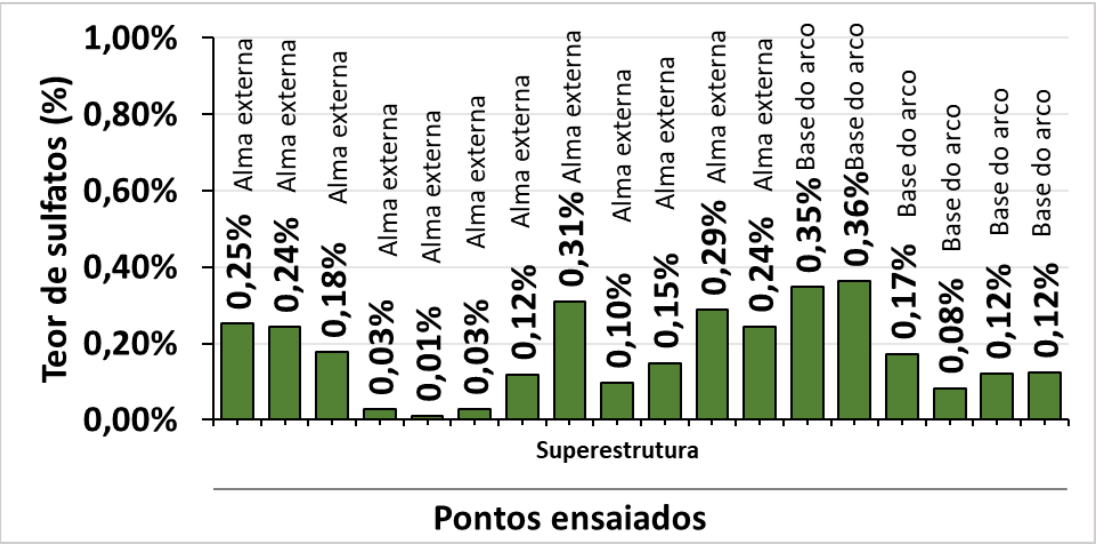
Fonte: Autoras (2021).

Figura 97 – Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte dos Bandeiras.



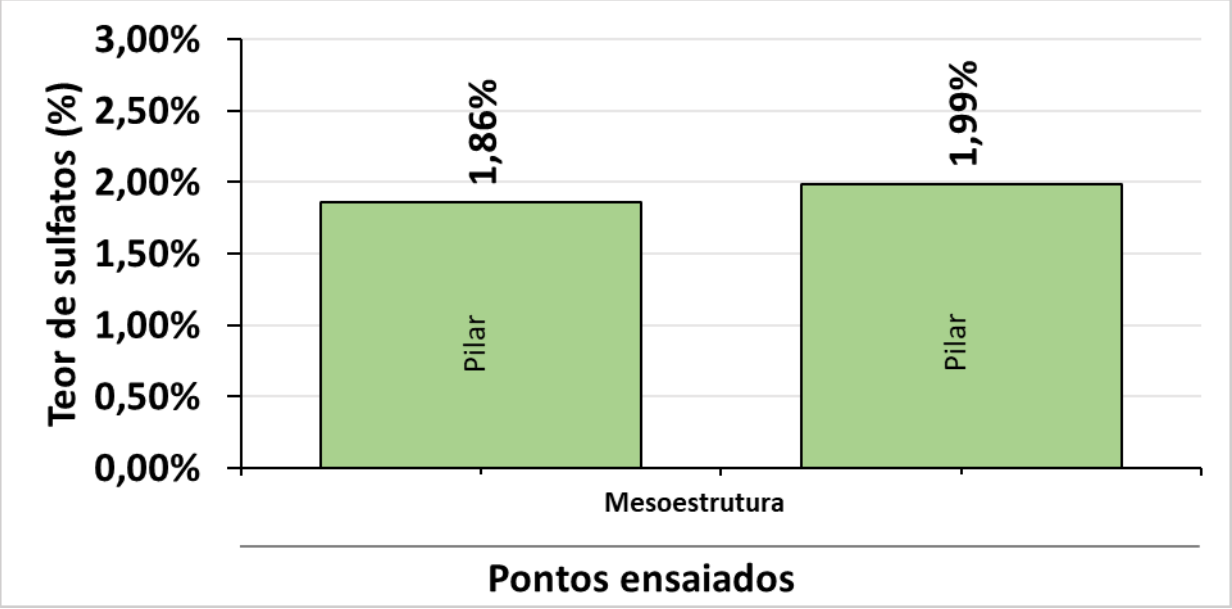
Fonte: Autoras (2021).

Figura 98 - Teor de íons sulfato sobre a massa de concreto (%) - Ponte Presidente Jânio Quadros.



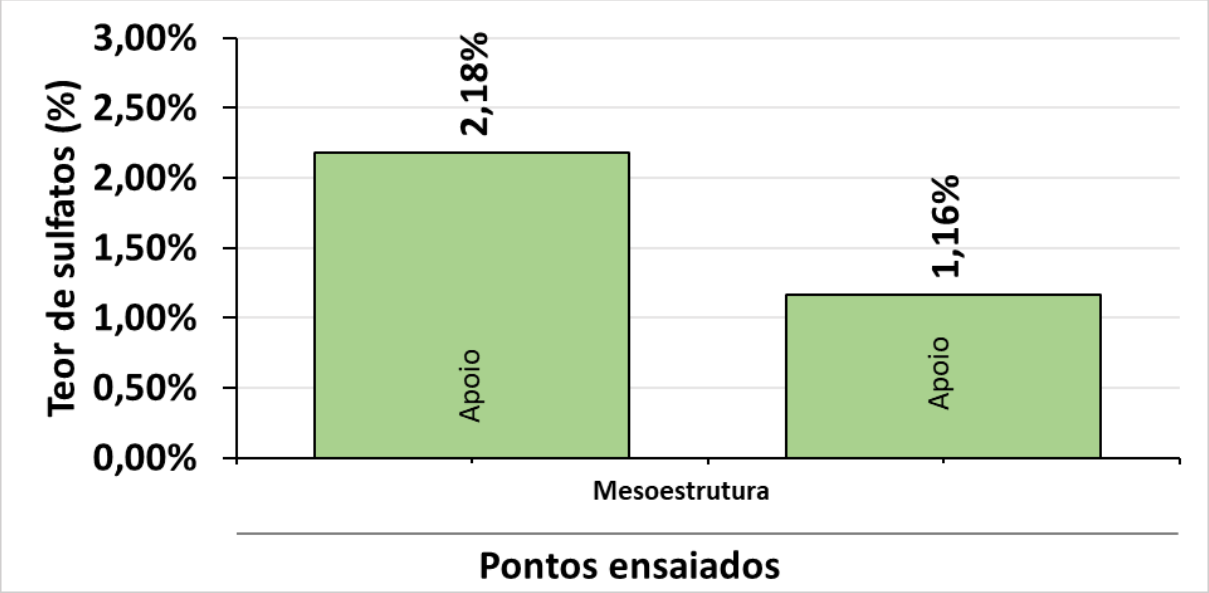
Fonte: Autoras (2021).

Figura 99 – Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte Presidente Dutra.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 100 - Teor de íons sulfato sobre a massa de cimento (%) - Ponte Tatuapé.

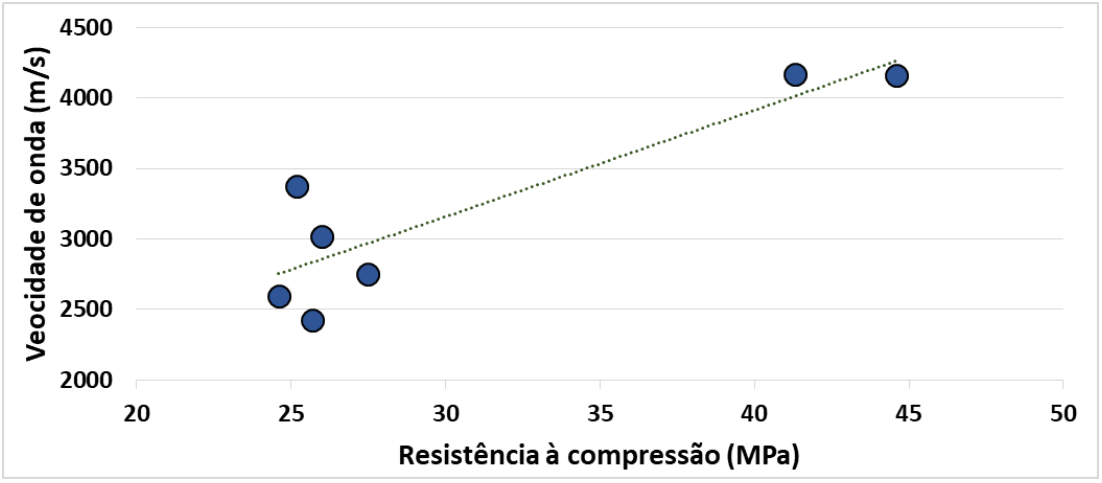


Fonte: Autoras (2021).

4.2.4. Resistência à compressão axial versus Velocidade de ultrassom

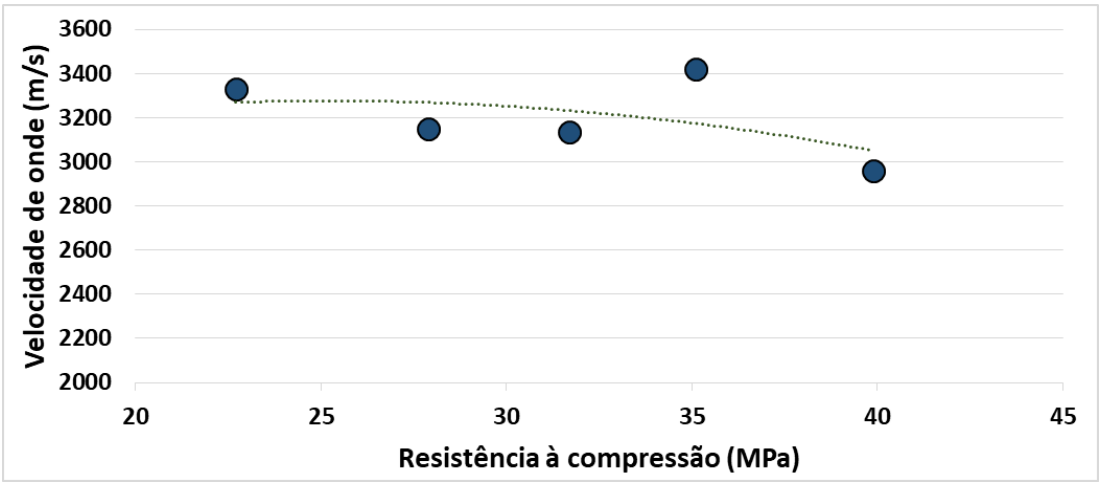
Por meio da análise dos gráficos apresentados na Figura 101 à Figura 104, pode-se notar que, na maioria dos casos, a relação entre o fck e a velocidade de propagação de ondas de ultrassom é diretamente proporcional. Na Ponte Presidente Jânio Quadros, a grande variação de resultados de ultrassom, que indica má execução e baixa uniformidade do concreto, prejudica a tendência; ainda assim não se deixa de notar a evidente relação.

Figura 101 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte da Casa Verde.



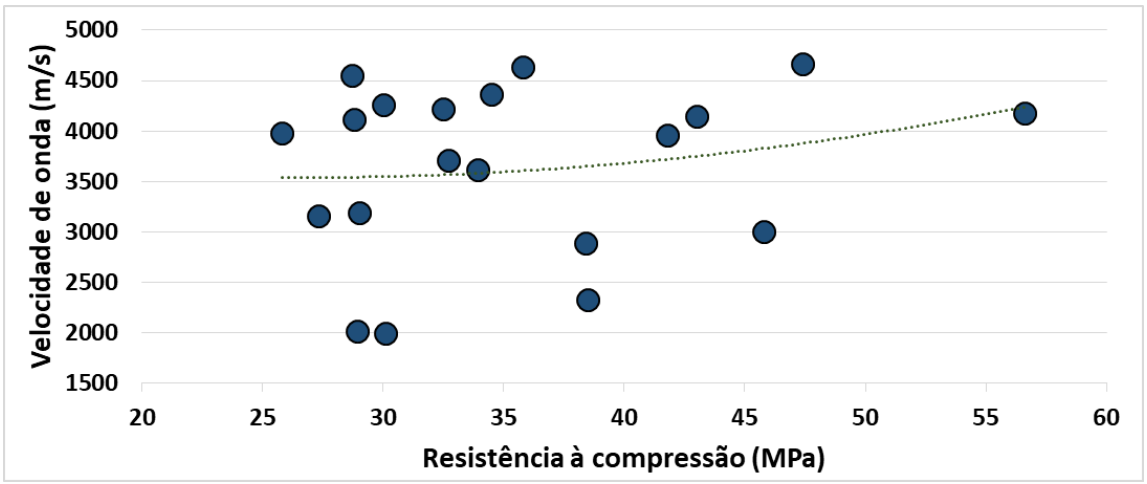
Fonte: Autoras (2021).

Figura 102 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte das Bandeiras.



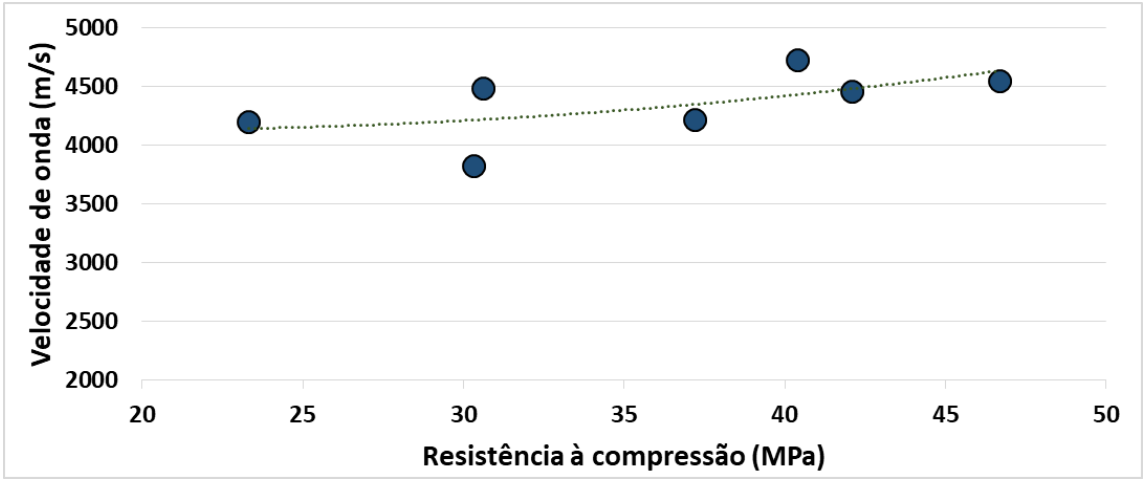
Fonte: Autoras (2021).

Figura 103 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte Presidente Jânio Quadros.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 104 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da resistência à compressão axial - Ponte Presidente Tatuapé.

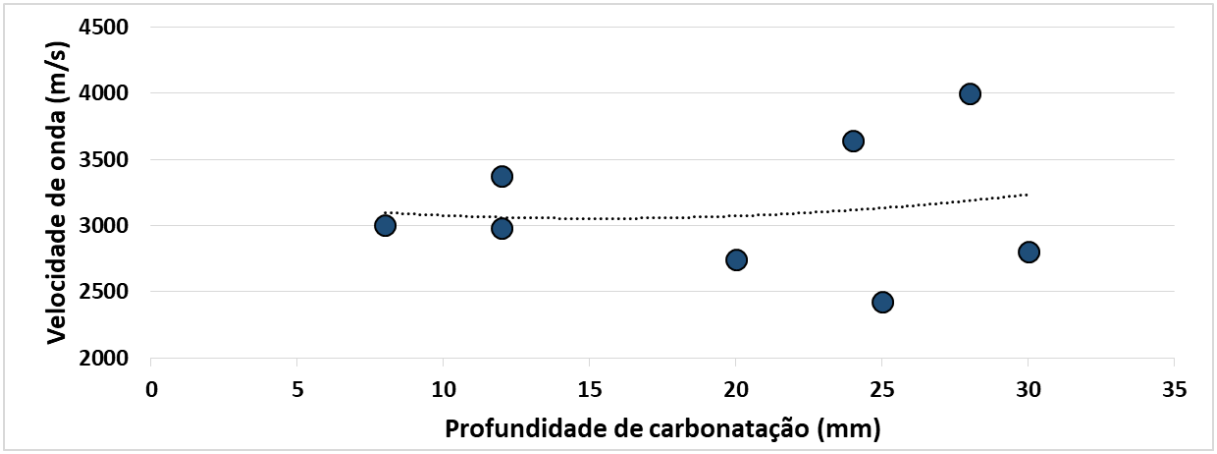


Fonte: Autoras (2021).

4.2.5. Profundidade de carbonatação versus Velocidade de ultrassom

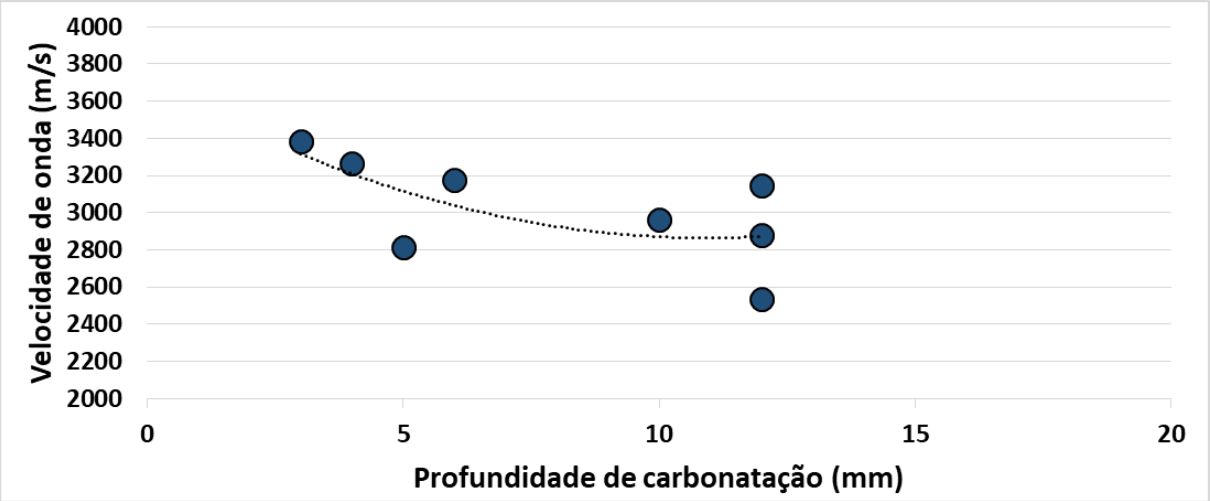
Com base nos gráficos da Figura 105 à Figura 107, é possível notar, principalmente na Ponte das Bandeiras (Figura 106) uma leve tendência inversamente proporcional, de forma que para menores velocidades de ultrassom são obtidas maiores profundidades de carbonatação. Isto pode significar que quanto menor a qualidade do concreto, maior a facilidade de penetração e difusão do dióxido de carbono (CO_2). Foi notada, porém, uma leve ascensão da curva para profundidades muito altas, possivelmente devida a outros fatores como a exposição destes elementos ao ambiente.

Figura 105 - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte da Casa Verde.



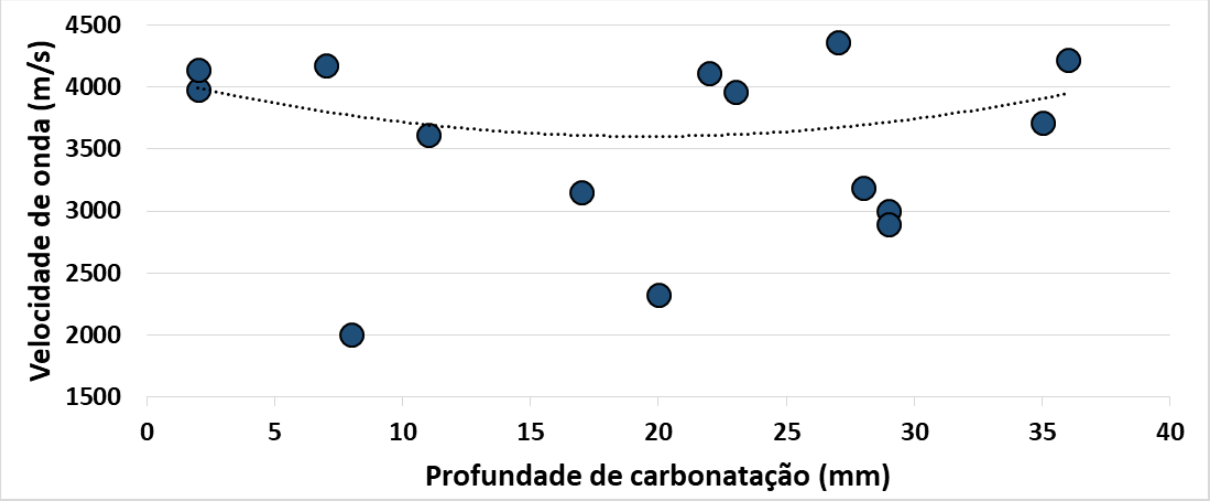
Fonte: Autoras (2021).

Figura 106 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte das Bandeiras.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 107 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Jânio Quadros.

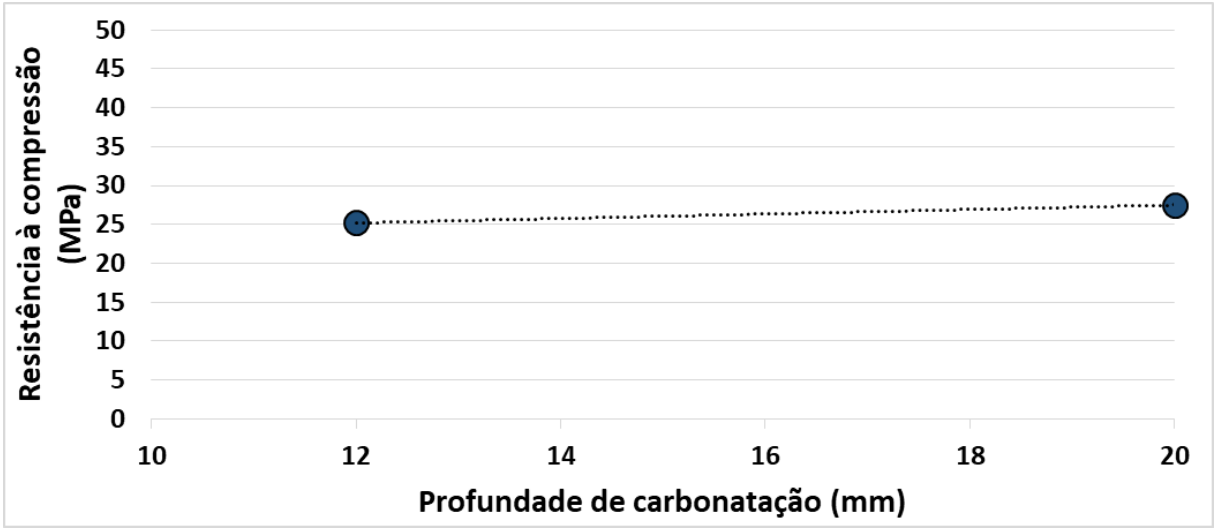


Fonte: Autoras (2021).

4.2.6. Profundidade de carbonatação versus Resistência à compressão axial

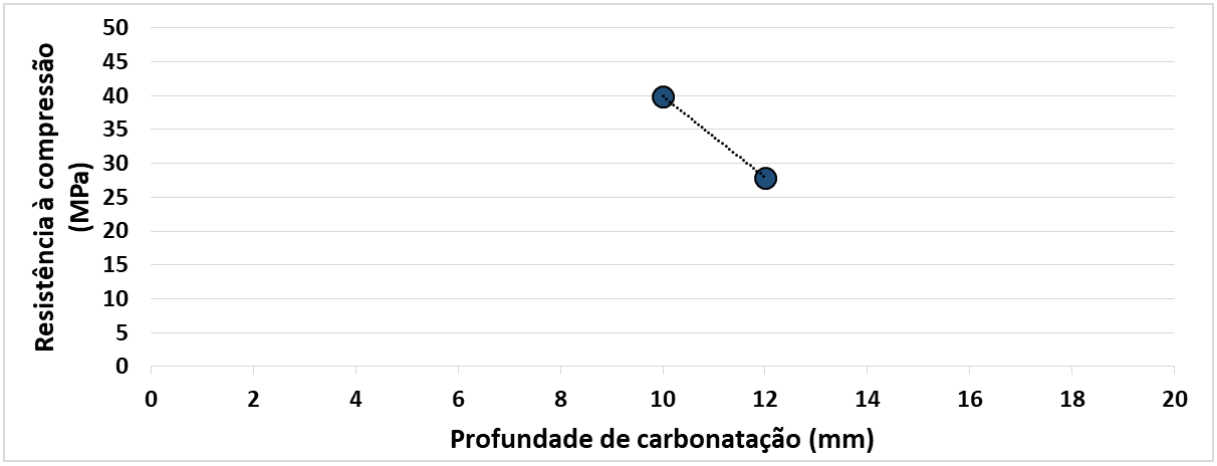
Para os gráficos apresentados na Figura 108 à Figura 112 não foi possível obter uma relação clara, possivelmente devido ao reduzido número de pontos obtidos. Na Ponte Presidente Jânio Quadros, porém, a tendência aparenta constância, devido à grande variação nos valores de fck obtidos para a obra. Esta estrutura também possui espessas camadas de revestimento, o que pode ter levado aos inconclusivos resultados alcançados.

Figura 108 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte da Casa Verde.



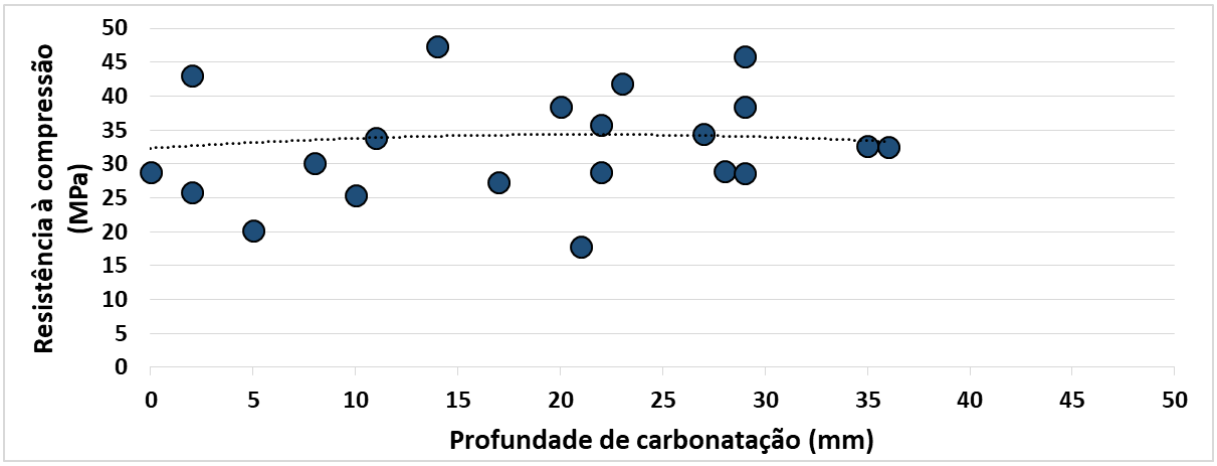
Fonte: Autoras (2021).

Figura 109 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte das Bandeiras.



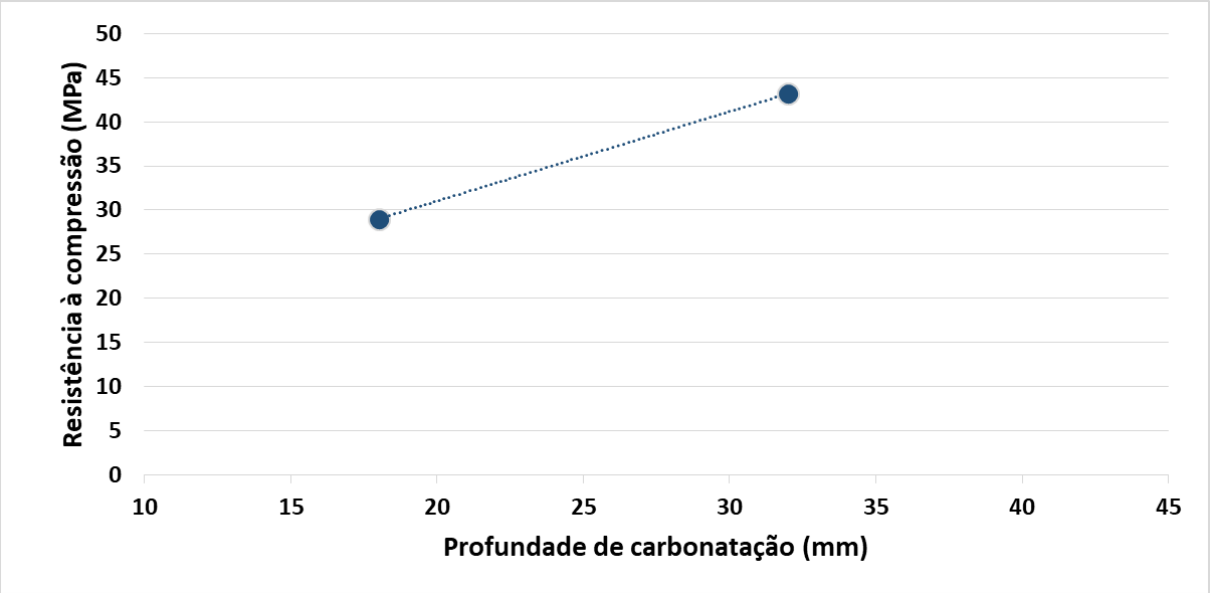
Fonte: Autoras (2021).

Figura 110 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Jânio Quadros.



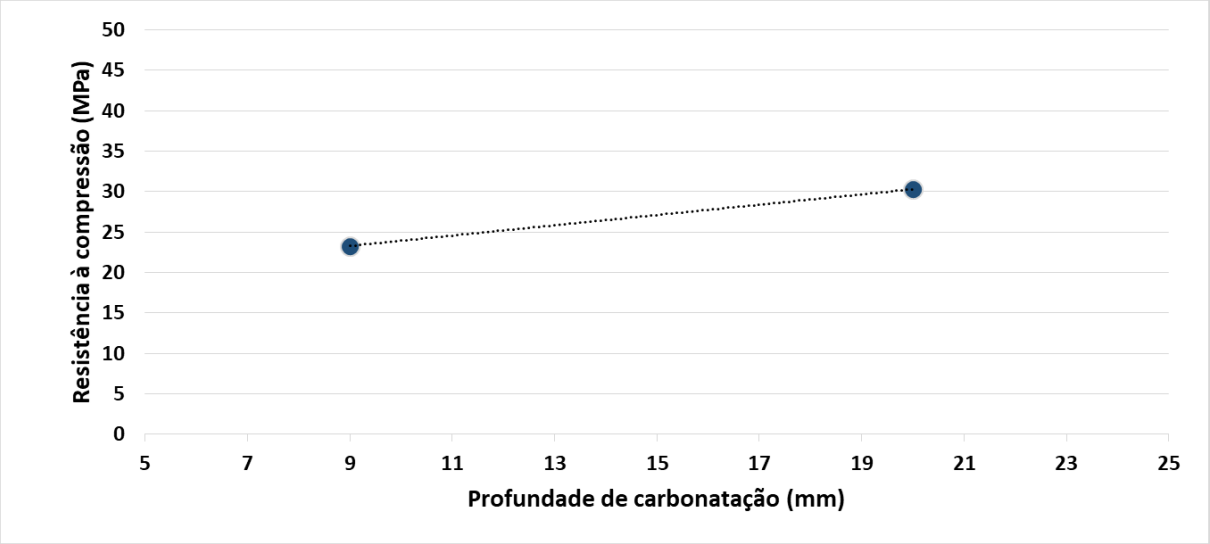
Fonte: Autoras (2021).

Figura 111 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Presidente Dutra.



Fonte: Autoras (2021).

Figura 112 – Resistência à compressão axial em função da profundidade de carbonatação - Ponte Tatuapé



Fonte: Autoras (2021).

4.3. Determinação da vida útil estimada através dos resultados de profundidade de carbonatação máxima da estrutura

A Tabela 24 a seguir apresenta o número de pontos com a vida útil calculada, bem como os descartados em função do critério em que se enquadram.

Tabela 24 – Número de pontos descartados e aceitos para a previsão da VUE.

Critérios	Ponte Freguesia do Ó	Ponte da Casa Verde	Ponte das Bandeiras	Ponte Pres. Jânio Quadros	Ponte Pres. Dutra	Ponte Tatuapé
Aceitos	6	7	7	3	14	6
Despassivados	9	5	13	-	1	-
Cobrimento apenas com argamassa de reparo	-	-	-	17	-	-
Carbonatação atingindo apenas o revestimento	-	-	-	1	-	-
Elementos reforçados	-	-	-	-	-	1
Profundidade de carbonatação não identificada	-	-	-	2	-	-
Ensaio localizado na infraestrutura	-	-	-	-	1	-

Fonte: Autoras (2021).

A Tabela 25 apresenta os resultados dos pontos mais e menos favoráveis da vida útil estimada para cada método aplicado às obras estudadas, destacando-se o valor determinante em negrito. Os valores obtidos têm como base a Equação 5 para o método Tuutti e a Equação 7 para o método Possan, conforme explicitado no item 3. Metodologia. Os dados e resultados completos encontram-se nos apêndices A a F.

Tabela 25 – Vida útil estimada para as pontes sobre a Marginal Tietê.

Obra	Pt.	Elemento	Cob (mm)	Carb (%)[1]	Fck (Mpa)	Inaug	Idade (anos)[2]	VUE (anos)	
								Tuutti	Possan
Ponte Freguesia do Ó	3	Laje	21	61,9	37,0	2010	9	**3,41**	30,15
	12	Pilar	15	66,7	30,0	1956	53	15,75	**5,80**
	15	Pilar-parede	52	51,9	21,0	1956	53	**54,01**	**43,40**

(Continua)

[1] A coluna Carb(%) se refere à porcentagem do cobrimento do concreto já atingido pela carbonatação, representada pela divisão do valor da profundidade carbonatada pela espessura de cobrimento.
[2] A idade das obras, bem como os dados coletados, se referem ao ano de 2019.

(Término)

Obra	Pt.	Elemento	Cob (mm)	Carb (%)[3]	Fck (Mpa)	Inaug	Idade (anos)[4]	VUE (anos)	
								Tuutti	Possan
Ponte da Casa Verde	1	Viga longarina	36	19,4	41,3	2010	9	154,47	**574,23**
	2	Viga longarina	20	60,0	25,2	1954	55	**28,89**	**8,24**
	7	Pilar	39	12,8	35,0	2010	9	**416,16**	451,49
Ponte das Bandeiras	3	Viga longarina	44	22,7	39,9	1942	67	**890,12**	**702,62**
	18	Parede	48	83,3	35,0	2010	9	**0,36**	25,00
	20	Viga travessa	11	45,5	22,7	2010	9	12,96	**3,25**
Ponte Pres. Jânio Quadros	12	Viga longarina	22	70,7	38,4	1956	53	**90,72**	**76,91**
	13	Viga longarina	26	62,1	32,5	1956	53	**1905,75**	**147,18**
Ponte Pres. Dutra	2	Laje inferior	65	41,5	54,1	2010	9	17,83	**2449,31**
	3	Laje inferior	26	65,4	28	2010	9	2,52	**14,89**
	8	Pilar	50	70,0	29	2010	9	**1,65**	46,56
	12	Pilar	55	25,5	29	2010	9	**77,19**	347,82
Ponte Tatuapé	5	Pilar	35	57,1	30,3	1975	34	**24,75**	**53,99**
	6	Pilar	72	18,1	20	1975	34	**906,30**	**204,91**

Fonte: Autoras (2021).

Pelos resultados apresentados na Tabela 25 é possível perceber que o modelo de Possan retorna valores mais altos de vida útil para as obras mais novas, em concordância com o método aplicado, pois este considera principalmente, além de outros fatores, o fck do concreto, que, em projeto, as estruturas novas costumam ter maior que as antigas. A espessura de cobrimento mais alta, típica das normas recentes, também colabora para este resultado.

Algo não considerado pelo método de Possan, mas que acaba sendo incluído por Tuutti é a qualidade do concreto. Analisando os resultados dos ensaios de ultrassom, verificou-se que o concreto estudado possui qualidade variável de acordo com o elemento em questão, o que pode diminuir muito a vida útil real de uma estrutura. Este aparenta ser o caso do ponto 18 da Ponte das Bandeiras, onde a média de velocidade de propagação do ensaio de ultrassom para o elemento estrutural foi de 2709 m/s, representando um concreto de qualidade ruim de acordo com a Tabela 9. Neste ponto, o valor para Tuutti foi quase 65 vezes menor que o valor para Possan, variação que pode ser explicada pela má qualidade do concreto empregado.

[3] A coluna Carb(%) se refere à porcentagem do cobrimento do concreto já atingido pela carbonatação, representada pela divisão do valor da profundidade carbonatada pela espessura de cobrimento.
[4] A idade das obras, bem como os dados coletados, se referem ao ano de 2019.

O método de Tuutti resultou em vida útil mais alta para as obras mais antigas, o que é esperado visto que é um método que considera o tempo já passado e, uma vez que o concreto destes pontos continua são após tantos anos, seu k_e (Coeficiente de difusividade do CO_2 estimado) se torna bastante alto, elevando também a estimativa de vida útil. Também por considerar o que já ocorreu na obra para estimar o que virá nos próximos anos, Tuutti acaba por incluir em sua estimativa teores de CO_2 que já não são reais para a situação atual, visto que boa parte das obras estudadas foi construída antes mesmo da Marginal Tietê existir.

Pode-se notar também que alguns dos pontos receberam valores de VUE altíssimos, que aparentam estar bastante fora da curva natural de degradação do concreto vista usualmente. Isto pode ocorrer por alguns fatores como: grandes espessuras de cobrimento, alta resistência do concreto à compressão e possíveis reformas ou revestimento de reparo dos quais não se tem conhecimento. Neste caso, os reparos teriam idades e características desconhecidas e diferentes das utilizadas para cálculo, adulterando os resultados. Outro ponto que pode interferir nos resultados é a possibilidade de o elemento estudado estar mais protegido das emissões de CO_2, seja por se encontrar em partes internas da estrutura ou em região mais afastada do tráfego, como sobre o rio. A exposição à chuva pode também interferir, visto que o modelo de Possan considera este um fator que torna o concreto menos suscetível à penetração da carbonatação.

Especificamente na Ponte Pres. Jânio Quadros, o relatório de patologia no qual se baseia este estudo cita a presença de uma espessa camada de revestimento na superfície dos elementos estruturais, com espessuras de 3 a 10cm. Apesar de terem sido considerados nos cálculos apenas os pontos onde a carbonatação já atingiu o concreto para além do revestimento, este reparo representa uma proteção a mais, que pode ter feito com que a vida útil resultante fosse maior que o esperado.

De modo geral, as obras apresentam VUE mínima de 0,36 a 76,91 anos, independentemente do método aplicado. Desta forma, já na inspeção realizada em 2019 deveriam ter sido previstos serviços de manutenção preventiva para evitar que a carbonatação chegasse às armaduras, uma vez que a próxima inspeção especial só deverá ser realizada em 5 ou 8 anos, a depender da classificação obtida pela obra (NBR 9452, 2019).

Com exceção das pontes Pres. Jânio Quadros e Tatuapé, todas as demais possuem ao menos um ponto onde as armaduras já estão despassivadas, ou seja, desprotegidas da ação da corrosão. Isto não significa que estas obras devem ser condenadas ou que sua segurança esteja em risco, mas apenas que estas armaduras devem ser tratadas ou substituídas onde necessário e

o concreto realcalinizado para que seja restaurado seu pH protetivo.

Os resultados apresentados demonstram a aplicabilidade dos modelos estudados, dadas as ressalvas citadas. Para maior precisão dos cálculos seria necessário possuir maiores informações, como o tipo de cimento efetivamente empregado e o teor de adição pozolânica utilizado, caso tenha sido. Apesar destas questões, os métodos ainda se demonstram bastante úteis e de simples aplicação até mesmo para inspeções mais simples que as estudadas, com menor número de ensaios, uma vez que apenas o ensaio de carbonatação, resistência à compressão e informações sobre o histórico da obra são suficientes para realizar a previsão da VUE.

A utilização do método se mostra útil não só para programar o período de manutenção preventiva, mas também para determinar a região de aplicação do reparo, seja por elemento, vão ou trecho estrutural. No caso de serem utilizados os modelos de previsão da VUE para programação de manutenções, não há prejuízo ou risco à manutenção devido à possível falta de precisão dos cálculos, como nos casos em que a vida útil retornou valor muito alto, pois o intervalo máximo entre inspeções (5 a 8 anos) permitirá a avaliação contínua da situação do concreto de cobrimento.

5. Conclusões

Por meio da análise de resultados apresentados no presente trabalho de pesquisa, é possível concluir que as OAEs sobre a Marginal Tietê, em sua maioria, necessitavam de intervenção com urgência, visto que foram observadas até mesmo cordoalhas de protensão rompidas (Ponte Tatuapé). Não foi possível determinar se estas intervenções já foram realizadas no período decorrido desde as inspeções, realizadas em 2019 e 2020.

Com relação aos ensaios de ultrassom, resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação e espessura de cobrimento, foram observados resultados muito variados para uma mesma obra; o que leva a crer que houve má execução ou controle de qualidade, ou até mesmo que os efeitos do tempo e degradação atingiram os trechos das OAEs de formas diferentes, seja por condições de exposição, possíveis manutenções das quais não se tem conhecimento ou outras razões desconhecidas.

Os valores de ultrassom apresentaram, em média, concretos de qualidades boa e regular, apesar de haver quantidade considerável de pontos com classificação ruim. Este é um resultado que gera alerta do ponto de vista de manutenções, pois se trata de um concreto que permite maior exposição das armaduras à ação de agentes agressivos e da corrosão.

Para os ensaios de presença de contaminação química, onde foram realizados nenhuma das obras apresentou contaminação por sulfatos, embora metade delas tenham valores acima do limite especificado em norma para íons cloreto. Em relação à reação álcali-agregado, foi identificada presença de reatividade em todas as obras com exceção da Ponte Presidente Dutra, na qual o resultado foi negativo.

A Vida Útil Estimada, determinada através dos métodos de Tuutti (1982) e Possan (2010), resultou em valores mínimos de 0,36 a 76,91 anos, de forma que para parte das obras já deveria ter sido prevista manutenção preventiva para evitar a proliferação desta contaminação química por todo o cobrimento do concreto. Apenas a Ponte Presidente Dutra e a Ponte Tatuapé não apresentaram nenhum ponto onde as armaduras já estão despassivadas; para as demais a terapia proposta já deveria também prever o tratamento de armaduras e realcalinização do concreto nestes pontos e em quais mais se julgasse necessário.

De modo geral, a previsão de vida útil pelos métodos escolhidos se mostrou possível e aplicável para auxílio dos patólogos na definição de manutenções preventivas e corretivas, bem como seu período e local de aplicação, podendo ser realizadas apenas nos pontos que apresentarem menor VUE, conforme análise técnica.

Para melhor aplicação dos métodos às inspeções efetivas, existem algumas considerações que podem tornar os resultados mais precisos. Para o modelo de Tuutti, entende-se que quanto mais recentes os dados utilizados para determinação do k_e, maior a precisão, pois os teores de CO_2 e a situação atual do concreto estudado estarão aplicados. Desta forma, valendo-se do fato de que as inspeções devem ser realizadas a cada 5 ou 8 anos, é de interesse que sempre sejam utilizados os valores da carbonatação ocorrida entre este período. O registro de inspeções e reparos, além de informações sobre os métodos executivos e materiais, especialmente para o modelo de Possan, também poderiam auxiliar no aprimoramento dos resultados encontrados.

Como um todo, apesar de terem sido escolhidos modelos de previsão que consideram apenas a carbonatação do concreto, este trabalho demonstrou a inúmera quantidade de fatores que influenciam a vida útil de uma obra de arte, de modo a ressaltar a importância da evolução das inspeções e dos estudos de patologia em conjunto com os métodos construtivos; de forma que não só se construam boas obras, mas que se faça perdurar as que, como sociedade, já realizamos.

Referências

AGUIAR, José Eduardo; GOMES, Abdias M.; DA SILVA, Turibio J. **A PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DA 3ª PONTE DE VITÓRIA**. [S. l.]: 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R**: Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1152/C1218M**: Standart Test Method for Water-Souble Chloride in Mortar and Concrete. [S.l.], 2015.

ANDRADE. C. ALCONPAT: Modelando a corrosão da armadura e estado limite de deterioração. Mérida, 30 abr. 2020. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/download/478/740/>. Acesso em: 01 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NB-1**: Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1940.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NB-1**: Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7680**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15577-1**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15577-3**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BRANCO, Fernando; PAULO, Pedro; GARRIDO, Mário. ALCONPAT: Vida Útil en la Construcción Civil. Mérida, mar. 2013. Disponível em: <http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B4-Vida-%C3%9Atil-na-Constru%C3%A7%C3%A3o-Civil.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2021.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DIRETORIA GERAL. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **Manual de manutenção de obras de arte especiais – OAEs**. 1ª ed. Brasília D.F. – 2016.

BRITISH STANDARS INSTITUTION. **BS EN 14630**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Brussels, 2006.

BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

CETESB: Sistema de Informação de Qualidade do Ar. São Paulo, 2019. Disponível em: <CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo>. Acesso em: 16 out. 2021.

CONCRETO & CONSTRUÇÕES. Ibracon. São Paulo, mar. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 010**: Inpeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

ESTADÃO: Como era São Paulo sem a Marginal do Tietê. São Paulo, 04 mar. 2013. Disponível em: <https://acervo.estadao.com.br/noticias/acervo,como-era-sao-paulo-sem-a-marginal-do-tiete,8928,0.htm>. Acesso em: 01 ago. 2021.

HELENE, Paulo. **Manual para preparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13283**: General principles on the design of structures for durability. [S. l.]: ISO, 2008.

MEDINA, Anaine Shirley Lopes. **Ensaios em pontes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

MITRE, Marcos Pedrosa. **METODOLOGIA PARA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE PONTES E VIADUTOS DE CONCRETO**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Model for Prediction ff Reinforced Concrete Service Life Based on Eletrical Resistivity. [S. l.]: Ibracon, v. 1, n. 1, dez. 2005. Disponível em: <ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_materiais/V1/2005_0008-01andrade.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2021.

NOAA: Tendência em fócido de carbono atmosférico. São Paulo, 05 out, 2021. Disponível em: < https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>. Acesso em: 01 set. 2021.

PAULETTI, Cristiane. **ESTIMATIVA DA CARBONATAÇÃO NATURAL DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS A PARTIR DE ENSAIOS ACELERADOS E DE MODELOS DE PREDIÇÃO**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PCTE. **Ultrasonic Concrete Testing Equipament**. Disponível em: < https://www.pcte.com.au/pundit-pl-200-ultrasonic-pulse-velocity>. Acesso em: 17 out. 2021.

POSSAN, Edna. **MODELAGEM DA CARBONATAÇÃO E PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EM AMBIENTE URBANO**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). **PREFEITURA COMPLETA NUMERAÇÃO DAS PONTES NAS MARGINAIS: Placas de indentificação melhoram a qualidade da sinalização viária e orientam motoristas paulistanos.** Disponível em: <http://cetsp1.cetsp.com.br/noticias/detalhes/pontes.htm> Acesso em: 10 mar. 2021.

RAMIREZ, Fernando Campo. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas da EESC). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

RILEM. **CPC-18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth. [S.l.], 1988.

SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS E SEMI-DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DE PONTES DE CONCRETO**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

SÃO PAULO IN FOCO: Especial Fotográfico – As Marginais. São Paulo, 10 mar. 2016. Disponível em: <https://www.saopauloinfoco.com.br/especial-marginais/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte da Casa Verde:** Relatório I – Patologia. São Paulo: Engeti Consultoria e Engenharia S/S Ltda, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Relatório Técnico Ponte da Casa Verde:** Relatório II – Verificação analítica estrutural. São Paulo: Engeti Consultoria e Engenharia S/S Ltda, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Serviços de avaliação das condições de segurança da Ponte Presidente Jânio Quadros:** Relatório I – Patologia. São Paulo: Bureau Veritas do Brasil, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Serviços de avaliação das condições de segurança da Ponte Presidente Jânio Quadros:** Relatório de análise estrutural. São Paulo: Bureau Veritas do Brasil, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte Tatuapé:** Relatório de inspeção especial. São Paulo: Ieme Brasil Engenharia Consultiva, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte Tatuapé:** Memória de cálculo – Verificação estrutural. São Paulo: Ieme Brasil Engenharia Consultiva, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Relatório Técnico Ponte Freguesia do Ó:** Relatório I – Patologia. São Paulo: EGT Engenharia, 2020.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Relatório Técnico Ponte Freguesia do Ó:** Relatório II – Verificação estrutural da Ponte Freguesia do Ó para uso atual. São Paulo: EGT Engenharia, 2020.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte das Bandeiras:** Relatório I – Patologia. São Paulo: Egis Engenharia e Consultoria, 2020.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte das Bandeiras:** Relatório II – Verificação estrutural. São Paulo: Egis Engenharia e Consultoria, 2020.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS (SIURB). SPObras. **Inspeção Especial Ponte Presidente Dutra:** Relatório I – Patologia. São Paulo: ECR Engenharia, 2020.

SEI: Portal de Processos. Disponível em: <https://sei.prefeitura.sp.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_processo_exibir.php?XJe606xoyp3QxxkeXOtNa0fx5PPdOBVgkXyyCkRr268Y7xoi5fMBgzr21Gi2DD48HqC6CR8GlHl6lm-9YjSC587--Lkd1GrqmzLCpXrQyZpNnf91aNvE7v5r-N7D4S9i>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SILVESTRO, Laura. **VALIDAÇÃO DE MODELO PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

TUUTTI, Kyosti. Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm, 1982.

VERDERESI, T. B. et al. **ESTUDO DE CASO DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE PONTES E VIADUTOS NA REGIÃO DE CURITIBA PELO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E DO POTENCIAL DE CORROSÃO**. 44ªRAPv-REUNIÃO ANNUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18ºENACOR-ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODODIÁRIA., Foz do Iguaçu, 2015. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_190.pdf>

Apêndices

Apêndice A – Ponte Freguesia do Ó

- Ensaios

Tabela A1 – Dados do ensaio de esclerometria – Ponte Freguesia do Ó.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
E1	1	Tabuleiro entre eixos D e E	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	35,2
E4	2	Tabuleiro entre eixos D e E	Laje	Laje	Superestrutura	54,9
E10	3	Tabuleiro entre eixos AP1 e AP2	Laje	Laje	Superestrutura	77
E12	4	Pórtico entre eixos A e B	Laje	Laje	Superestrutura	72,7
E13	5	Pórtico entre eixos A e B	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	50,3
E14	6	Pórtico entre eixos A e B	Viga transversina	Viga transversina	Superestrutura	52,2
E16	7	Arco	Arco	Arco	Superestrutura	59,2
E17	8	Arco	Arco	Arco	Superestrutura	60,3
E18	9	Tabuleiro entre eixos K e L	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	57,4
E20	10	Tabuleiro entre eixos I e J	Viga transversina	Viga transversina	Superestrutura	69,5
E21	11	Tabuleiro entre eixos I e J	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	56,1
E2	12	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	37,2
E3	13	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	39,8
E5	14	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	67,7
E6	15	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	36
E7	16	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	56

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
E8	17	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	37,2
E11	18	Pórtico entre eixos A e B	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	68,2
15	19	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	62,4
E19	20	Tabuleiro entre eixos I e J	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	67,7
E22	21	Tabuleiro entre eixos J e K	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	47,9
E23	22	Tabuleiro entre eixos J e K	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	55,5
E9	23	Arco	Sapata	Sapata	Infraestrutura	42,6

Fonte: Autoras (2021).

Tabela A2 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Freguesia do Ó.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
CP1 (1)	1	Arco	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	35
CP1 (3)	2	Arco	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	43,5
CP2 (2)	3	Arco	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	33,9
CP9 (3)	4	Pórtico entre eixos A e B	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	35,7
CP10 (1)	5	Arco	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	45,4
CP10 (2)	6	Arco	Arco	Laje	Superestrutura	41,3
CP11	7	Arco	Arco	Arco	Superestrutura	22,7
CP13 (3)	8	Pórtico entre eixos A e B	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	39
CP14 (1)	9	Arco	Pista/Tabuleiro	Laje	Superestrutura	44,7
CP17	10	Pórtico entre eixos A e B	Viga Longarina	Viga longarina	Superestrutura’	18,2

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
CP18	11	Pórtico entre eixos A e B	Viga transversina	Viga transversina	Superestrutura	19,6
CP22	12	Arco	Arco	Arco	Superestrutura	33,6
CP23	13	Arco	Arco	Arco	Superestrutura	21,4
CP24	14	Tabuleiro entre eixos K e L	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	17
CP3	15	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	30
CP4	16	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	30,1
CP5	17	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	20,1
CP6	18	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	17,6
CP7	19	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	22,1
CP8	20	Arco	Pilar-parede	Pilar-parede	Mesoestrutura	24,6
CP16	21	Pórtico entre eixos A e B	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	29,6

Fonte: Autoras (2021).

Tabela A3 – Dados do ensaio de determinação de profundidade de carbonatação.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
C1	1	Tabuleiro eixo D e E	Viga Longarina	Viga longarina	87	-	16	Superestrutura	87
C6	2	Tabuleiro eixo I e I	Viga Longarina	Viga longarina	17	-	21	Superestrutura	24
C13	3	Tabuleiro eixos AP1 e AP2	Laje pré-moldada	Laje	21	-	10	Superestrutura	13

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
C17	7	Pórtico entre eixos A e B	Laje/tabuleiro	Laje	21	-	10	Superestrutura	13
C2	8	Pórtico entre eixos A e B	Pilar	Pilar	25	-	14	Mesoestrutura	25
C3	9	Pórtico entre eixos C e D	Pilar	Pilar	40	-	10	Mesoestrutura	30
C4	10	Pórtico entre eixos J e K	Pilar	Pilar	30	-	20	Mesoestrutura	35
C5	11	Pórtico entre eixos J e K	Pilar	Pilar	30	-	1	Mesoestrutura	50
C7	12	Tabuleiro entre eixos I e J	Pilar	Pilar	15	-	2	Mesoestrutura	10
C10	15	Arco	Pilar Parede	Pilar Parede	52	-	0	Mesoestrutura	27
C12	17	Arco	Sapata / imposta	Sapata	22	-	0	Infraestrutura	11

Fonte: Autoras (2021).

- Vida Útil

Tabela A4 – Vida útil estimada para a Ponte Freguesia do Ó – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Inaugu-ração	Idade	k_{est}	VUE (anos)
C13	3	Entre AP1 e AP2	Laje	Superestrutura	21	13	61,9	2010	9	4,33	3,41
C15	5	V2 A-B	Viga longarina	Superestrutura	35	20	57,1	1956	63	2,52	35,44
C17	7	Entre AP1 e AP2	Laje	Superestrutura	21	13	61,9	2010	9	4,33	3,41
C3	9	P8A eixo D (Pórtico C-D)	Pilar	Mesoestrutura	40	30	75,0	1956	63	3,78	7,00
C7	12	Pilar P62 eixo I	Pilar	Mesoestrutura	15	10	66,7	1956	63	1,26	15,75
C10	15	Eixo E''	Pilar-parede	Mesoestrutura	52	27	51,9	1956	63	3,40	54,01

Fonte: Autoras (2021).

Tabela A5 – Vida útil estimada para a Ponte Freguesia do Ó – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
C13	3	Entre AP1 e AP2	Laje	Superestrutura	21	13	61,9	37	2010	9	CP-V	1300	18	1	30,15
C15	5	V2 A-B	Viga longarina	Superestrutura	35	20	57,1	18	1956	63	CP-I	1300	18	1	9,27
C17	7	Entre AP1 e AP2	Laje	Superestrutura	21	13	61,9	37	2010	9	CP-V	1300	18	1	30,15
C3	9	P8A eixo D (Pórtico C-D)	Pilar	Mesoestrutura	40	30	75,0	30	1956	63	CP-I	1300	18	1	23,20
C7	12	Pilar P62 eixo I	Pilar	Mesoestrutura	15	10	66,7	30	1956	63	CP-I	1300	18	1	5,80
C10	15	Eixo E''	Pilar-parede	Mesoestrutura	52	27	51,9	21	1956	63	CP-I	1300	18	1	43,40

Fonte: Autoras (2021).

Apêndice B – Ponte da Casa Verde

- Ensaios

Tabela B1 - Dados do ensaio de esclerometria – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
1	1	Tramo 11 - VL104	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	40
2	2	Tramo 08 - VL70	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	46,8
3	3	Tramo 07	Arco	Arco	Superestrutura	23,5
4	4	Tramo 07	Arco	Arco	Superestrutura	25,1
5	5	Tramo 07	Arco	Arco	Superestrutura	29,7
6	6	Tramo 07	Arco	Arco	Superestrutura	34,5
7	7	Tramo 06	Viga de borda	Viga longarina	Superestrutura	28,3
8	8	Tramo 01 - VL01	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	24,4
9	9	Tramo 11 - P127	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	41,6
10	10	Tramo 10 - P130	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	43,1
11	11	Tramo 10 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	35,3
12	12	Tramo 10 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	32,8
13	13	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	26,2
14	14	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	25,2
15	15	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	25,2
16	16	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	26,2
17	17	Tramo 02 - P17	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	37,3

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
18	18	Tramo 02 - P15	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	35,3
19	19	Tramo 02 - P13	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	38,6
20	20	Tramo 02 - P23	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	41,2
21	21	Tramo 02 - P25	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	36,1
22	22	Tramo 02 - P27	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	37,2

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B2 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
1	1	Tramo 11 - VL104	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4167	Bom
2	2	Tramo 08 - VL70	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3373	Regular
3	3	Tramo 07	Arco	Alma externa	Superestrutura	2591	Ruim
4	4	Tramo 07	Arco	Alma externa	Superestrutura	3021	Regular
5	5	Tramo 07	Arco	Alma externa	Superestrutura	3003	Regular
6	6	Tramo 07	Arco	Alma externa	Superestrutura	2981	Ruim
7	7	Tramo 06	Viga de borda	Viga longarina	Superestrutura	2424	Ruim
8	8	Tramo 01 - VL01	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2747	Ruim
9	9	Tramo 11 - P127	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	4480	Bom
10	10	Tramo 10 - P130	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	4160	Bom
11	11	Tramo 10 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	4274	Bom

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
12	12	Tramo 10 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	3984	Bom
13	13	Tramo 10 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	2611	Ruim
13	14	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	4541	Excelente
14	15	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	4045	Bom
15	16	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	3634	Bom
16	17	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	3285	Regular
17	18	Tramo 02 - P17	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	4170	Bom
18	19	Tramo 02 - P15	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	3053	Regular
19	20	Tramo 02 - P13	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	3882	Bom
20	21	Tramo 02 - P23	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	4000	Bom
21	22	Tramo 02 - P25	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	3644	Bom
22	23	Tramo 02 - P27	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	2800	Ruim

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B3 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (gráfico)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
1	1	Tramo 11 – VL 104	Viga	Viga longarina	Superestrutura	41,3
2	2	Tramo 08 – VL 70	Viga	Viga longarina	Superestrutura	25,2
4	3	Tramo 07 – FL	Arco	Arco	Superestrutura	24,6
5	4	Tramo 07 – FO	Arco	Arco	Superestrutura	26

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (gráfico)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
8	5	Tramo 01 – VL 01	Arco	Arco	Superestrutura	27,5
3	6	Tramo 10 – P 130	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	44,6
6	7	Tramo 02 – P 11	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	28
7	8	Tramo 06 – VB	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	25,7

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B4 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
2	1	Tramo 11 – VT – P127 e P128	Viga	Viga longarina	35	-	-	Superestrutura	7
3	2	Tramo 12 – VT	Viga	Viga longarina	35	-	-	Superestrutura	8
4	3	Tramo 11 – VL 104	Viga	Arco	36	-	-	Superestrutura	7
5	4	Tramo 08 – VL 70	Viga	Arco	20	-	-	Superestrutura	12
6	5	Tramo 07 – Centro	Arco	Viga de borda	28	-	-	Superestrutura	8
7	6	Tramo 07 – Centro	Arco	Viga longarina	28	-	-	Superestrutura	12
8	7	Tramo 06 – VB	Viga	Pilar	20	-	-	Mesoestrutura	25
11	8	Tramo 02 – P27	Viga	Viga travessa	24	-	-	Mesoestrutura	30
12	9	Tramo 01 – VL 01	Viga	Viga travessa	19	-	-	Mesoestrutura	20
1	10	Tramo 11 – P127	Pilar	Pilar	39	-	-	Mesoestrutura	5
9	11	Tramo 02 – P23	Pilar	Pilar	20	-	-	Mesoestrutura	28
10	12	Tramo 02 – P25	Pilar	Pilar	21	-	-	Mesoestrutura	24

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B5- Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte da Casa Verde.

			Compressão			Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (pesquisa)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (rel.)**	**Pt. (relatório)**	**Fck (MPa)**	**Pt. (rel.)**	**Pt. (relatório)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
Tramo 11 - VL104	Viga longarina	Superestrutura	1	1	41,3	1	1	4167	Bom
Tramo 08 - VL70	Viga longarina	Superestrutura	2	2	25,2	2	2	3373	Regular
Tramo 10 - P130	Pilar	Mesoestrutura	3	6	44,6	10	10	4160	Bom
Tramo 07 – FL	Arco	Superestrutura	4	3	24,6	3	3	2591	Ruim
Tramo 07 – FO	Arco	Superestrutura	5	4	26	4	4	3021	Regular
Tramo 06 - VB	Viga de borda	Superestrutura	7	8	25,7	7	7	2424	Ruim
Tramo 01 - VL01	Arco	Superestrutura	8	5	27,5	8	8	2747	Ruim

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte da Casa Verde.

			Carbonatação						Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (pesquisa)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório.)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
Tramo 08 - VL 70	Viga longarina	Superestrutura	5	4	20	-	-	12	2	2	3373	Regular
Tramo 07 - Centro Arco	Arco	Superestrutura	6	5	28	-	-	8	5	5	3003	Regular
Tramo 07 - Centro Arco	Arco	Superestrutura	7	6	28	-	-	12	6	6	2981	Ruim

(continua)

(término)

Localização (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho (relatório)	Pt. (relatório.)	Pt. (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. Mín. (mm)	Carb. Máx. (mm)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Vel. (m/s)	Qualidade do concreto
Tramo 06 - VB	Viga longarina	Superestrutura	8	7	20	-	-	25	7	7	2424	Ruim
Tramo 02 - P23	Pilar	Mesoestrutura	9	11	20	-	-	28	20	21	4000	Bom
Tramo 02 - P25	Pilar	Mesoestrutura	10	12	21	-	-	24	21	22	3644	Bom
Tramo 02 - P27	Pilar	Mesoestrutura	11	8	24	-	-	30	22	23	2800	Ruim
Tramo 01 - VL 01	Viga longarina	Superestrutura	12	9	19	-	-	20	8	8	2747	Ruim

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B7 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé.

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho (relatório)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. Mín. (mm)	Carb. Máx. (mm)	Pto. rel.	Pto. gráfico	Fck (MPa)
Tramo 08 - VL70	Viga longarina	Super	5	4	20	-	-	12	2	2	25,2
Tramo 01 - VL01	Viga longarina	Super	12	9	19	-	-	20	8	5	27,5

Fonte: Autoras (2021).

- Vida Útil:

Tabela B8 – Vida útil estimada para a Ponte Casa Verde – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Inaugu-ração	Idade	k_{est}	VUE (anos)
4	1	Tramo 11 – VL104	Viga longarina	Superestrutura	36	7	19,4	2010	9	2,33	154,47
5	2	Tramo 8 – VL70	Viga longarina	Superestrutura	20	12	60,0	1954	65	1,49	28,89
6	3	Tramo 7 – Arco	Arco	Superestrutura	28	8	28,6	1954	65	0,99	406,25
7	4	Tramo 7 – Arco	Arco	Superestrutura	28	12	42,9	1954	65	1,49	115,56
1	7	Tramo 11 – Pilar 127	Pilar	Mesoestrutura	39	5	12,8	2010	9	1,67	416,16
2	8	Tramo 11 – TVR (P127 e P128)	Viga travessa	Mesoestrutura	35	7	20,0	2010	9	2,33	144,00
3	9	Tramo 12 – TVR ENC2	Viga travessa	Mesoestrutura	35	8	22,9	2010	9	2,67	102,52

Fonte: Autoras (2021).

Tabela B9 – Vida útil estimada para a Ponte Casa Verde – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
4	1	Tramo 11 – VL104	Viga longarina	Superestrutura	36	7	19,4	41,3	2010	9	CP-V	1300	18	1	574,23
5	2	Tramo 8 – VL70	Viga longarina	Superestrutura	20	12	60,0	25,2	1954	65	CP-I	1300	18	1	8,24
6	3	Tramo 7 – Arco	Arco	Superestrutura	28	8	28,6	25,3	1954	65	CP-I	1300	18	1	52,17
7	4	Tramo 7 – Arco	Arco	Superestrutura	28	12	42,9	25,3	1954	65	CP-I	1300	18	1	33,39

(continua)

(término)

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
1	7	Tramo 11 – Pilar 127	Pilar	Mesoestrutura	39	5	12,8	35	2010	9	CP-V	1300	18	1	451,49
2	8	Tramo 11 – TVR (P127 e P128)	Viga travessa	Mesoestrutura	35	7	20,0	35	2010	9	CP-V	1300	18	1	306,20
3	9	Tramo 12 – TVR ENC2	Viga travessa	Mesoestrutura	35	8	22,9	35	2010	9	CP-V	1300	18	1	248,72

Fonte: Autoras (2021).

Apêndice C – Ponte das Bandeiras

Tabela C1 - Dados do ensaio de esclerometria – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
9	1	Tramo 06	Viga longarina	Alma externa	Superestrutura	31,8
11	2	Tramo 05	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	28,8
12	3	Tramo 06	Viga longarina	Alma externa	Superestrutura	25,9
13	4	Tramo 04	Arco	Arco	Superestrutura	21,4
14	5	Tramo 04	Arco	Arco	Superestrutura	24,8
16	6	Tramo 04	Viga	Arco	Superestrutura	28,2
17	7	Tramo 01	Viga longarina	Alma externa	Superestrutura	26,6
18	8	Tramo 03	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	26,1
1	9	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	13,3
2	10	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	9,1
3	11	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	19,4
4	12	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	31,1
5	13	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	31,2
6	14	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	30,3
7	15	Torre	Viga	Parede	Mesoestrutura	35,1
8	16	Torre	Viga	Parede	Mesoestrutura	33,7
10	17	Tramo 06 - TVR	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	14,1
15	18	Tramo 04	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	26,9
20	19	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	21,8

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
21	20	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	21
22	21	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	23,5
23	22	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	27,3
24	23	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	25,2
25	24	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	25,4
26	25	Tramo 02	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	27,6
27	26	Tramo 02	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	29,8
28	27	Tramo 02	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	26,8

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C2 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório')	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
10	1	Tramo 06	Viga longarina	Alma externa	Superestrutura	3137	Regular
12	2	Tramo 05	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3147	Regular
13	3	Tramo 03	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2960	Ruim
14	4	Tramo 01	Viga longarina	Alma externa	Superestrutura	3418	Regular
21	5	Tramo 04	Viga	Arco	Superestrutura	3384	Regular
22	6	Tramo 04	Viga	Arco	Superestrutura	3268	Regular
23	7	Tramo 04	Viga	Arco	Superestrutura	2817	Ruim
24	8	Tramo 04	Viga	Arco	Superestrutura	3175	Regular

(continua)

(término)

Ponto (relatório')	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
1	9	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	2538	Ruim
2	10	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	4902	Excelente
3	11	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	2121	Ruim
4	12	Torre	Parede	Parede	Mesoestrutura	2878	Ruim
5	13	Parede	Parede	Parede	Mesoestrutura	3175	Regular
6	14	Parede	Parede	Parede	Mesoestrutura	3090	Regular
7	15	Parede	Parede	Parede	Mesoestrutura	3201	Regular
8	16	Parede	Parede	Parede	Mesoestrutura	3805	Bom
9	17	Parede	Parede	Parede	Mesoestrutura	2980	Ruim
11	18	Tramo 06 - TVR	Viga Travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	3331	Regular
15	19	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	3418	Regular
16	20	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	4026	Bom
17	21	Tramo 06	Parede	Parede	Mesoestrutura	3043	Regular
18	22	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	2967	Ruim
19	23	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	2829	Ruim
20	24	Tramo 01	Parede	Parede	Mesoestrutura	2331	Ruim

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C3 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
2	1	Tramo 03	Viga Longarina	Viga longarina	Superestrutura	39,9
3	2	Tramo 05	Viga Longarina	Viga longarina	Superestrutura	27,9
5	3	Tramo 06	Viga Longarina	Viga longarina	Superestrutura	31,7
1	4	Tramo 01	Parede	Viga longarina	Superestrutura	35,1
4	5	Tramo 06	Viga travessa	Viga travessa	Mesoestrutura	22,7
6	6	Bloco de fundação – Sentido Ayrton Senna	Bloco de fundação	Bloco de fundação	Infraestrutura	35,5
7	7	Bloco de fundação – Sentido Castelo Branco	Bloco de fundação	Bloco de fundação	Infraestrutura	33,9

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C4 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte da Casa Verde.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
12	1	Tramo 06	Viga longarina	Alma externa	11	-	-	Superestrutura	5
14	2	Tramo 05	Viga longarina	Viga longarina	44	-	-	Superestrutura	12
15	3	Tramo 03	Viga longarina	Viga longarina	44	-	-	Superestrutura	10
16	4	Tramo 01	Viga longarina	Alma externa	21	-	-	Superestrutura	17
17	5	Tramo 04 – Bairro – LN	Viga	Arco	1	-	-	Superestrutura	3
18	6	Tramo 04 – Bairro – LS	Viga	Arco	2	-	-	Superestrutura	4

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
19	7	Tramo 04 - Centro - LN	Viga	Arco	2	-	-	Superestrutura	5
20	8	Tramo 04 – Centro - LS	Viga	Arco	1	-	-	Superestrutura	6
1	9	Torre – FO	Parede interna	Parede	20	-	-	Mesoestrutura	20
2	10	Torre – FN	Parede interna	Parede	11	-	-	Mesoestrutura	24
3	11	Torre – FS	Parede interna	Parede	11	-	-	Mesoestrutura	13
4	12	Torre Leste – FN	Parede externa	Parede	16	-	-	Mesoestrutura	10
5	13	Torre Leste – FL	Parede externa	Parede	10	-	-	Mesoestrutura	40
6	14	Torre Leste – FO	Parede externa	Parede	10	-	-	Mesoestrutura	10
7	15	Torre Leste – FS	Parede externa	Parede	11	-	-	Mesoestrutura	22
8	16	Torre Oeste – FS	Parede externa	Parede	11	-	-	Mesoestrutura	12
9	17	Torre Oeste – FN	Parede externa	Parede	6	-	-	Mesoestrutura	12
10	18	Tramo 01	Parede	Parede	48	-	-	Mesoestrutura	40
11	19	Tramo 06	Parede	Parede	7	-	-	Mesoestrutura	10
13	20	Tramo 06	Viga travessa	Viga travessa	11	-	-	Mesoestrutura	5

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C5- Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte das Bandeiras.

			Compressão			Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
TRAMO 01 - VL	Viga longarina	Superestrutura	1	4	35,1	14	4	3418	Regular
TRAMO 03 - VL	Viga longarina	Superestrutura	2	1	39,9	13	3	2960	Ruim
TRAMO 05 - VL	Viga longarina	Superestrutura	3	2	27,9	12	2	3147	Regular
TRAMO 06 - VT	Viga travessa	Mesoestrutura	4	5	22,7	11	18	3331	Regular
TRAMO 06 - VL	Viga longarina	Superestrutura	5	3	31,7	10	1	3137	Regular

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear - Ponte das Bandeiras.

			Carbonatação						Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
Torre Oeste PE – FS	Parede	Mesoestrutura	8	17	11	-	-	12	1	9	2538	Ruim
Torre Oeste PE – FN	Parede	Mesoestrutura	9	18	6	-	-	12	4	12	2878	Ruim
Tramo 05 – VL	Viga longarina	Superestrutura	14	3	44	-	-	12	12	2	3147	Regular
Tramo 03 – VL	Viga longarina	Superestrutura	15	4	44	-	-	10	13	3	2960	Ruim
Tramo 04 - Bairro - LN	Arco	Superestrutura	17	6	1	-	-	3	21	5	3384	Regular
Tramo 04 - Bairro - LS	Arco	Superestrutura	18	7	2	-	-	4	22	6	3268	Regular
Tramo 04 - Centro - LN	Arco	Superestrutura	19	8	2	-	-	5	23	7	2817	Ruim
Tramo 04 - Centro - LS	Arco	Superestrutura	20	9	1	-	-	6	24	8	3175	Regular

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C7 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte das Bandeiras.

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**
VL - Tramo 03	Viga longarina	Superestrutura	15	4	44	-	-	10	2	1	39,9
VL - Tramo 05	Viga longarina	Superestrutura	14	3	44	-	-	12	3	2	27,9

Fonte: Autoras, 2021.

- Vida Útil:

Tabela C8 – Vida útil estimada para a Ponte das Bandeiras – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	**Pt. (pesquisa)**	**Elemento (relatório)**	**Elemento (pesquisa)**	**Trecho Estrutural**	**Cob. (mm)**	**Carb. (mm)**	**Carb. (%)**	**Inaugu-ração**	**Idade**	**k_{est}**	**VUE (anos)**
12	1	Tramo 6 – VL	Alma externa	Superestrutura	11	5	45,5	2010	9	1,67	12,96
14	2	Tramo 5 – VL	Viga longarina	Superestrutura	44	12	27,3	1942	77	1,37	547,56
15	3	Tramo 3 – VL	Viga longarina	Superestrutura	44	10	22,7	1942	77	1,14	890,12
16	4	Tramo 1 – VL	Alma externa	Superestrutura	21	17	81,0	2010	9	5,67	0,50
4	12	Torre leste – Parede Externa – Norte	Parede	Mesoestrutura	16	10	62,5	1942	77	1,14	27,72
10	18	Tramo 1 – Parede	Parede	Mesoestrutura	48	40	83,3	2010	9	13,33	0,36
13	20	Tramo 6 – TVR	Viga travessa	Mesoestrutura	11	5	45,5	2010	9	1,67	12,96

Fonte: Autoras (2021).

Tabela C9 – Vida útil estimada para a Ponte das Bandeiras – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
12	1	Tramo 6 – VL	Alma externa	Superestrutura	11	5	45,5	31,7	2010	9	CP-V	1300	18	1	10,06
14	2	Tramo 5 – VL	Viga longarina	Superestrutura	44	12	27,3	27,9	1942	77	CP-I	1300	18	1	185,92
15	3	Tramo 3 – VL	Viga longarina	Superestrutura	44	10	22,7	39,9	1942	77	CP-I	1300	18	1	702,62
16	4	Tramo 1 – VL	Alma externa	Superestrutura	21	17	81,0	35,1	2010	9	CP-V	1300	18	1	6,31
4	12	Torre leste – Parede Externa – Norte	Parede	Mesoestrutura	16	10	62,5	24	1942	77	CP-I	1300	18	1	3,93
10	18	Tramo 1 – Parede	Parede	Mesoestrutura	48	40	83,3	35	2010	9	CP-V	1300	18	1	25,00
13	20	Tramo 6 – TVR	Viga travessa	Mesoestrutura	11	5	45,5	22,7	2010	9	CP-V	1300	18	1	3,25

Fonte: Autoras (2021).

Apêndice D – Ponte Presidente Jânio Quadros

Tabela D1 – Dados do ensaio de ultrassom – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
VL1-Vão11	1	Vão 11	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2788,3	Ruim
VL1-Vão2	2	Vão 2	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3612,9	Bom
VL10-Vão2	3	Vão 2	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3980,7	Bom
VL1-Vão3	4	Vão 3	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2326,8	Ruim
VL1 -Vão3	5	Vão 3	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3154,6	Regular
ALMA 4-Vão3	6	Vão 3	Alma	Viga longarina	Superestrutura	4203,5	Bom
ALMA 4-Vão5	7	Vão 5	Alma	Viga longarina	Superestrutura	4545,8	Excelente
VL1-Vão5	8	Vão 5	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3002,7	Regular
VL10-Vão5	9	Vão 5	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4144	Bom
VL1-Vão6	10	Vão 6	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2889,1	Ruim
VL10-Vão6	11	Vão 6	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4175,7	Bom
VL1-Vão9	12	Vão 9	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4111,6	Bom
VL8-Vão9	13	Vão 9	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3530,2	Bom
VL5-Vão9	14	Vão 9	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2948,7	Ruim
VL10-Vão9	15	Vão 9	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3962,2	Bom
VL10-Vão10	16	Vão 10	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	1999	Péssimo
VL10-Vão7-FL	17	Vão 7	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2021,1	Ruim
VL10-Vão8-FL	18	Vão 8	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3186	Regular
VL1-Vão8-FL	19	Vão 8	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4216,7	Bom

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
VL1-Vão7-FO	20	Vão 7	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	2901,8	Ruim
VL8-Vão11 -P-P1	21	Vão 11	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3890,4	Bom
VL8-Vão11-P-P2	22	Vão 11	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	3884,7	Bom
VL8-Vão11-P-P3	23	Vão 11	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4014	Bom
VL3-Vão10-P-P1	24	Vão 10	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4857,4	Excelente
VL3-Vão10-P-P2	25	Vão 10	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4495,6	Bom
VL3-Vão10-P-P3	26	Vão 10	Viga longarina	Viga longarina	Superestrutura	4570,4	Excelente
AP3-Vão2	27	Vão 2	Apoio 3	AP3	Mesoestrutura	4360,2	Bom
AP2-Vão2	28	Vão 2	Apoio 2	AP2	Mesoestrutura	3557	Bom
AP5-Vão3	29	Vão 3	Apoio 5	AP5	Mesoestrutura	4665,7	Excelente
AP8-Vão6	30	Vão 6	Apoio 8	AP8	Mesoestrutura	4517,6	Excelente
AP13-Vão9	31	Vão 9	Apoio 13	AP13	Mesoestrutura	3715,4	Bom
AP14-Vão9	32	Vão 9	Apoio 14	AP14	Mesoestrutura	4548,3	Excelente
AP15-Vão10	33	Vão 10	Apoio 15	AP15	Mesoestrutura	4637,9	Excelente
AP11 -Vão 8-FN	34	Vão 11	Apoio 11	AP11	Mesoestrutura	4262	Bom

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D2 – Dados do ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
10	1	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	25,8
11	2	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	27,3
12	3	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	43
13	4	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	56,6
14	5	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	28,9
15	6	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	29
16	7	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	41,8
17	8	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	30,1
18	9	VL 10	Viga Longarina	Viga longarina	Super	28,8
19	10	ALE 4 – FL	Alma externa	Alma externa	Super	41,6
20	11	AL 8 – FL	Alma externa	Alma externa	Super	41,6
21	12	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	33,9
22	13	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	38,5
23	14	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	45,8
24	15	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	38,4
25	16	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	34,8
26	17	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	32,5
27	18	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	28,8
28	19	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	25,3
29	20	VL 01	Viga Longarina	Viga longarina	Super	17,8
30	21	ALE 5 – FO	Alma externa	Alma externa	Super	38,3

(continuação)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
31	22	ALE 1 – FO	Alma externa	Alma externa	Super	52,8
1	23	AP3 – FN	Apoio	Apoio	Meso	34,5
2	24	AP5 – FN	Apoio	Apoio	Meso	47,4
3	25	AP8 – FS	Apoio	Apoio	Meso	20,2
4	26	AP9 – FS	Apoio	Apoio	Meso	31,3
5	27	AP11 - FN	Apoio	Apoio	Meso	30
6	28	AP12 – FS	Apoio	Apoio	Meso	45
7	29	AP13 – FN	Apoio	Apoio	Meso	32,7
8	30	AP14 – FS	Apoio	Apoio	Meso	28,7
9	31	AP15 – FS	Apoio	Apoio	Meso	35,8

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D3 – Dados ensaio de determinação de profundidade de carbonatação – Ponte Presidente Jânio Quadros.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
4	1	VL 10 - VÃO 2	Viga longarina	Viga longarina	13	29	-	Super	2
2	2	VL 10 -VÃO 3	Viga longarina	Viga longarina	34	31	-	Super	17
6	3	VL 10 - VÃO 5	Viga longarina	Viga longarina	23	22	-	Super	2
7	4	VL 10 - VÃO 6	Viga longarina	Viga longarina	24	21	-	Super	7

(continua)

(continuação)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
22	5	VL 10 - VÃO 8	Viga longarina	Viga longarina	0	30	-	Super	28
23	6	VL 10 - VÃO 9	Viga longarina	Viga longarina	6	38	-	Super	23
12	7	VL 10 - VÃO 10	Viga longarina	Viga longarina	33	80	-	Super	8
13	8	VL 10 -VÃO 11	Viga longarina	Viga longarina	32	29	-	Super	0
3	9	VL 1 – VÃO 2	Viga longarina	Viga longarina	14	31	-	Super	11
1	10	VL 1 – VÃO 3	Viga longarina	Viga longarina	33	34	-	Super	20
5	11	VL 1 – VÃO 5	Viga longarina	Viga longarina	7	29	-	Super	29
8	12	VL 1 – VÃO 6	Viga longarina	Viga longarina	22	19	-	Super	29
19	13	VL 1 – VÃO 8	Viga longarina	Viga longarina	26	32	-	Super	36
10	14	VL 1 – VÃO 9	Viga longarina	Viga longarina	6	54	-	Super	22
11	15	VL 1 – VÃO 10	Viga longarina	Viga longarina	22	36	-	Super	10
14	16	VL 1 – VÃO 11	Viga longarina	Viga longarina	32	26	-	Super	21

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
16	17	AP 4 – VÃO 2	Apoio	Apoio	14	19	-	Meso	5
17	18	AP 5 – VÃO 3	Apoio	Apoio	0	40	-	Meso	14
19	19	AP 13 – VÃO 9	Apoio	Apoio	47	37	-	Meso	35
21	20	AP 15 – VÃO 10	Apoio	Apoio	14	30	-	Meso	22
15	21	AP 3 – VÃO 2	Apoio	Apoio	29	16	-	Meso	27
18	22	AP 8 – VÃO 6	Apoio	Apoio	9	32	-	Meso	5
20	23	AP 14 – VÃO 9	Apoio	Apoio	48	36	-	Meso	29

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D4 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Jânio Quadros.

			Compressão			Ultrassom			
Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Trecho (relatório)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Fck (MPa)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Vel. (m/s)	Qualidade do concreto
AP 3 - VÃO 2 - FN	Apoio	Mesoestrutura	1	23	34,5	4	AP3	4360,2	Bom
AP 5 - VÃO 3 - FN	Apoio	Mesoestrutura	2	24	47,4	8	AP5	4665,7	Excelente
AP 11 - VÃO 8 - FN	Apoio	Mesoestrutura	5	27	30	28	AP11	4262	Bom

(continua)

Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Trecho (relatório)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Fck (MPa)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Vel. (m/s)	Qualidade do concreto
AP 13 - VÃO 9 - FN	Apoio	Mesoestrutura	7	29	32,7	18	AP13	3715,4	Bom
AP 14 - VÃO 9 - FS	Apoio	Mesoestrutura	8	30	28,7	20	AP14	4548,3	Excelente
AP 15 - VÃO 10 - FS	Apoio	Mesoestrutura	9	31	35,8	23	AP15	4637,9	Excelente
VL 10 - VÃO 2 - FL	Viga longarina	Superestrutura	10	1	25,8	3	VL	3980,7	Bom
VL 10 - VÃO 3 - FL	Viga longarina	Superestrutura	11	2	27,3	7	VL	3154,6	Regular
VL 10 - VÃO 5 - FL	Viga longarina	Superestrutura	12	3	43	12	VL	4144	Bom
VL 10 - VÃO 6 - FL	Viga longarina	Superestrutura	13	4	56,6	15	VL	4175,7	Bom
VL 10 - VÃO 7 - FL	Viga longarina	Superestrutura	14	5	28,9	24	VL	2021,1	Ruim
VL 10 - VÃO 8 - FL	Viga longarina	Superestrutura	15	6	29	25	VL	3186	Regular
VL 10 - VÃO 9 - FL	Viga longarina	Superestrutura	16	7	41,8	21	VL	3962,2	Bom
VL 10 - VÃO 10 - FL	Viga longarina	Superestrutura	17	8	30,1	22	VL	1999	Péssimo
VL 1 - VÃO 2 - FO	Viga longarina	Superestrutura	21	12	33,9	2	VL	3612,9	Bom
VL 1 - VÃO 3 - FO	Viga longarina	Superestrutura	22	13	38,5	6	VL	2326,8	Ruim
VL 1 - VÃO 5 - FO	Viga longarina	Superestrutura	23	14	45,8	11	VL	3002,7	Regular
VL 1 - VÃO 6 - FO	Viga longarina	Superestrutura	24	15	38,4	13	VL	2889,1	Ruim
VL 1 - VÃO 8 - FO	Viga longarina	Superestrutura	26	17	32,5	26	VL	4216,7	Bom
VL 1 - VÃO 9 - FO	Viga longarina	Superestrutura	27	18	28,8	16	VL	4111,6	Bom

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D5 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Jânio Quadros.

			Carbonatação						Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
AP 5 - VÃO 3 - FN	Apoio	Mesoestrutura	17	2	0	40	-	14	8	AP5	4665,7	Excelente
AP 13 - VÃO 9 - FN	Apoio	Mesoestrutura	19	3	47	37	-	35	18	AP13	3715,4	Bom
AP 15 - VÃO 9 - FN	Apoio	Mesoestrutura	21	4	14	30	-	22	23	AP15	4637,9	Excelente
VL 10 - VÃO 2 - FL	Viga longarina	Superestrutura	4	5	13	29	-	2	3	VL	3980,7	Bom
VL 10 - VÃO 3 - FL	Viga longarina	Superestrutura	2	6	34	31	-	17	7	VL	3154,6	Regular
VL 10 - VÃO 5 - F	Viga longarina	Superestrutura	6	7	23	22	-	2	12	VL	4144	Bom
VL 10 - VÃO 6 - FL	Viga longarina	Superestrutura	7	8	24	21	-	7	15	VL	4175,7	Bom
VL 10 - VÃO 8 - FL	Viga longarina	Superestrutura	22	9	0	30	-	28	25	VL	3186	Regular
VL 10 - VÃO 9 - FL	Viga longarina	Superestrutura	23	10	6	38	-	23	21	VL	3962,2	Bom
VL 10 - VÃO 10 - FL	Viga longarina	Superestrutura	12	11	33	80	-	8	22	VL	1999	Péssimo

(continua)

(término)

			Carbonatação						Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade do concreto**
AP 3 - VÃO 2 - FN	Apoio	Mesoestrutura	15	13	29	16	-	27	4	AP3	4360,2	Bom
AP 8 - VÃO 6 - FN	Apoio	Mesoestrutura	18	14	9	32	-	5	14	AP8	4517,6	Excelente
AP 14 - VÃO 9 - FN	Apoio	Mesoestrutura	20	15	48	36	-	29	20	AP14	4548,3	Excelente
VL 1 - VÃO 2 - FO	Viga longarina	Superestrutura	3	16	14	31	-	11	2	VL	3612,9	Bom
VL 1 - VÃO 3 - FO	Viga longarina	Superestrutura	1	17	33	34	-	20	6	VL	2326,8	Ruim
VL 1 - VÃO 5 - FO	Viga longarina	Superestrutura	5	18	7	29	-	29	11	VL	3002,7	Regular
VL 1 - VÃO 6 - FO	Viga longarina	Superestrutura	8	19	22	19	-	29	13	VL	2889,1	Ruim
VL 1 - VÃO 8 - FO	Viga longarina	Superestrutura	19	20	26	32	-	36	26	VL	4216,7	Bom
VL 1 - VÃO 9 - FO	Viga longarina	Superestrutura	10	21	6	54	-	22	16	VL	4111,6	Bom

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D6 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Presidente Jânio Quadros.

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**
AP5 - Vão 3	Apoio	Mesoestrutura	17	2	0	40	-	14	2	24	47,4
AP13 - Vão 9	Apoio	Mesoestrutura	19	3	47	37	-	35	7	29	32,7
AP15 - Vão 10	Apoio	Mesoestrutura	21	4	14	30	-	22	9	31	35,8
VL10 - Vão 2	Viga longarina	Superestrutura	4	5	13	29	-	2	10	1	25,8
VL10 - Vão 3	Viga longarina	Superestrutura	2	6	34	31	-	17	11	2	27,3
VL10 - Vão 5	Viga longarina	Superestrutura	6	7	23	22	-	2	12	3	43
VL10 - Vão 6	Viga longarina	Superestrutura	7	8	24	21	-	7	13	4	56,6
VL10 - Vão 8	Viga longarina	Superestrutura	22	9	0	30	-	28	15	6	29
VL10 - Vão 9	Viga longarina	Superestrutura	23	10	6	38	-	23	16	7	41,8
VL10 - Vão 10	Viga longarina	Superestrutura	12	11	33	80	-	8	17	8	30,1
VL10 - Vão 11	Viga longarina	Superestrutura	13	12	32	29	-	0	18	9	28,8
AP3 - Vão 2	Apoio	Mesoestrutura	15	13	29	16	-	27	1	23	34,5
AP8 - Vão 5	Apoio	Mesoestrutura	18	14	9	32	-	5	3	25	20,2
AP14 - Vão 9	Apoio	Mesoestrutura	20	15	48	36	-	29	8	30	28,7
VL1 - Vão 2	Viga longarina	Superestrutura	3	16	14	31	-	11	21	12	33,9
VL1 - Vão 3	Viga longarina	Superestrutura	1	17	33	34	-	20	22	13	38,5

(continua)

(término)

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**
VL1 - Vão 5	Viga longarina	Superestrutura	5	18	7	29	-	29	23	14	45,8
VL1 - Vão 6	Viga longarina	Superestrutura	8	19	22	19	-	29	24	15	38,4
VL1 - Vão 8	Viga longarina	Superestrutura	19	20	26	32	-	36	26	17	32,5
VL1 - Vão 9	Viga longarina	Superestrutura	10	21	6	54	-	22	27	18	28,8
VL1 - Vão 10	Viga longarina	Superestrutura	11	22	22	36	-	10	28	19	25,3
VL1 - Vão 11	Viga longarina	Superestrutura	14	23	32	26	-	21	29	20	17,8

Fonte: Autoras (2021).

- Vida Útil:

Tabela D7 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Jânio Quadros – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	**Pt. (pesquisa)**	**Elemento (relatório)**	**Elemento (pesquisa)**	**Trecho Estrutural**	**Cob. (mm)**	**Arg. (mm)**	**Carb. (mm)**	**Carb. (%)**	**Inaugu-ração**	**Idade**	**k_{est}**	**VUE (anos)**
19	12	VL1 – Vão 6	Viga longarina	Superestrutura	22	19	10	34,5	1956	63	1,26	90,72
20	13	VL1 – Vão 8	Viga longarina	Superestrutura	26	32	4	11,1	1956	63	0,50	1905,75
13	21	Apoio 3 – Vão 2	Apoio	Mesoestrutura	29	16	11	40,7	1956	63	1,39	168,69

Fonte: Autoras (2021).

Tabela D8 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Jânio Quadros – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Arg. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
19	12	VL1 – Vão 6	Viga longarina	Superestrutura	22	19	10	34,5	38,4	1956	63	CP-I	1300	18	1	76,91
20	13	VL1 – Vão 8	Viga longarina	Superestrutura	26	32	4	11,1	32,5	1956	63	CP-I	1300	18	1	147,18
13	21	Apoio 3 – Vão 2	Apoio	Mesoestrutura	29	16	11	40,7	34,5	1956	63	CP-I	1300	18	1	120,54

Fonte: Autoras (2021).

Apêndice E – Ponte Presidente Dutra

Tabela E1 – Dados para ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Presidente Dutra.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
4	1	VL1 – V8	Viga Longarina	Alma externa	Super	37,9
5	2	LI – V8	Laje inferior	Laje inferior	Super	54,1
1	3	P2	Pilar	Pilar	Meso	37,2
2	4	P6	Pilar	Pilar	Meso	43,2
3	5	P5	Pilar	Pilar	Meso	29

Fonte: Autoras (2021).

Tabela E2 – Dados do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação – Ponte Presidente Dutra.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
1	1	LB 2 – Vão 2	Laje em balanço	Laje em balanço	50	-	-	Super	21
3	2	Laje - Vão 8	Laje inferior	Laje inferior	65	-	-	Super	27
7	3	Laje - Vão 2	Laje inferior	Laje inferior	26	-	-	Super	17
8	4	Laje caixão – Vão 3	Laje inferior	Laje inferior	26	-	-	Super	9
9	5	LB 1 – Vão 3	Laje em balanço	Laje em balanço	52	-	-	Super	14
11	6	Laje em balanço – Vão 2	Borda da laje	Borda da laje	25	-	-	Super	9
2	7	P2	Pilar	Pilar	50	-	-	Meso	23

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
4	8	P5	Pilar	Pilar	50	-	-	Meso	35
5	9	P6	Pilar	Pilar	50	-	-	Meso	32
10	10	P1	Pilar	Pilar	55	-	-	Meso	17
12	11	CT 1	Cortina	Cortina	30	-	-	Meso	16
13	12	P5	Pilar	Pilar	55	-	-	Meso	14
14	13	P5	Pilar	Pilar	65	-	-	Meso	18
15	14	P6	Pilar	Pilar	45	-	-	Meso	18
16	15	P6	Pilar	Pilar	20	-	-	Meso	20
6	16	Bloco de fundação	Bloco de fundação	Bloco de fundação	65	-	-	Infra	29

Fonte: Autoras (2021).

Tabela E3 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Presidente Dutra.

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Trecho (relatório)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. Mín. (mm)	Carb. Máx. (mm)	Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Fck (MPa)
P6	Pilar	Mesoestrutura	5	9	50	-	-	32	-	4	43,2
P13	Pilar	Mesoestrutura	14	12	65	-	-	18	-	5	29

Fonte: Autoras (2021).

- Vida Útil:

Tabela E4 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Dutra – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Inaugu-ração	Idade	k_{est}	VUE (anos)
1	1	LB2 – Vão 2	Laje em balanço	Superestrutura	50	21	42,0	2010	9	7,00	17,16
3	2	LI – Vão 8	Laje inferior	Superestrutura	65	27	41,5	2010	9	9,00	17,83
7	3	LI – Vão 2	Laje inferior	Superestrutura	26	17	65,4	2010	9	5,67	2,52
8	4	LI – Vão 3	Laje inferior	Superestrutura	26	9	34,6	2010	9	3,00	32,11
9	5	LB1 – Vão 3	Laje em balanço	Superestrutura	52	14	26,9	2010	9	4,67	66,31
11	6	BDL1 – Vão 2	Borda de laje	Superestrutura	25	9	36,0	2010	9	3,00	28,44
2	7	Pilar P2 – Vão 3	Pilar	Mesoestrutura	50	23	46,0	2010	9	7,67	12,40
4	8	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	50	35	70,0	2010	9	11,67	1,65
5	9	Pilar P6 – Vão 7	Pilar	Mesoestrutura	50	32	64,0	2010	9	10,67	2,85
10	10	Pilar P1 – Vão 2	Pilar	Mesoestrutura	55	17	30,9	2010	9	5,67	44,97
12	11	Cortina CT1 – Vão 1	Cortina	Mesoestrutura	30	16	53,3	2010	9	5,33	6,89
13	12	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	55	14	25,5	2010	9	4,67	77,19
14	13	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	65	18	27,7	2010	9	6,00	61,36
15	14	Pilar P6 – Vão 7	Pilar	Mesoestrutura	45	18	40,0	2010	9	6,00	20,25

Fonte: Autoras (2021).

Tabela E5 – Vida útil estimada para a Ponte Presidente Dutra – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
1	1	LB2 – Vão 2	Laje em balanço	Superestrutura	50	21	42,0	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	154,55
3	2	LI – Vão 8	Laje inferior	Superestrutura	65	27	41,5	54,1	2010	9	CP-V	1300	18	1	2449,31
7	3	LI – Vão 2	Laje inferior	Superestrutura	26	17	65,4	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	14,89
8	4	LI – Vão 3	Laje inferior	Superestrutura	26	9	34,6	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	53,11
9	5	LB1 – Vão 3	Laje em balanço	Superestrutura	52	14	26,9	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	265,36
11	6	BDL1 – Vão 2	Borda de laje	Superestrutura	25	9	36,0	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	47,04
2	7	Pilar P2 – Vão 3	Pilar	Mesoestrutura	50	23	46,0	37,2	2010	9	CP-V	1300	18	1	349,78
4	8	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	50	35	70,0	29	2010	9	CP-V	1300	18	1	46,56
5	9	Pilar P6 – Vão 7	Pilar	Mesoestrutura	50	32	64,0	43,2	2010	9	CP-V	1300	18	1	257,46
10	10	Pilar P1 – Vão 2	Pilar	Mesoestrutura	55	17	30,9	18	2010	9	CP-V	1300	18	1	59,49
12	11	Cortina CT1 – Vão 1	Cortina	Mesoestrutura	30	16	53,3	28	2010	9	CP-V	1300	18	1	36,02
13	12	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	55	14	25,5	29	2010	9	CP-V	1300	18	1	347,82
14	13	Pilar P5 – Vão 6	Pilar	Mesoestrutura	65	18	27,7	29	2010	9	CP-V	1300	18	1	457,07
15	14	Pilar P6 – Vão 7	Pilar	Mesoestrutura	45	18	40,0	43,2	2010	9	CP-V	1300	18	1	579,29

Fonte: Autoras (2021).

Apêndice F – Ponte Tatuapé

Tabela F1 - Dados do ensaio de ultrassom – Ponte Tatuapé.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
1-2	1	Vão 29	Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3951	Bom
1-3			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3571	Bom
1-7			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	5618	Excelente
1-5			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	4180	Bom
1-7 (-5cm)			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3241	Regular
1-7			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	5604	Excelente
1-6			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	4441	Bom
1-8			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	4219	Bom
1-8 (-5cm)			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3896	Bom
1-4			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3496	Regular
1-2	2	Vão 4	Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3883	Bom
1-5			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3109	Regular
1-7			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	2809	Ruim
1-3			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3439	Regular
1-6			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	2256	Ruim
1-8			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	2585	Ruim
1-4			Alma externa	Alma externa	Superestrutura	3692	Bom
CP 06	3	Vão 14	Laje inferior	Laje inferior	Superestrutura	4725	Excelente

(continua)

(continuação)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
CP 07	4	Vão 14	Laje inferior	Laje inferior	Superestrutura	4543	Excelente
1	5	Pilar 11	Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4433	Bom
2			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4433	Bom
3			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4327	Bom
4			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4455	Bom
5			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	3536	Bom
6			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4054	Bom
7			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4138	Bom
8			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4455	Bom
9			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4317	Bom
10			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4286	Bom
11			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	3801	Bom
12			Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	3808	Bom
1	6	Pilar 8	Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4433	Bom
2			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4433	Bom
3			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4327	Bom
4			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4455	Bom
5			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	3536	Bom
6			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4054	Bom
7			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4138	Bom

(continua)

(continua)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
8	6	Pilar 8	Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4455	Bom
9			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4317	Bom
10			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4286	Bom
11			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	3801	Bom
12			Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	3808	Bom
CP1	7	Pilar 8	Pilar 8	Pilar	Mesoestrutura	4203	Bom
1	8	Pilar 7	Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4635	Excelente
2			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4601	Excelente
3			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4320	Bom
4			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	3937	Bom
5			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4237	Bom
6			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4255	Bom
7			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4317	Bom
8			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4043	Bom
9			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4184	Bom
10			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4073	Bom
11			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4094	Bom
12			Pilar 7	Pilar	Mesoestrutura	4093	Bom
1	9	Pilar 30	Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4627	Excelente
2			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4536	Excelente

(continua)

(término)

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização (relatório)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
3	9	Pilar 30	Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4463	Bom
4			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4420	Bom
5			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4543	Excelente
6			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4449	Bom
7			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4609	Excelente
8			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4226	Bom
9			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4578	Excelente
10			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4596	Excelente
11			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4513	Excelente
12			Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4438	Bom
CP 02	10	Pilar 30	Pilar 30	Pilar	Mesoestrutura	4484	Bom
CP 03	11	Pilar 13	Pilar 13	Pilar	Mesoestrutura	3829	Bom
CP 04	12	Pilar 11	Pilar 11	Pilar	Mesoestrutura	4459	Bom
CP 05	13	Bloco apoio 6	Bloco 6	Bloco	Infraestrutura	4214	Bom

Fonte: Autoras (2021).

Tabela F2 – Dados para ensaio de resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Fck (MPa)
6	1	Laje inferior – AP 50 e 51	Viga Longarina	Laje inferior	Superestrutura	40,4
7	2	Laje inferior – AP 27 e 28	Tabuleiro	Laje inferior	Superestrutura	46,7
1	3	P8	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	23,3
2	4	P30	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	30,6
3	5	P13	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	30,3
4	6	P11	Pilar	Pilar	Mesoestrutura	42,1
5	7	Bloco de fundação 6	Bloco de fundação	Bloco de fundação	Infraestrutura	37,2

Fonte: Autoras (2021).

Tabela F3 – Dados do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação – Ponte Tatuapé.

Ponto (relatório)	Ponto (pesquisa)	Localização do elemento	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Cobrimento (mm)	Argamassa (mm)	Carb. mínima (mm)	Trecho Estrutural	Carb. máxima (mm)
4	1	VL – AP 8 e 9	Viga longarina	Alma externa	37	-	3	Superestrutura	16
5	2	Tabuleiro – AP 9 e 10	Tabuleiro	Laje inferior	39	-	11	Superestrutura	17
1	3	P10	Pilar	Pilar	40	-	0	Mesoestrutura	9
2	4	P8	Pilar	Pilar	46	-	13	Mesoestrutura	15
3	5	P13	Pilar	Pilar	35	-	0	Mesoestrutura	20
6	6	P31	Pilar	Pilar	72	-	0	Mesoestrutura	13
7	7	P6	Pilar	Pilar	70	-	0	Mesoestrutura	22

Fonte: Autoras (2021).

Tabela F4 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da resistência axial e da velocidade de propagação de onda linear – Ponte Presidente Tatuapé.

			Compressão			Ultrassom			
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Vel. (m/s)**	**Qualidade**
AP 8	Pilar	Mesoestrutura	1	3	23,3	CP 1	6	4203	Bom
AP 30	Pilar	Mesoestrutura	2	4	30,6	CP 2	9	4484	Bom
AP 13	Pilar	Mesoestrutura	3	5	30,3	CP 3	10	3829	Bom
AP 11	Pilar	Mesoestrutura	4	6	42,1	CP 4	11	4459	Bom
AP 6	Bloco de fundação	Infraestrutura	5	7	37,2	CP 5	12	4214	Bom
AP 50 E 51	Laje inferior	Superestrutura	6	1	40,4	CP 6	3	4725	Excelente
AP 27 E 28	Laje inferior	Superestrutura	7	2	46,7	CP 7	4	4543	Excelente

Fonte: Autoras (2021).

Tabela F5 - Resultados obtidos em mesmos pontos do ensaio de determinação da profundidade de carbonatação e da resistência à compressão axial – Ponte Tatuapé.

			Carbonatação						Compressão		
Localização (relatório)	**Elemento (relatório)**	**Trecho (relatório)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Cobrimento (mm)**	**Argamassa (mm)**	**Carb. Mín. (mm)**	**Carb. Máx. (mm)**	**Pt. (relatório)**	**Pt. (pesquisa)**	**Fck (MPa)**
P8	Pilar	Mesoestrutura	1	3	40	-	0	9	1	3	23,3
P13	Pilar	Mesoestrutura	3	5	35	-	0	20	3	5	30,3

Fonte: Autoras (2021).

- Vida Útil:

Tabela F6 – Vida útil estimada para a Ponte Tatuapé – Método de Tuutti.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Inaugu-ração	Idade	k_{est}	VUE (anos)
4	1	Long. Ext. AP8 e AP10	Alma externa	Superestrutura	37	16	43,2	1975	44	2,41	75,80
5	2	LI entre AP9 e AP10	Laje inferior	Superestrutura	39	17	43,6	4975	44	2,56	73,69
2	4	Pilar do Apoio 8	Pilar	Mesoestrutura	46	15	32,6	1975	44	2,26	187,93
3	5	Pilar do Apoio 13	Pilar	Mesoestrutura	35	20	57,1	1975	44	3,02	24,75
6	6	Pilar do Apoio 31	Pilar	Mesoestrutura	72	13	18,1	1975	44	1,96	906,30
7	7	Pilar do Apoio 6	Pilar	Mesoestrutura	70	22	31,4	1975	44	3,32	209,45

Fonte: Autoras (2021).

Tabela F7 – Vida útil estimada para a Ponte Tatuapé – Método de Possan.

Pt. (relatório)	Pt. (pesquisa)	Elemento (relatório)	Elemento (pesquisa)	Trecho Estrutural	Cob. (mm)	Carb. (mm)	Carb. (%)	Fck (MPa)	Inaugu-ração	Idade	Tipo de cimento	k_{UR}	k_{CO2}	k_{ce}	VUE (anos)
4	1	Long. Ext. AP8 e AP10	Alma externa	Superestrutura	37	16	43,2	30	1975	44	CP-I	1300	18	1	102,33
5	2	LI entre AP9 e AP10	Laje inferior	Superestrutura	39	17	43,6	30	4975	44	CP-I	1300	18	1	112,30
2	4	Pilar do Apoio 8	Pilar	Mesoestrutura	46	15	32,6	23,3	1975	44	CP-I	1300	18	1	94,86
3	5	Pilar do Apoio 13	Pilar	Mesoestrutura	35	20	57,1	30,3	1975	44	CP-I	1300	18	1	53,99
6	6	Pilar do Apoio 31	Pilar	Mesoestrutura	72	13	18,1	20	1975	44	CP-I	1300	18	1	204,91
7	7	Pilar do Apoio 6	Pilar	Mesoestrutura	70	22	31,4	20	1975	44	CP-I	1300	18	1	135,62

Fonte: Autoras (2021).