

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO (FAU)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO (PPG/FAU)**

MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**REABILITAÇÃO DA PONTE BRAGHETTO:
ASPECTOS HISTÓRICOS, CONSTRUTIVOS E DE
CONSERVAÇÃO**

Paulo Robert Santos Machado

Orientador: Prof. Dr. Márcio Augusto Roma Buzar

Janeiro de 2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO (FAU)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO (FAU/UnB)

MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

REABILITAÇÃO DA PONTE BRAGHETTO:
ASPECTOS HISTÓRICOS, CONSTRUTIVOS E DE
CONSERVAÇÃO

PAULO ROBERT SANTOS MACHADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia, ambiente e sustentabilidade

Linha de pesquisa: Estruturas e arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Márcio Augusto Roma Buzar

Brasília, 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

MACHADO, PAULO R. S

REABILITAÇÃO DA PONTE BRAGHETTO: ASPECTOS HISTÓRICOS, CONSTRUTIVOS E DE CONSERVAÇÃO. 2024.

xviii, 157 p., (PPG-FAU/UnB, Doutor, Arquitetura e Urbanismo, 2024).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

1. Infraestrutura Urbana.
 2. Segurança Estrutural e Desempenho Estrutural
 3. Aderson Moreira da Rocha
 4. Ponte Braghetto.
- I. FAU/Universidade de Brasília.
 - II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACHADO, PAULO R. S. **REABILITAÇÃO DA PONTE BRAGHETTO: ASPECTOS HISTÓRICOS, CONSTRUTIVOS E DE CONSERVAÇÃO. 2024.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2024. 157p.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

PAULO ROBERT SANTOS MACHADO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO – PPG-FAU

**REABILITAÇÃO DA PONTE BRAGHETTO: ASPECTOS HISTÓRICOS,
CONSTRUTIVOS E DE CONSERVAÇÃO.**

PAULO ROBERT SANTOS MACHADO

Dissertação de Mestrado submetida à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração Tecnologia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio Augusto Roma Buzar (PPG/FAU)

Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Marcos Aurélio de Sousa Bessa – UniCEUB

Membro Externo

Prof. Dr. Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa – UnB

Membro Interno

Prof. Dr. João da Costa Pantoja – UnB

Membro Suplente

AGRADECIMENTOS:

À Deus, meu pai Vicente de Paula Machado, minha mãe Maria Marly, esposa Carla e filhos pela compreensão e paciência e ao meu orientador Márcio Buzar.

RESUMO

A criação de Brasília, na década de 1960, foi caracterizada pela ruptura com a tradição da arquitetura em paralelo ao modernismo internacional, concebido com o objetivo de manifestar o otimismo de uma nova era por meio da arquitetura, a mais alta forma de expressão artística, fundamentando, assim, uma outra compreensão das qualidades espaciais, utilizando inovações tecnológicas e estruturais (Macdonald, 2007). As arquiteturas de Brasília possuem muitas realizações importantes na área de engenharia das estruturas, sendo muitas delas originais e inovadoras para a época da execução. A Ponte do Braghetto, chamada de “O Grande Viaduto sobre o Lago de Brasília”, foi executada em 1960 pela Sociedade de Engenharia e Terraplenagem Alberto Ltda. (SETAL) com projeto do prof. Aderson Moreira da Rocha, representando a introdução de algumas inovações técnicas importantes como protensão parcial e o sistema construtivo de concreto armado protendido, sendo precursor de uma nova técnica destinada a revolucionar os conceitos de concreto protendido. O caso da Ponte do Braghetto representa um firme ponto de partida para as futuras operações de manutenção do patrimônio de capital brasileira. Cabe ressaltar que rever informações que sejam relevantes para a preservação do patrimônio moderno, adotando aspectos do projeto inicial, a conservação, as intervenções ao longo do tempo que emplacaram na ampliação da capacidade da ponte com os reforços estruturais devidos, destinada para a realização de grande parte dos deslocamentos Sul-Norte e vice-versa, deve ser considerado uma das principais artérias viárias de Brasília tanto em termos de importância no que tange à estrutura urbana, quanto em termos de volume veicular. O processo de implantação do Projeto de Reabilitação deve considerar que a estrutura seja calculada de modo que apresente segurança e durabilidade, levando em consideração tanto a manutenção periódica pós-modernização quanto o respeito pelo meio ambiente (Ueda; Shimomura, 1999). A principal finalidade é o reestabelecimento do antigo desempenho perdido ao longo da vida útil. Portanto, uma edificação que passou por esse processo deve propiciar aos seus usuários uma melhor qualidade de vida (Moraes; Quelhas, 2012). A pesquisa e os estudos visam preservar o patrimônio cultural, devem analisar em primeira instância as características originais da construção, as mudanças físicas que ocorreram durante o tempo, os fenômenos de danos causados por transformações antrópicas e o envelhecimento dos materiais de construção (Formisano; Milani, 2019). No Brasil, não existe uma norma que regule essa prática, que, pela ABNT NBR 15575:2013, é definida como atualização da edificação por meio de incorporações tecnológicas que visem aumentar a vida útil do bem patrimonial (Negreiros, 2018). Portanto, torna-se necessário refinar as técnicas de análise para intervenção em obras históricas em relação ao seu impacto na sociedade atual. O conhecimento pode ser alcançado por meio de diferentes níveis de aprofundamento em termos de operações de pesquisa *in loco*, pesquisas históricas e investigações experimentais. O estudo das características da construção visa definir um modelo que permita uma interpretação qualitativa e quantitativa do sistema estrutural para obter a melhor proposta de intervenção com o estudo do caso da Ponte Braghetto.

Palavras-Chave: Ponte Braghetto, Infraestrutura Urbana, Segurança Estrutural e Desempenho Estrutural, Aderson Moreira da Rocha.

ABSTRACT

The invention of Brasília, in the 1960s, was characterized by a break with the tradition of architecture in parallel with international modernism, conceived with the aim of expressing the optimism of a new era through architecture, the highest form of artistic expression, he explained. another understanding of spatial qualities, using technological and structural innovations (Macdonald, 2007). The architecture of Brasília has many important achievements in the area of structural engineering, many of which are original and innovative for the time of execution. The Braghetto Bridge, called “The Great Viaduct over Lake Brasília”, was built in 1960 by SETAL (Sociedade de Engenharia e Terraplenagem Alberto Ltda.) with a project by prof. Aderson Moreira da Rocha, represented the introduction of some important technical innovations such as prestressing and the prestressed reinforced concrete construction system, being the precursor of a new technique destined to revolutionize the concepts of prestressed concrete. The case of the Braghetto Bridge represents a firm starting point for future maintenance operations of Brazilian capital heritage. It is worth noting that reviewing information that is relevant to the preservation of modern heritage, adopting aspects of the initial project, conservation, instructions over time that resulted in the expansion of the bridge's capacity with the necessary structural reinforcements, intended to carry out a large part of South-North movements and vice versa, it should be considered one of the main road arteries in Brasília both in terms of importance in terms of urban structure and in terms of vehicular volume. The Rehabilitation Project implementation process must consider that a structure is calculated so that it presents safety and durability, taking into account both periodic post-modernization maintenance and respect for the environment (Ueda; Shimomura, 1999). The main issue is the reestablishment of the old performance lost throughout the useful life. Therefore, a building that has gone through this process must provide its users with a better quality of life (Moraes; Quelhas, 2012). Research and studies aimed at preserving cultural heritage must analyze in the first instance the original characteristics of the construction, the physical changes that have occurred over time, the characteristics of the damage caused by anthropogenic transformations and the aging of construction materials (Formisano; Milani, 2019). In Brazil, there is no standard that regulates this practice, which, by ABNT NBR 15575:2013, is defined as updating the building through technological incorporations that aim to increase the useful life of the heritage asset (Negreiros, 2018). Therefore, it is necessary to refine analysis techniques for intervention in historical works in relation to their impact on current society. Knowledge can be realized through different levels of depth in terms of on-site research operations, historical research and experimental investigations. The study of the construction characteristics aims to define a model that allows a qualitative and quantitative interpretation of the structural system to obtain the best intervention proposal with the case study of the Braghetto Bridge.

Keywords: Braghetto Bridge, Urban Infrastructure, Structural Safety and Structural Performance, Aderson Moreira da Rocha.

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Apresentação	22
1.2 Justificativa	24
1.3 Vinculação ao Tema	25
1.4 Objetivo	26
1.5 Metodologia	27
2. ANÁLISE HISTÓRICA E CONSTRUTIVA	28
2.1 Aspectos Históricos e Construtivos da Ponte Braghetto	30
2.2 Revitalização da Ponte do Braghetto em 2018	37
2.3 Geometria e Modelo Estrutural	42
2.4. Aumento do desempenho da capacidade de carga da estrutura de TB36 para TB45.....	50
2.5 Avaliação do Estado Limite Último ELU.....	52
2.6 Análise do Estado Limite de Serviço – Fissuração (ELSW)	61
2.7 Análise do Estado Limite De Serviço – Deformação (ELSD)	62
2.8 Verificação Dos Pilares	66
2.9 Laje de Aproximação e Console de Apoio	72
2.10 Protensão Externa – Verificações	78
2.10.1 Verificações – Viga Longarina	79
2.10.2 Verificações – Viga transversina nos apoios	80
2.10.3 Protensão Externa – Momento Resistente / Estado Limite Último	81
2.10.4 Capacidade Resistente para absorver o esforço de tração (tirante)	82
3. PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO ESTRUTURA	83
3.1 Relatório Fotográfico de Manifestações das Patologias	85
3.2 Metodologia de Recuperação	102
3.2.1 Relatório Fotográfico Recuperação Estrutural	114
4. AVALIAÇÕES DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E DA CURVA DE DESEMPENHO E DEGRADAÇÃO	130
4.1 Avaliação do comportamento estrutural da Ponte Braghetto – EPTT, com a realização de ensaios estático e dinâmico Degradação	130

4.2 Degradação	138
4.3 Vida útil	140
4.4 Inspeção Visual	142
4.5 Desempenho	144
4.4 O Caso da Ponte Braghetto	146
4.CONCLUSÕES	153
5.REFERÊNCIAS	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboço do Plano Piloto de Brasília por Lúcio Costa em 1956	19
Figura 2 – Eixo Monumental e Esplanada dos Ministérios, Brasília/DF.....	22
Figura 3 – Vista aérea da ponte do Braghetto depois da reabilitação	23
Figura 4 - Croqui do Plano Piloto indicação da Ponte do Braghetto em 1956 e vista aérea atual.....	28
Figura 5 – Imagens de satélite comparativa entre os anos de 2008 e 2020	29
Figura 6 – Vista da face inferior do tabuleiro central – danos ocasionados pela humidade	29
Figura 7 - Prof. Aderson Moreira da Rocha.....	31
Figura 8 - Prof. Aderson e seu filho Ângelo ao fundo.....	32
Figura 9 - Detalhe das vigas e tabuleiro da Ponte Braghetto	30
Figura 10 – Vista geral da ponte	33
Figura 11 – Lago Paranoá na época da execução da fundação da Ponte Braghetto	34
Figura 12 - Posição de cabos de protensão entre um apoio e o centro do vão de 60m..	35
Figura 13 - Detalhe da posição de cabos de protensão na zona de tração superior da viga para o vão de 60 m	35
Figura 14 - Detalhe da posição de cabos de protensão da viga para o vão de 60m.....	36
Figuras 15 - Detalhe da posição de cabos de protensão na zona de tração inferior da viga para o vão de 60m	36
Figura 16 - Ponte do Braghetto – Geometria – Modelo 3D e Vista Lateral	38
Figura 17 - Ponte do Braghetto – Geometria – Seção Transversal	39
Figura 18 - Vistoria na face inferior, furos no concreto devido ao impacto de veículos. Diretor do DER em 2018	40
Figura 19 - Vistoria governador Rodrigo Rollemberg na Ponte Braghetto em 02/2018	41
Figura 20 - Ponte do Braghetto e duas novas pontes paralelas	42
Figura 21 - Ponte do Braghetto – Planta de Locação – Pilares, Longarinas e Transversinas	43
Figura 22 - Ponte do Braghetto – Corte, Vista, Seções e Detalhe	44
Figura 23 - Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Vista Isométrica de Topo (Autocad)..	45

Figura 24 - Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Vista Isométrica de Fundo (Autocad)	45
Figura 25 - Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Detalhe do Reforço (Autocad)	46
Figura 26 - Malha de Elementos Finitos (<i>Solid Elements</i>) no Midas-FEA	47
Figura 27 - Malha de Elementos Finitos (<i>Reinforcement Elements</i>) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 1 a 4 nos Apoios Centrais – Projeto Original de 1960	48
Figura 28 - Malha de Elementos Finitos (<i>Reinforcement Elements</i>) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 5 a 7 no Meio dos Vãos – Projeto Original de 1960	48
Figuras 29 - Malha de Elementos Finitos (<i>Reinforcement Elements</i>) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 8 a 11 nos Apoios Centrais – Projeto de Reforço em 1979	49
Figura 30 - Cargas de Veículo – TB45 (Parte 1/2)	50
Figuras 31 - Cargas de Veículo – TB45 (Parte 2/2)	51
Figura 32 - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] no Midas-FEA	53
Figura 32b - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] na Viga Longarina Central	53
Figura 32c - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] na Viga Longarina Central	54
Figura 32d - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] na Viga Longarina Central	54
Figura 32e - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] na Viga Longarina Central em Detalhe	55
Figura 32f - Tensões Normais Sxx [KN/m ²] na Região Comprimida e Posição da Linha Neutra	55
Figura 33 - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>) Esforços na Seção X = 60.3m (Apoio Central)	56
Figura 33a - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 1 – Projeto Original de 1960	57
Figura 33b - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 2 – Projeto Original de 1960	57
Figura 33c - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 3 – Projeto Original de 1960	58
Figura 33d - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 4 – Projeto Original de 1960	58
Figura 34^a - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 8 – Projeto de Reforço de 1979	59
Figura 34b - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 9 – Projeto de Reforço de 1979	59

Figura 34c - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 10 – Projeto de Reforço de 1979.....	60
Figura 34d - CS-COMB2 (<i>Stage2 – Step2</i>). Tensões Normais Sxx [KN/m ²] nos Cabos 11 – Projeto de Reforço de 1979.....	60
Figura 35 - CS-COMB11 (<i>Stage2 – Step2</i>) – Deslocamentos Verticais.....	63
Figura 35a - CS-COMB11 (<i>Stage1 – Step2</i>) – Deslocamentos Verticais. Observação: Majoração na escala de deformações p/ facilitar a visualização	63
Figura 35b - CS-COMB11 (<i>Stage2 – Step2</i>) – Deslocamentos Verticais. Observação: Majoração na escala de deformações p/ facilitar a visualização	64
Figura 36 - Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares). CS-COMB2 – Tensões Verticais \square_{ZZ} [KN/m ²]	66
Figura 36b - Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares P3A a P3D). CS-COMB2 – Tensões Verticais \square_{ZZ} [KN/m ²]	67
Figura 36c - Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares P3A a P3D). CS-COMB2 – Tensões Verticais \square_{ZZ} [KN/m ²]	68
Figura 37 - Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilar P3A). CS-COMB2 – Tensões Verticais \square_{ZZ} [KN/m ²].....	68
Figura 38 - Integração de Esforços – Midas-FEA (Pilar P3A). CS-COMB2 – Tensões Verticais \square_{ZZ} [KN/m ²]	68
Figuras 39 – CS-COMB2 – Dimensionamento de Pilares (P3A) – Parte 1.....	69
Figura 40 - Diag. Momento Mx – Laje de transição – Envoltória Mínima – (kN.m)....	72
Figura 41 - Diag. Momento My – Laje de transição – Envoltória Mínima – (kN.m)....	73
Figuras 42 - ELU-COMB1 / Dimensionamento de Console Curto.....	76
Figura 43 - Cargas utilizadas no dimensionamento	81
Figuras 44 - Acessos de Inspeção da Ponte do Braghetto – Planta e Corte A.....	83
Figura 45 - Acessos de Inspeção da Ponte do Braghetto – Cortes B, C e D. Observação: Figura cortesia do arquiteto Francisco Júnior – DETEC/DE/NOVACAP	84
Figura 46 - Laje Inferior do Tabuleiro Eixos E1 a E2 Furos Existentes (F1 a F5s) Furo – Parcialmente Reparados (RE1 a RE6).....	86
Figura 47 - Furos na Laje Inferior do Tabuleiro (F2, F3 e Furos Reparados)	86
Figura 48 - Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F1)	87
Figura 49 - Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F2)	87
Figura 50 - Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F3)	88

Figura 51 - Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F4)	88
Figura 52 - Furos Existentes e Reparos na Laje Inferior do Tabuleiro	89
Figura 53 - Croqui localização armadura de reforço 1979 (laje inferior)	89
Figura 54 - Laje Superior do Tabuleiro – Eixos E3 a E4 Chapa Metálica p/ Vedar Furo Existente na Laje	90
Figura 55 - Tubulações de Drenagem da Galeria Celular entre VL1 e VL2	90
Figura 56 - Infiltrações de Água e Carbonatação do Concreto. Tubulações de Drenagem Desativadas da Galeria Celular entre VL1 e VL2.....	91
Figura 57 - Tubulações de Drenagem – Infiltrações de Água e Deslocamentos do Concreto. Encontro da Tubulação de Drenagem com Laje de Topo.....	91
Figura 58 - Tubulações de Drenagem - Infiltrações de Água e Deslocamentos do Concreto	92
Figura 59 - Encontro da Tubulação de Drenagem com Laje de Topo.....	92
Figura 60 - Tubulações de Drenagem de Água Pluvial nas Laterais da Pista de Rolamento. (Observação: Grande quantidade de terra, matéria orgânica e plantas)	93
Figura 61 - Tubulações de Drenagem de Água Pluvial nas Laterais da Pista de Rolamento. (Observação: Tubulação totalmente obstruída).....	93
Figura 62 - Deslocamentos do Concreto na Laje Superior. Observação: Locais de acesso (visitas) que foram lacrados	93
Figura 63 - Deslocamentos do Concreto na Laje Superior. Observação: Locais de acesso que foram lacrados.....	94
Figura 64 - Deslocamentos do Concreto na Laje Superior e Armaduras Expostas	94
Figura 65 - Regiões com Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas.....	95
Figuras 66 - Regiões com Concreto Segregado, Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas	96
Figuras 67 - Regiões com Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas Vigas Transversinas de Topo.....	96
Figura 68 - Armaduras Passivas e Cordoalhas de Protensão Expostas Laje Inferior do Tabuleiro (Colisão de Veículos)	97
Figura 69 - Armaduras Passivas e Cordoalhas de Protensão Expostas Laje Superior do Tabuleiro (Quebra da Mísula da Longarina para colocação.....	98
Figura 70 - Trincas na Face Interna das Galerias Celulares.....	98
Figura 71 - Trincas na Face Interna das Galerias Celulares.....	99

Figura 72 - Trincas na Fachada Externa da Ponte.....	100
Figura 73 - Trincas na Laje de Fundo do Tabuleiro da Ponte. (Observação: Sinais de Resina Epóxi para Preenchimento das Trincas no Passado).....	100
Figura 74 - Trincas nas Paredes das Longarinas. Pontos de Infiltração, Carreamento de Material, Ferrugem e Coloração Alaranjada no Concreto	101
Figura 75 - Trincas nas Paredes das Longarinas. Pontos de Infiltração, Carreamento de Material, Ferrugem e Coloração Alaranjada no Concreto	101
Figuras 76 - Recuperação dos Furos na Laje Inferior do Tabuleiro – Eixos E1 a E2..	105
Figura 76b - Recuperação dos Furos na Laje Inferior do Tabuleiro – Eixos E1 a E2.	106
Figura 77 - Recuperação dos Furos na Laje Superior do Tabuleiro – Eixos E3 a E4..	107
Figura 77b - Recuperação dos Furos na Laje Superior do Tabuleiro – Eixos E3 a E4.	108
Figura 78 - Reformulação do Greide – Seção Transversal Antiga e Modificada.....	110
Figura 78b - Reformulação do Greide – Pavimento Elevado e Incorporado.....	111
Figura 79 - Reformulação do Greide – Barreiras Rígidas (Guarda-Corpo).....	112
Figura 80 - Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo Típico – Planta	112
Figura 81 - Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo Típico – Seção A.....	113
Figura 82 - Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo 1 a 3 – Armadura.....	113
Figura 83 - Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo 4 a 6 – Armadura.....	114
Figura 84 - Reformulação do Greide – Piso Incorporado – Tela na Face Superior.....	114
Figura 85 - Armadura novas vigas de apoio a protensão	115
Figura 86 - Tratamento de trincas nas vigas existentes e perfurações das passagens dos cabos de protensão	115
Figura 87 - Abertura da visitas e tratamento do concreto com jateamento de água	116
Figura 88 - Tratamento do concreto com jateamento de água.....	116
Figura 89 - Tratamento de trincas	117
Figura 90 - Fiação de armadura das Barreiras de concreto com epóxi	118
Figura 91 - Retirada da pavimentação existente e regularização do tabuleiro	118
Figura 92 - Retirada da pavimentação existente e regularização do tabuleiro	119
Figura 93 - Armadura das novas vigas.....	119
Figura 94 - Execução vigas transversinas internas	120

Figura 95 - Tratamento de trincas área interna	120
Figura 96 - Recuperação dreno	121
Figura 97 - Recuperação dreno	121
Figura 98 - Abertura no tabuleiro.....	122
Figura 99 - Tratamento de trincas com resina epóxi	122
Figura 100 - Tratamento de trincas com resina epóxi.....	123
Figura 101 - Cabos de protensão novos	123
Figura 102 - Restauração da laje inferior	124
Figura 103 - Reforço nos pilares etapa 1	124
Figura 104 - Reforço nos pilares etapa 2	125
Figura 105 - Concretagem reforço nos pilares	125
Figura 106 - Detalhe da execução da armadura de reforço dos pilares	126
Figura 107 - Detalhe da concretagem da camada de recobrimento de reforço dos pilares	126
Figura 108 - Detalhe da concretagem da camada de recobrimento	127
Figura 109 - Execução de tratamento na laje inferior	127
Figura 110 - Instalação de enscadeira para tratamento na parte submersa dos pilares	128
Figura 111 - Concretagem reforço dos pilares	129
Figura 112 - Vista laje inferior e pilares restaurados	129
Figura 113 - Equipe de técnicos Novacap e DER/DF no teste de carga da Ponte Braghetto em 2019	132
Figura 114 - Desenho esquemático ensaios	133
Figuras 115 - Desenho esquemático ensaios.....	133
Figura 116 - Caminhões caçambas carregados com 30 toneladas	134
Figura 117 - Caminhões caçambas carregados com 30 toneladas	134
Figura 118 - Equipamentos para leitura dos valores prova de carga	135
Figura 119 - Sensores instalados no ensaio.....	136
Figura 120 - Sensores instalados no ensaio.....	137
Figura 121 - Sensores instalados na parte inferior da ponte	137
Figura 122 - Distribuição de OAE por Unidade Federativa do Brasil.....	138

Figura 123 - Segregação das AOE's segundo nota final obtida na inspeção	139
Figura 124 - Critério aplicado a inspeções visuais para percepção do desempenho ao longo do tempo.....	143
Figura 125 - Desempenho ao longo do tempo	144
Figura 126 - Desempenho x Tempo processos de recuperação	145
Figura 127 - Degradação dos parâmetros da matriz de rigidez da estrutura.....	146
Figura 128 - Curva de Desempenho e Indicador de Degradação do Sistema Estrutural	147
Figuras 129 - Modelo estrutural da Ponte do Braghetto.....	148
Figura 130 - Modelo estrutural da Ponte do Braghetto.....	148
Figura 131 - Danos na laje inferior do caixão perdido.....	149
Figura 132 - Vista interna da laje caixão. Turma de Patologia das Estruturas do PPG-FAU-UnB.....	149
Figura 133 - Desempenho especial da Ponte Braghetto.....	151

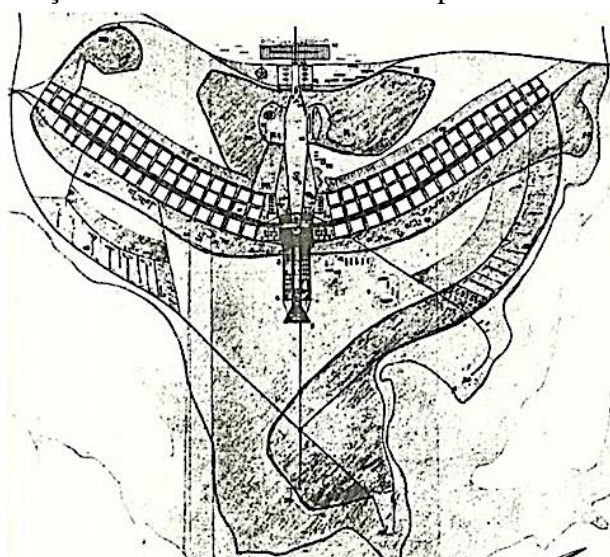
LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado Limite de Serviço – Fissuração (ELSW) – Tabela Resumo das Análises	59
Tabela 2 – Estado Limite de Serviço – Deformação (ELSD) – Tabela Resumo das Análises	641
Tabela 3 – Deformações no Vão Central p/ Diversas Combinações de Carga	65
Tabela 4 – CS-COMB2 – Dimensionamento de Pilares (P3A) – Parte 2	67
Tabela 5 – Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade	139
Tabela 6 – Indicador de Degradação - Ponte do Braghetto.....	150

1. INTRODUÇÃO

Lúcio Costa tinha uma própria concepção de monumentalidade, no sentido da expressão palpável do espírito, da essência e das questões imateriais do projeto da cidade nova. A implantação monumental de Brasília na região Centro-Oeste do país se articula em dois eixos principais que se cruzam em ângulo reto, sendo o monumental, que desce para o lago Paranoá, e o eixo rodoviário, que cruza a cidade inteira de norte a sul. A partir desses dois traçados principais, a cidade se expandiu (Figura 1).

Figura 1 – Esboço do Plano Piloto de Brasília por Lúcio Costa em 1956



Fonte:

O modernismo internacional, concebido com o objetivo de manifestar o otimismo de uma nova era por meio da arquitetura, a mais alta forma de expressão artística, fundamentou uma outra compreensão das qualidades espaciais, utilizando inovações tecnológicas e estruturais (Macdonald, 2007). No panorama brasileiro, a arquitetura moderna de Brasília, autêntica, assinada pelos arquitetos Oscar Niemeyer e Lúcio Costa, se consagrou patrimônio histórico e artístico nacional pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), criado no final da década dos anos 30 (Bispo, 2014). As arquiteturas de Brasília propiciaram muitas realizações importantes na área de engenharia das estruturas, sendo muitas delas originais e inovadoras para a época da execução.

Na implantação da infraestrutura urbana do Plano Piloto, pontes e viadutos são significativos para a concepção de Brasília, pois mostram que a importância da infraestrutura urbana está relacionada à segurança e ao desempenho estrutural dos elementos que sustentam o porte do tráfego viário que, diariamente, se articula na capital do Brasil.

A ponte Braghetto, também referida como Ponte do Braghetto, é uma ponte rodoviária sobre o lago Paranoá, em Brasília, no Distrito Federal. Liga a Asa Norte ao Lago Norte e região norte do Distrito Federal, como Planaltina e Sobradinho. A ponte marca o extremo norte do Eixo Rodoviário de Brasília. Ao norte da ponte, existem a DF-007, conhecida como Estrada Parque Torto (EPTT), que dá acesso à Granja do Torto e à DF-003; e a DF-005, denominada Estrada Parque Península Norte (EPPN), que atende o Lago Norte. O tráfego diário sobre a ponte é de cerca de 100 mil veículos, o que ocasionava congestionamentos nos horários de pico, mesmo com o acréscimo de duas faixas de rolamento. Por isso, mais recentemente, o projeto de aumento da capacidade de tráfego no local, com a construção do Trevo de Triagem Norte. A ponte do Braghetto é a única ponte sobre a parcela norte do lago Paranoá, enquanto existem 3 pontes no Lago Sul: a primeira ponte, ou Ponte das Garças, a segunda ponte, ou ponte Costa e Silva, e a terceira ponte, ou ponte Juscelino Kubistchek.

O que é infraestrutura urbana?

[...] Infraestrutura urbana pode ser conceituada como um sistema técnico de equipamentos e serviços necessários ao desenvolvimento das funções urbanas, podendo estas funções ser vistas sob os aspectos social, econômico e institucional. Sob o aspecto social, a infraestrutura urbana visa promover adequadas condições de moradia, trabalho, saúde, educação, lazer e segurança. No que se refere ao aspecto econômico, a infraestrutura urbana deve propiciar o desenvolvimento das atividades produtivas, isto é, a produção e comercialização de bens e serviços. E sob o aspecto institucional, entende-se que a infraestrutura urbana deva propiciar os meios necessários ao desenvolvimento das atividades político-administrativas, entre os quais se inclui a gerência da própria cidade (Zmitrowicz, 1997).

Devido aos excessivos custos, necessários para a implantação das vias e rodovias que constituem esse subsistema, a manutenção se tornou um elemento imprescindível para o planejamento das obras infraestruturais.

Observando o cenário dos últimos anos, acerca das intervenções urbanas nas infraestruturas rodoviárias, a necessidade de efetuar a requalificação estrutural de uma

Obra de Arte Especial, seja ela uma ponte ou viaduto, tem sido em grande parte induzida por fatores de escassez de manutenção que, por sua vez, geraram uma situação de precariedade dos espaços urbanos limítrofes. Essa urgência foi acompanhada pela necessidade, cada vez mais expressiva, de reconstruir ou re-funcionalizar o patrimônio existente que sofreu ou passou por uma situação de deterioração mais ou menos grave.

Devido às circunstâncias vividas nos últimos tempos na capital brasileira, a pergunta sobre intervenção, manutenção e preservação do patrimônio cultural precisa de uma resposta adequada, a partir de uma contextualização teórica sobre o panorama das discussões acerca da prática preservacionista, voltada para as obras modernistas de infraestrutura urbana (Galimi *et al.*, 2020, p.144). Portanto, permanece a questão sobre como agir no patrimônio construído, ainda mais quando o assunto está intimamente relacionado à segurança pública e às vidas humanas.

Com o objetivo de registrar as alterações realizadas na Ponte desde a sua construção de 1960 a 2021, período que compreende o projeto e concepção com autoria do prof. Aderson Moreira da Rocha, as intervenções, inovações técnicas importantes, informando as atividades de investigação da estrutura, deformações e deslocamentos, mapeamento de anomalias e ensaios “*in loco*”, os históricos das operações de manutenção da Ponte do Braghetto, até a reabilitação e ampliação com a implantação do Trevo de Triagem Norte.

Na capital modernista, temos exemplos de intervenções de reabilitação de infraestrutura urbana de forma eficiente, segura e economicamente sustentável, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Eixo Monumental e Esplanada dos Ministérios, Brasília/DF



Fonte: Jornal de Brasília, 2019.

1.1 Apresentação

O caso da reabilitação da ponte Braghetto (Figura 3) representa um firme ponto de partida para as futuras operações de manutenção do patrimônio da capital brasileira. Cabe ressaltar que a ponte, com aproximadamente 62 anos de idade, foi executada em concreto protendido e armado e já foi objeto de reforço nos apoios em face do surgimento de fissuras nas vigas principais (conforme consta nos documentos elaborados pelo professor Aderson Moreira da Rocha, datados de 1979), pois é destinada para a realização de grande parte dos deslocamentos Sul-Norte e vice-versa, sendo considerada uma das principais artérias viárias de Brasília tanto em termos de importância no que tange à estrutura urbana (Holanda, 2002; Barros, 2006; Medeiros, 2013) quanto em termos de volume veicular (Barros, 2006).

Figura 3 – Vista aérea da ponte do Braghetto depois da reabilitação



Fonte: o autor, 2019.

Ligado a esse conceito, a arquitetura deve preservar o papel de integridade, segurança e desempenho da obra por meio de intervenções atentas. O termo “retrofit”, aplicado à construção civil, se refere às práticas empregadas para requalificação funcional de edificações existentes que, devido ao tempo ou à falta de manutenção, se tornaram obsoletas. No projeto de reabilitação, a estrutura deve ser calculada de modo que seja segura e durável, levando em consideração tanto a manutenção periódica pós-modernização quanto o respeito pelo meio ambiente (Ueda; Shimomura, 1999). De acordo com Barrientos (2004), o retrofit, considerado como o “renascimento no lugar da destruição”, é aquele conjunto de ações voltadas para reabilitação tecnológica de um edifício. Esse conceito, corroborado por Vale (2006), determina que a principal finalidade seja o reestabelecimento do antigo desempenho perdido ao longo da vida útil. Portanto, uma edificação que passou por esse processo deve propiciar aos seus usuários uma melhor qualidade de vida (Moraes; Quelhas, 2012). A ponte Braghetto foi concebida juntamente

ao projeto da cidade e, pela tecnologia da protensão parcial, representa um avanço do ponto de vista estrutural e construtivo da época.

1.2 Justificativa

A importância estruturadora da ponte do Braghetto centraliza a ideia da circulação viária da cidade, permitindo aos usuários de Brasília rápido acesso ao extremo norte da capital.

A seguir, será apresentado um breve histórico das atividades relacionadas ao projeto, ensaios de campo e reforços realizados na ponte do Braghetto ao longo dos anos em ordem cronológica:

- Projeto Estrutural – Sistema Construtivo em Concreto Protendido, adotando-se protensão parcial de aderência posteriormente desenvolvida (bainhas metálicas e injeção) e ancoragens do sistema Freyssinet combinado com armaduras frouxas de aço Torstahl (CA-T50) de autoria do professor Aderson Moreira da Rocha;
- Execução do Projeto da Ponte em 1960 pela Sociedade de Engenharia e Terraplanagem (SETAL);
- Pelo fato de ter sido a primeira ponte brasileira concebida dentro do sistema de protensão parcial e pela falta de experiência nesse setor na época da construção (1960), houve deformação excessiva pela fluência do concreto que, entretanto, não chegou a prejudicar a segurança da obra;
- Com o passar do tempo, as deformações passaram a exigir correções do nivelamento com a execução de enchimentos na laje de rolamento que, por sua vez, aumentaram as cargas permanentes e ampliaram ainda mais as fissuras e as flechas. Essa condição tornou-se insustentável em 1979, quando foi executado um reforço das seções do apoio com a introdução de 8 cabos de 4 cordoalhas de 12,7 mm por viga de apoio. Vale ressaltar que esse reforço não teve intenção de corrigir problemas com deformabilidade;
- Modificações realizadas na plataforma viária com redução das áreas de passeio público e canteiro central para ampliar duas faixas destinadas a veículos provocaram um aumento das solicitações na estrutura com

comportamento estrutural já prejudicado pelas deformações excessivas e estado de fissuração intenso;

- No período de julho a dezembro de 1998, foram iniciadas uma série de atividades de investigação da estrutura, nivelamento topográfico, mapeamento de anomalias e ensaios “*in loco*” para determinar o real estado em que a ponte do Braghetto se encontrava. Essas atividades foram realizadas pela empresa Concremat Engenharia;
- A partir de 2016, execução da reabilitação da ponte Braghetto e implantação do Trevo de Triagem Norte que acrescenta duas novas pontes laterais.

Dado o histórico de evolução tecnológica aplicada à obra de arte da ponte Braghetto, este trabalho contribui com o registro histórico dessa evolução, observando os aspectos construtivos e estruturais das intervenções realizadas na ponte desde sua construção.

1.3 Vinculação ao Tema

O caso da ponte despertou um novo olhar para discutir sobre preservação do patrimônio e do ambiente construído. Tratando-se de uma obra prima, seja pela sua importância histórica, seja pela funcional, as instâncias para elaborar considerações de intervenção devem passar por uma análise crítica bastante delicada. A ponte Braghetto, obra da arquitetura modernista brasileira, deve ser classificada como monumento e, portanto, como objeto passível de restauração e nova função estrutural. Esse entendimento ajuda na formulação de teorias e práticas preservacionistas sobre o objeto arquitetônico em questão. A pesquisa tem a finalidade de avaliar as diferenças entre as condições físicas e mecânicas da ponte Braghetto, passando pelo conceito histórico e inovações tecnológicas à época da sua introdução, pelas intervenções e ampliações, para, assim, poder colaborar na criação de uma metodologia para aplicação de manutenção permanente na infraestrutura urbana.

Após a reabilitação, foi demonstrado que é possível retomar a linguagem arquitetônica originária do pensamento do arquiteto Lúcio Costa, por meio de intervenções adequadas que proporcionem mais segurança para os utentes da

infraestrutura urbana e maior vida útil dos materiais: a implementação de novas tecnologias estruturais pelos projetistas para que o conjunto estrutural da ponte alcançasse maiores resistências e durabilidade; o aumento do revestimento de concreto armado melhora a proteção às armaduras, a resistência e o desempenho da estrutura; e o reforço transversal com engrossamento das vigas melhora a resistência ao cisalhamento. A solução implementada se tornou a mais viável, sob o ponto de vista de segurança pública, preservação do patrimônio moderno de Brasília ao longo do efeito do tempo, linguagem arquitetônica modernista, ambiental e situação orçamentária. O que deve guiar a intervenção é, portanto, um juízo crítico de valor, ideia presente já no pensamento da Carta de Veneza de 1964. A autenticidade da ponte Braghetto, projetada pelo professor Aderson Moreira da Rocha, associada à verdadeira obra de arte da criatividade humana, realça a importância desse trecho viário através da história de Brasília e dos brasilienses.

1.4 Objetivo

A Pesquisa tem como objetivo geral apresentar o histórico de intervenções e reabilitações permanentes na infraestrutura do patrimônio de capital brasileira, fornecendo recomendações que possam se estender às obras de infraestrutura urbana tombada. Em particular, são retratadas as diferenças comportamentais entre as condições físicas e mecânicas da ponte Braghetto, abrangendo os aspectos históricos e construtivos antes da reabilitação e depois da obra de revitalização, com apresentação de modelos estruturais gerados via análise de elementos finitos.

Os objetivos específicos são:

- Levantamento da documentação técnica da ponte Braghetto;
- Avaliação das diferenças entre as condições físicas e mecânicas da ponte Braghetto em suas fases distintas da vida útil;
- Análise estrutural – baseada na sua história, projetos, tecnologia construtiva e intervenções;
- Emprego de metodologia para aplicação manutenção permanentes na infraestrutura urbana.

1.5 Metodologia

Trata-se de uma pesquisa descritiva que inicialmente realiza uma revisão bibliográfica sobre o tema, com o intuito de corroborar, por meio de leitura e análise de material impresso ou digital, os aspectos históricos e a importância da obra de Reabilitação da Ponte Braghetto.

Serão analisados, por meio desta pesquisa, os projetos mais relevantes, em uma abordagem focada nas características estruturais da Ponte Braghetto, que representa um papel de destaque no desenvolvimento técnico e tecnológico da solução de protensão parcial, adotada pela primeira vez em pontes no Brasil.

A avaliação estrutural da obra escolhida é feita com uma abordagem interdisciplinar, para que sejam analisados todos os aspectos pertinentes à obra em questão. Essa avaliação seguirá as seguintes etapas (adaptado de Moreira, 2007):

- Pesquisa histórica;
- Descrição dos materiais e técnicas da construção;
- Descrição da estrutura em seu estado atual;
- Identificação do Sistema Estrutural;
- Análise do Modelo Estrutural; e
- Comparativo com a evolução dos critérios de durabilidade e vida útil.

2. ANÁLISE HISTÓRICA E CONSTRUTIVA

A criação de Brasília foi caracterizada pela arquitetura modernista internacional e o marco para forma e expressão artística. O planejamento urbano e paisagístico fundamentou a compreensão das qualidades espaciais, utilizando inovações construtivas tecnológicas e estruturais. Época de muitas contribuições na construção civil, levando principalmente a arquitetura e a engenharia de estruturas a soluções originais e inovadoras para a época da execução. Neste recorte, a Ponte Braghetto, primeira ponte construída sobre o lago Paranoá, “Grande Viaduto sobre o lago em Brasília” como pode ser visto na Figura 4, é uma das treze obras de arte especiais (OAE) que compõem o trevo de triagem norte, essa transposição sempre foi peça importante no planejamento viário, atendendo a necessidade de futuras operações e manutenção do patrimônio da capital brasileira. Considerada uma das principais artérias viárias de Brasília tanto em termos de importância, no que tange à estrutura urbana, quanto em termos de volume veicular, sua representação já podia ser vista nos croquis iniciais de Lúcio Costa e Oscar Niemayer.

Figura 4 – Croqui do Plano Piloto indicação da Ponte do Braghetto em 1956 e vista aérea atual



Fonte: <https://revistamdc.files.wordpress.com/2011/02>.

Com 180 metros de passagem aérea e 32 metros de largura, não só a ponte, mas toda a região ao entorno foi alterada por causa do aumento de trânsito. As duas imagens de satélite comparativas apresentadas na Figura 5 registram as intervenções entre os anos de 2008 e 2020 e toda a requalificação da infraestrutura urbana para adaptação do tráfego.

Figura 5 – Imagens de satélite comparativa entre os anos de 2008 e 2020



Fonte: Google Earth, acesso em 10 fev. 2023.

Construída em 1961 e estruturada em concreto armado com laje de tabuleiro em protensão parcial, faz parte do acervo de projetos do engenheiro calculista Aderson Moreira da Rocha, referência técnica a toda comunidade científica brasileira. Sob administração do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER), tanto o trevo como principalmente a ponte foram estrangulados pelo crescimento da capital. Mesmo com manutenções programadas para manter o desempenho, o desgaste natural dos materiais, ação de intempéries e o ambiente externo da região fizeram com que o nível de degradação fosse cada vez maior, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Vista da face inferior do tabuleiro central – danos ocasionados pela humidade



Fonte: o autor, 2023.

Não só a recuperação do estado de conservação, mas o aumento necessário da sobrecarga de uso foi a base do planejamento da obra de intervenção. É inegável que o

acesso norte da cidade de Brasília depende em grande parte do desempenho da Ponte Braghetto, motivo pelo qual há manutenção permanente evitando ao máximo a degradação de suas partes. Esses tipos de OAE's podem causar grandes transtorno financeiros e operacionais caso sejam paralisados, portanto, seu desempenho deve ser especial quanto aos critérios de aparência, funcionalidade de segurança.

2.1 Aspectos Históricos e Construtivos da Ponte Braghetto

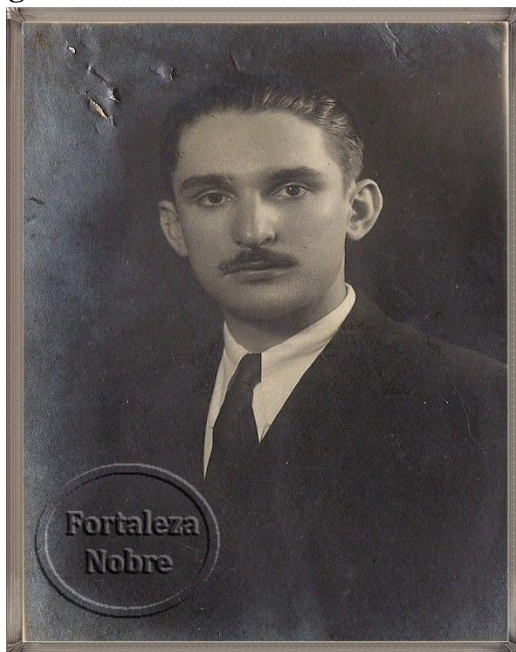
As informações descritas a seguir foram obtidas do sítio eletrônico Fortaleza Nobre¹, postado por Leila Nobre, do relatório técnico da Empresa WRJ Ltda. e da Estrutura Revista Técnica das Construções.

A Ponte Braghetto, chamada de “O Grande Viaduto sobre o Lago de Brasília”, foi executada, em 1960, pela SETAL com projeto do professor Aderson Moreira da Rocha.

O Dr. Aderson Moreira da Rocha nasceu em Fortaleza, no dia 12 de abril de 1911, formado em Engenharia pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro, foi professor catedrático da Escola de Arquitetura e da Escola de Engenharia da hoje Universidade Federal do Rio de Janeiro. Filho de uma tradicional família do Ceará, inclusive muito ligada à política local, seu pai, Dr. Manoel Pereira da Rocha, foi Deputado e chefe político no Ceará durante muitos anos. Era um homem que tinha uma grande bravura pessoal e recebeu a alcunha, pela qual era muito conhecido no estado, de “Manuel Onça”, justamente pela sua combatividade. O professor Aderson tinha irmãos militantes políticos, como, por exemplo, Crisanto Moreira da Rocha, que foi Deputado Federal em várias legislaturas e fundador da Casa do Ceará, uma benemérita instituição em Brasília, que presta serviços a pessoas mais necessitadas; Acrísio Moreira da Rocha, Prefeito de Fortaleza por dois mandatos e interventor no Ceará no período do Estado Novo; Péricles Moreira da Rocha, que foi Deputado Estadual em várias legislaturas no Ceará e outros irmãos que se destacaram em várias atividades profissionais.

¹ Disponível em: fortalezanobre.com.br/2012/06/aderson-moreira-da-rocha-um-brilhante. Acesso em:

Figura 7 – Prof. Aderson Moreira da Rocha



Fonte: fortalezanobre.com.br.

O professor Aderson Moreira da Rocha foi, ainda, professor *honoris causa* de várias universidades estrangeiras, ajudou a organizar e foi fundador do curso de Engenharia da Universidade de Brasília, fundou várias revistas técnicas que difundiam artigos, principalmente sobre cálculo estrutural e sobre concreto armado, formou grande contingente de calculistas que dele receberam segura orientação técnica e profissional sendo um dos responsáveis pela massificação do uso do concreto armado no Brasil. Inclusive o cálculo da primeira ponte sobre o lago Paranoá.

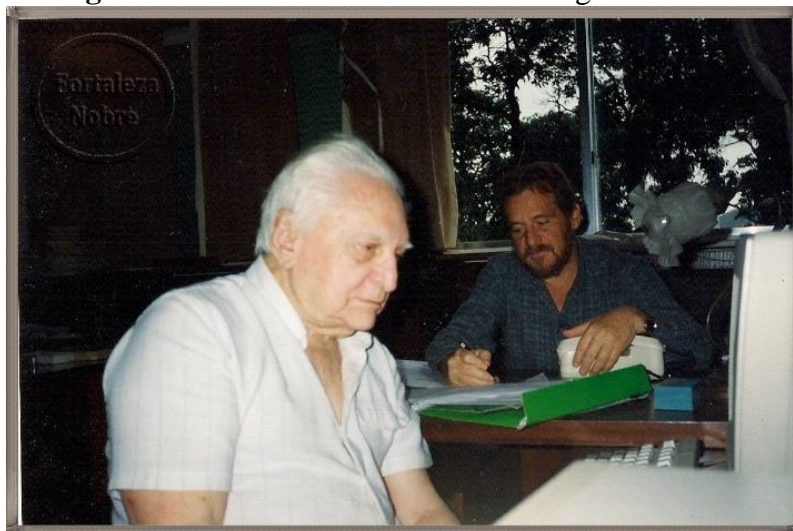
Aderson Moreira da Rocha teve quatro filhos: Aderson, Ângelo, Zé Mauro e Claudio. Foi o único dos irmãos que não foi político, mas que teve uma carreira brilhante e, até hoje, é conhecido por todos os engenheiros civis que se formaram até o final da década de 90 (em particular), principalmente por seus livros didáticos que, por muito tempo, eram os únicos especializados e vendidos para o exterior. Seu extenso currículo já foi publicado em várias revistas especializadas, no CREA e no clube de Engenharia onde era homenageado quase todos os anos.

Em 20 de abril de 1934, após vitorioso em concurso público, foi nomeado Engenheiro da Prefeitura do Distrito Federal, à época na cidade do Rio de Janeiro. No dia 09 de setembro de 1967, ocorreu reunião do Conselho Universitário, tendo o reitor

Fernando Leite propôs os nomes de Aderson Moreira da Rocha e Tarso Dutra para Doutores *Honoris Causa* pela Universidade Federal do Ceará; também é patrono da cadeira 2 da Academia Nacional de Engenharia (ANE Brasil).

Professor Aderson Moreira da Rocha faleceu no dia 25 de janeiro de 1996, na cidade do Rio de Janeiro.

Figura 8 – Prof. Aderson e seu filho Ângelo ao fundo



Fonte: fortalezanobre.com.br.

Conforme informações colhidas em artigos publicados pelo próprio autor do projeto estrutural na Revista ESTRUTURA e Técnica das Construções, entre as três propostas da SETAL, a solução vencedora do concurso promovido pela Divisão de Viação da Novacap representava a introdução de algumas inovações técnicas importantes, como a protensão parcial na Viga de Caixa Celular da superestrutura e o sistema de pilares extremos em articulações Freyssinet no topo e na base.

A estrutura é constituída por um tabuleiro celular com vão central de 60 metros, dois vãos laterais de 50 metros e balanços de 10 metros em cada extremidade que eliminaram os arrimos de contenção. Esse tabuleiro foi projetado ligado com os pilares centrais formando uma estrutura em quadros rígidos. Segundo critério estabelecido pelo autor, a proporção dos vãos foi escolhida com a condição de momentos nulos nos pilares centrais dos quadros rígidos sob a ação das cargas permanentes. Conforme dados do projeto original, o tabuleiro seria formado por 11 vigas principais com alma de 15cm de espessura e altura variando de 2,22m a 2,40m, espaçadas a cada 3,26m. Com a laje

Figura 11 – Lago Paranoá na época da execução da fundação da Ponte Braghetto



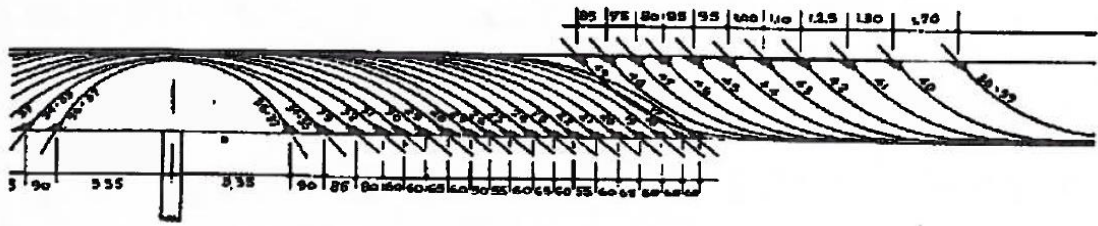
Fonte: Google arquivo histórico de Brasília.

Conforme o artigo da revista *ESTRUTURA*, de 1961, foi adotado: “O sistema construtivo de concreto armado protendido, ou seja, adotando-se uma protensão parcial com aderência posteriormente desenvolvida (bainhas metálicas e injeção e ancoragens do sistema Freyssinet).” Esse sistema difere do clássico concreto protendido, segundo as ideias pluristas de Freyssinet, pelo fato de se ter adotado armaduras frouxas de aço Torstahl (CA-T 50) em combinação com aço protendido.

O processo construtivo empregado no grande viaduto sobre o lago em Brasília é precursor de uma nova técnica destinada a revolucionar os conceitos de concreto protendido. De fato, no concreto armado protendido, segundo o projeto do prof. Aderson Moreira da Rocha, parte-se de um conceito mais amplo em que a protensão se destina a realizar um diagrama de esforços capaz de reduzir o diagrama total da maneira que mais convier ao projeto estrutural. Não há mais que se preocupar em eliminar as tensões de tração em todos os pontos da estrutura. Essas tensões poderão existir, uma vez que se dispõe de armaduras frouxas, sendo o cálculo da estrutura feito pelo processo de ruptura (Estádio III), em que colaboram as armaduras frouxas e protendidas. O concreto armado protendido, portanto, tem como casos particulares o concreto armado (ausência de armaduras protendidas) e o concreto protendido clássico (ausência de armaduras frouxas).

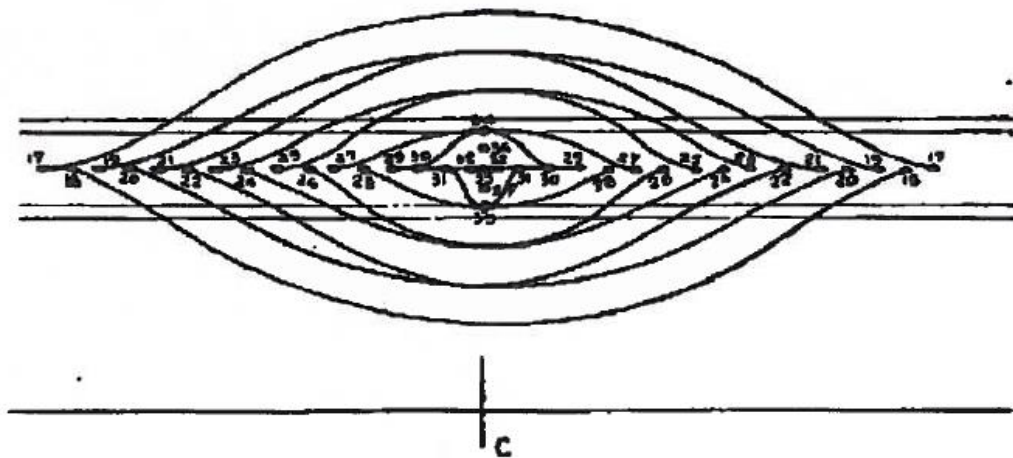
No caso da ponte sobre o lago em Brasília, foi adotada uma protensão de modo a realizar um diagrama proporcional ao peso próprio, com armaduras protendidas, como mostram as Figuras 12, 13, 14 e 15, em que se nota uma certa semelhança com a armadura do concreto armado clássica.

Figura 12 – Posição de cabos de protensão entre um apoio e o centro do vão de 60 m



Fonte: , .

Figura 13 – Detalhe da posição de cabos de protensão na zona de tração superior da viga para o vão de 60 m



Fonte: , .

A fim de reduzir o número de cabos de protensão, o seu cálculo foi realizado com o critério de absorver apenas 90% dos esforços oriundos das cargas permanentes, deixando-se o restante para serem resistidas pelas armaduras frouxas, estas, calculadas pelo processo de rutura.

Os coeficientes de segurança adotados foram de 1,2 para a carga permanentes e 2,2 para as cargas móveis, frenagem, ação do vento e variação de temperatura, em vez dos valores de 1,65 e 2,00 respetivamente, já preconizados pela NB-1, publicada em 1960.

O projeto especifica o uso de concreto com resistência de corpos cilíndricos aos 28 dias, preconizados na Norma Brasileira de 300kgf/cm²; as armaduras protendidas de procedência, da Belgo Mineira, com rutura de 14.000kgf/cm²; e as armaduras frouxas de aço Torstahl com escoamento de 5.000kgf/cm².

Comentando sobre a construção da obra, o artigo menciona que a protensão foi realizada pela assistência da firma STUP, não tendo sido registrada qualquer anormalidade tanto na colocação das bainhas como na protensão prontamente dita. Com o prazo efetivo de execução de 5 meses, demonstrou-se a grande facilidade executiva oferecida pelo projeto, caracterizando-se em mais um recorde em obras dessa natureza.

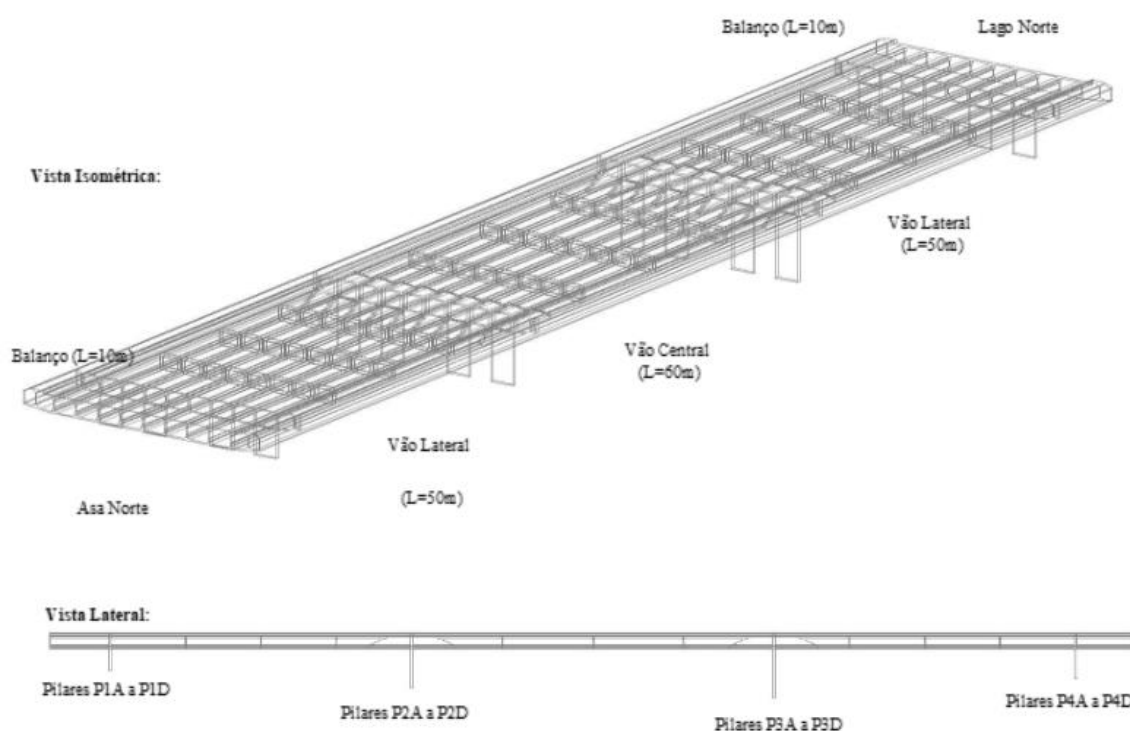
2.2 Revitalização da Ponte do Braghetto em 2018

Como dito anteriormente, o projeto estrutural de autoria do prof. Aderson Moreira da Rocha foi executado em 1960 com sistema construtivo em concreto protendido adotando-se protensão parcial com ancoragens do sistema Freyssinet e aderência posterior, utilizando-se bainhas metálicas e injeção de calda de cimento. Nesse sistema, não há a necessidade de eliminar todas as tensões de tração na estrutura somente com a armadura de protensão, uma vez que existem armaduras passivas (CA-T50), sendo o cálculo feito por processo de ruptura (estágio III) com a colaboração das armaduras passivas e protendidas, admitindo-se tensões normais de tração e fissuras com abertura máxima de 0.2 mm.

A Figura 16 mostra o tabuleiro da ponte que é representado por um estrado celular com largura total de 35 metros, vão central de 60 metros, dois vãos laterais de 50 metros

e balanços de 10 metros nas extremidades. A ponte apresenta quatro linhas de pilares compostas por quatro pilares cada com seção $50 \times 326 \text{ cm}^2$ e vigas longarinas protendidas com altura de 230cm e alma com espessura variando de 18 a 24cm. As lajes superior e inferior dos tabuleiros possuem espessuras de 13cm e 10cm respectivamente. Sobre os apoios e nas extremidades dos balanços existem vigas transversinas com altura de 230cm, bem como existem 3 transversinas intermediárias ao longo de cada um dos vãos central e laterais, que servem de travamento entre as vigas laterais.

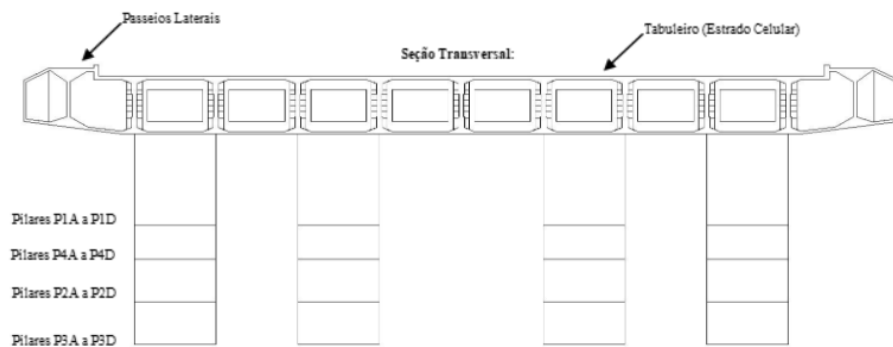
Figura 16 - Ponte do Braghetto – Geometria – Modelo 3D e Vista Lateral



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

O projeto de reabilitação estrutural foi realizado em 2018 pela equipe do Escritório R.A. Rocha, coordenado pelos engenheiros Glaucyo Santos, Renato Menin e Rubens Rocha. Para a análise da documentação técnica – memórias de cálculo, desenhos de fundação, formas e armaduras –, foram consideradas as prescrições das normas técnicas pertinentes, em particular as NBR 7187:2003, NBR 7188:2013, NBR 6122:2010 e NBR 6118:2014.

Figura 17 – Ponte do Braghetto – Geometria – Seção Transversal



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Conforme mencionado na publicação de autoria do professor Augusto Carlos de Vasconcelos CDD-691.30981 – O Concreto no Brasil, Professores – Cientistas – Técnicos, Vol. II:

A primeira ponte sobre o Lago Paranoá em Brasília apresenta a característica de ter sido a primeira obra brasileira concebida dentro de sistema de protensão parcial. Pela falta de experiência nesse setor à época de sua construção (1960) houve deformação excessiva causada por fluência do concreto que, entretanto, não chegou a prejudicar a segurança da obra.

Com o passar do tempo, as deformações excessivas no tabuleiro da ponte exigiram correções do nivelamento com a execução de enchimentos que por sua vez acabaram gerando um aumento de cargas permanentes que acabaram ampliando as flechas e fissuras na estrutura. Simultaneamente, modificações na plataforma viária com a redução dos passeios e canteiro central para ampliar as faixas de passagem de veículos levaram a um aumento ainda maior das solicitações. Como já mencionando, anteriormente, para solucionar essa situação, foi executado em 1979 um projeto de reforço nos apoios centrais da ponte pelo próprio Aderson Moreira da Rocha com a introdução de 8 cabos protendidos de 4 cordoalhas de 12.7 mm por viga longarina de apoio.

Em virtude dessas deformações observadas desde a sua inauguração, bem como devido à existência de pontos com deslocamentos do concreto e exposição da armadura, furos no concreto devido ao impacto de veículos e outras situações que causam desconforto ao usuário, foi solicitado pelo DER/DF uma avaliação do ponto de vista estrutural do estado em que se encontrava a Ponte Braghetto via modelo computacional;

em função dos resultados obtidos, foram propostos tratamentos para reforço e restauração da estrutura conforme será apresentado ao longo da dissertação.

A Ponte Braghetto passou por um trabalho de vistoria logo depois que parte do viaduto do Eixão Sul (Galeria dos Estados) desabou, em 6 de fevereiro de 2018. Durante a inspeção, um grupo de trabalho formado por técnicos do DER e Novacap avaliou a estrutura das vigas que sustentam a ponte construída na década de 1960.

Figura 18 – Vistoria na face inferior, furos no concreto devido ao impacto de veículos. Diretor do DER em 2018



Fonte: o autor, 2024.

A conclusão, segundo o Diretor Geral do DER/DF, recém-empossado à época, professor de Patologia de Estruturas do PPG-FAU-UnB, Márcio Buzar, foi de que a ponte é segura. Em março do mesmo ano, a construção foi indicada pela Defesa Civil como uma das cinco obras em estado grave de conservação, esse fator e mais a queda de parte do viaduto da Galeria dos Estados gerava um grande temor da população do Distrito Federal usuários da via e pressionava o governo de Brasília para que fosse tomada uma decisão rápida e definitiva sobre a Ponte Braghetto.

No contrato firmado para construção do Trevo de Triagem Norte entre o Governo de Brasília e a VIA Engenharia, iniciado e paralisado ainda na gestão do governador Agnelo, estava prevista a demolição total da Ponte Braghetto e construção de uma nova ponte, não sendo realizados, nos projetos preliminares e projeto básico, um estudo mais específico sobre a situação real da estrutura da Ponte Braghetto, fato que somente ocorreu

em 2018, bem como avaliações estruturais de impactos ambientais e de trânsito que poderiam ser ocasionados por causa da demolição completa da estrutura, também não constava no contrato os valores dessas intervenções, pois havia três opções de execução, não previstos no orçamento da obra esses custos, o que poderia tornar inviável a execução no contrato vigente, causando ainda mais transtornos à população, além do custo financeiro, também podemos citar o fator histórico da obra de arte, com projeto do professor Aderson Moreira da Rocha.

O governador de Brasília Rodrigo Rollemberg (2015-2018) então se posicionou favorável ao projeto de reforço estrutural e reforma da Ponte Braghetto, sem a necessidade de demolição da estrutura existente, demonstrando sua confiança na Diretoria do DER/DF e em seu corpo técnico, que estavam engajados no projeto de restauração sem a necessidade de demolição total da estrutura da Ponte Braghetto.

Figura 19 - vistoria governador Rodrigo Rollemberg na Ponte Braghetto em 02/2018



Fonte: <https://g1.com.br/df>.

No planejamento da obra, para possibilitar a reabilitação da Ponte Braghetto, foram executadas, primeiramente, duas pontes paralelas à Ponte Braghetto, e, após concluídas, o trânsito da saída norte foi desviado para essas novas pontes.

Figura 20 – Ponte do Braghetto e duas novas pontes paralelas

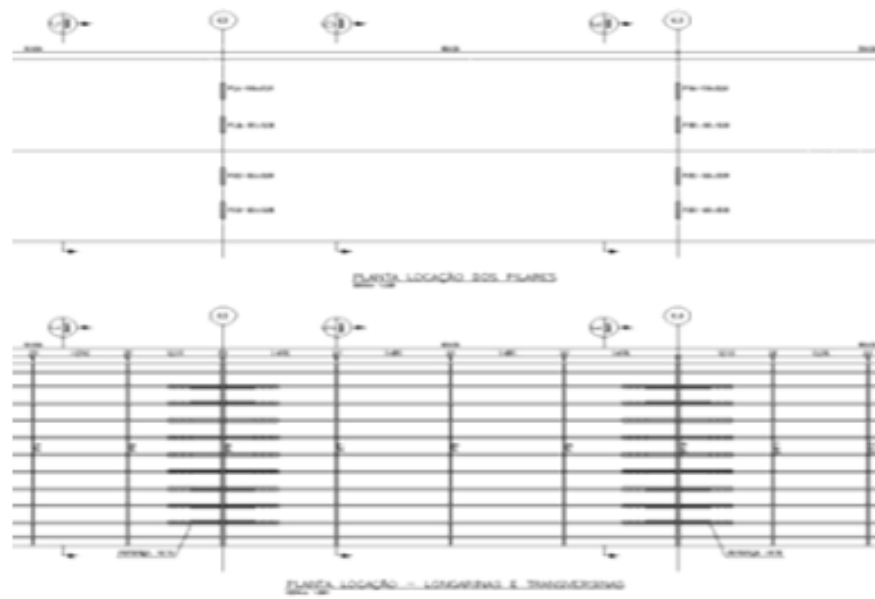


Fonte: Google Maps.

2.3 Geometria e Modelo Estrutural

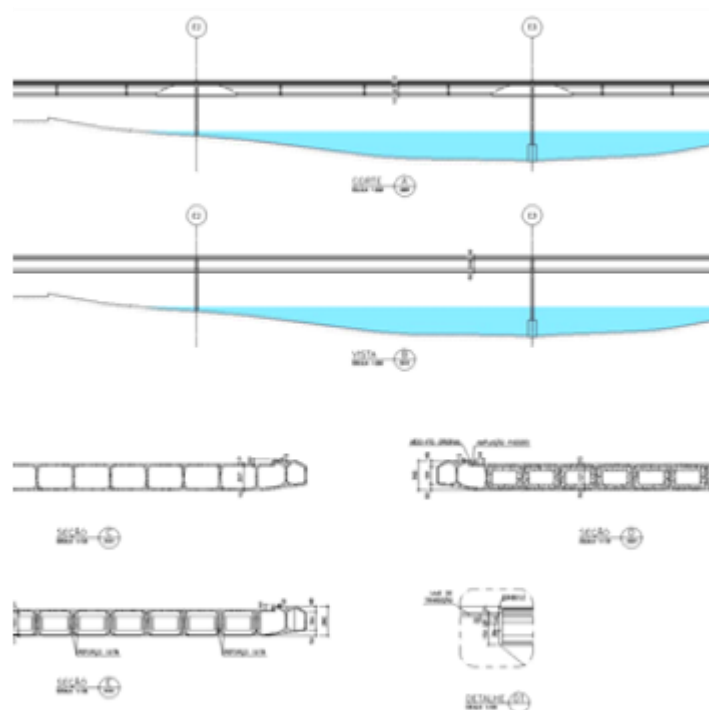
Como os desenhos do projeto executivo original (formas e armaduras) da Ponte Braghetto se perderam ao longo do tempo e, portanto, não se teve acesso às informações técnicas básicas, foi realizado pela Concremat Engenharia um levantamento técnico da ponte no período compreendido entre julho e dezembro de 1998 que deu origem aos desenhos geométricos de formas utilizados nesta dissertação. As principais dimensões da geometria utilizadas no dimensionamento estrutural serão apresentadas nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Ponte do Braghetto – Planta de Locação – Pilares, Longarinas e Transversinas



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

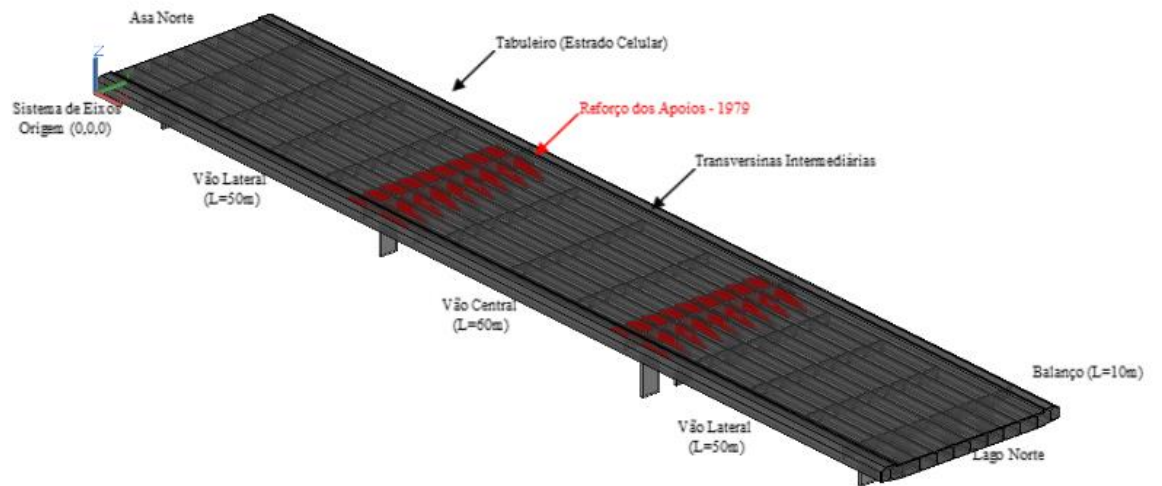
Figura 22 – Ponte do Braghetto – Corte, Vista, Seções e Detalhe



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

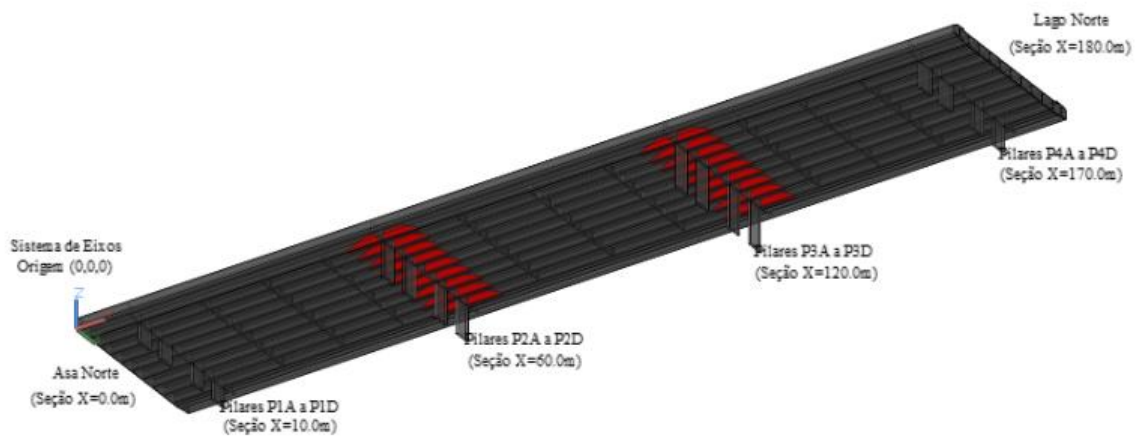
Com base nos desenhos geométricos apresentados nas Figuras 21e 22, foi feito um modelo tridimensional da Ponte do Braghetto conforme indicado nas vistas isométricas de topo e de fundo da estrutura juntamente com indicações dos níveis de referência e a origem do sistema de eixos do modelo (ver Figuras 23 a 25). Destaca-se a região de reforço realizada em 1979 pelo autor do projeto professor Aderson Moreira da Rocha.

Figura 23 – Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Vista Isométrica de Topo (Autocad)



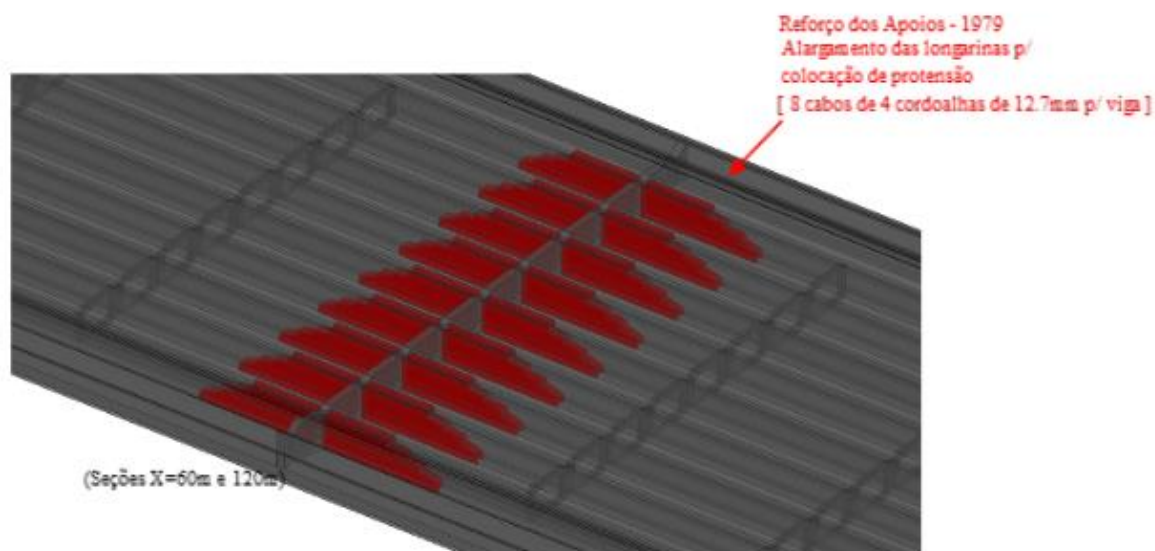
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 24 – Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Vista Isométrica de Fundo (Autocad)



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 25 – Ponte do Braghetto – Modelo 3D – Detalhe do Reforço (Autocad)



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Para a análise de esforços atuantes e dimensionamento estrutural da ponte do Braghetto foram utilizados os parâmetros e critérios de cálculo estático no regime elástico: Dimensionamento no estado limite último, verificação no estado limite de utilização. Fissuração ≤ 0.20 mm (protensão parcial nível 1) e Cobrimento: 2.0cm (lajes, vigas e pilares) e 5.0cm (protensão).

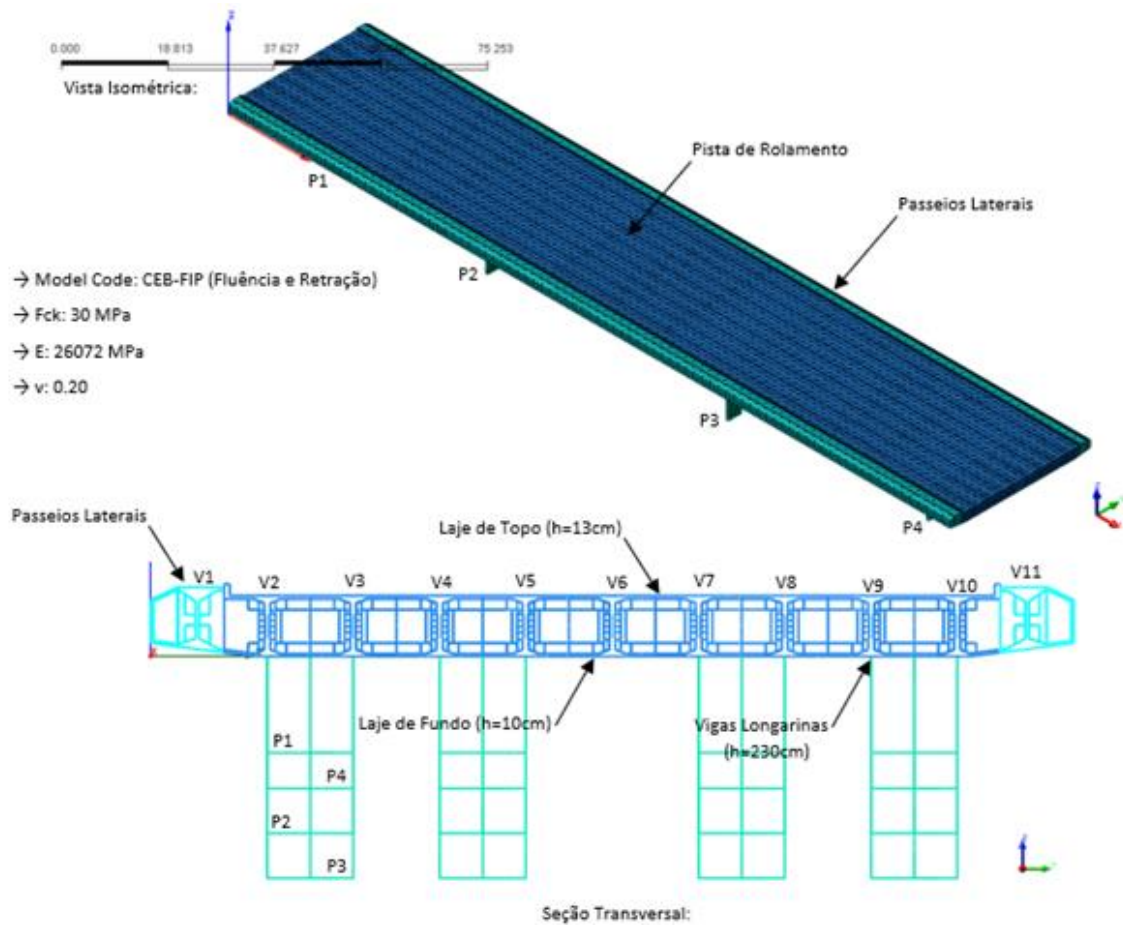
Para as propriedades Mecânicas e Materiais do Concreto: Resistência Característica: $F_{ck} = 30$ MPa (tabuleiro, vigas longarinas e pilares). Módulo de Elasticidade: $E_{cs} = 26072$ MPa. Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.20$. Peso Específico: $\gamma_c = 25$ KN/m³.

E propriedades Mecânicas do Aço: CA-T50 e CA-50: $F_{yk} = 500$ MPa (Armadura Passiva). CP160-RN: $F_{tk} = 1600$ MPa (Armadura de Protensão – Projeto Original de 1960). CP175-RN: $F_{tk} = 1750$ MPa (Armadura de Protensão – Projeto de Reforço de 1979).

A análise numérica da estrutura foi executada com o auxílio do *software* MIDAS-FEA 2016, em que se considerou o regime linear elástico, usando-se elementos finitos

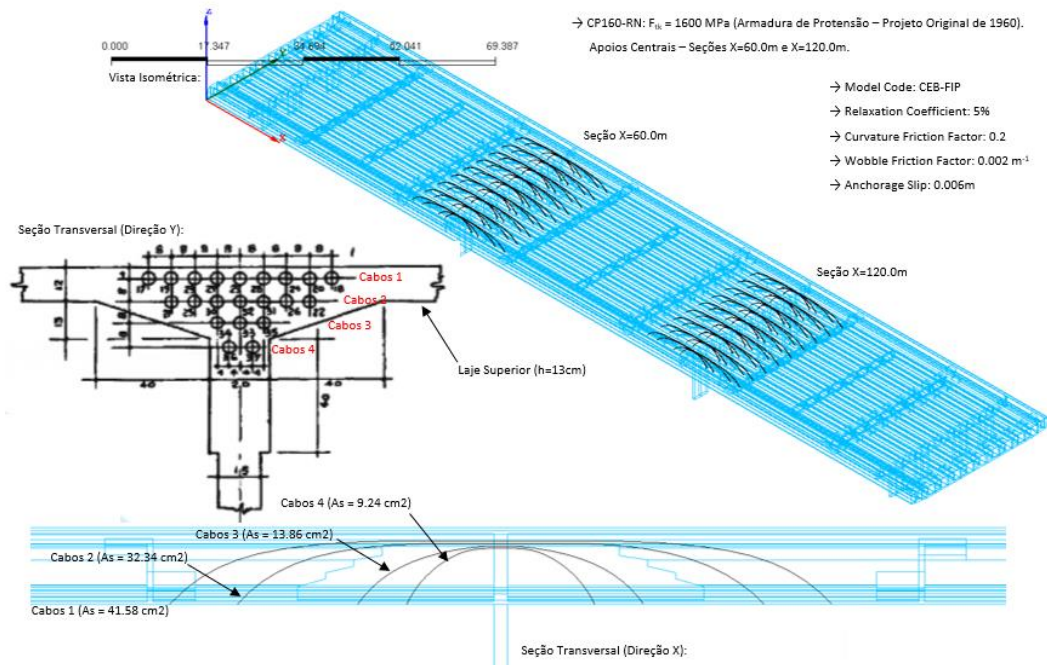
sólidos (*solid elements*) para representar as seções de concreto e elementos de cabos (*reinforcement elements*) para a protensão, conforme esquematizado nas Figuras de 26 a 29:

Figura 26 – Malha de Elementos Finitos (*Solid Elements*) no Midas-FEA



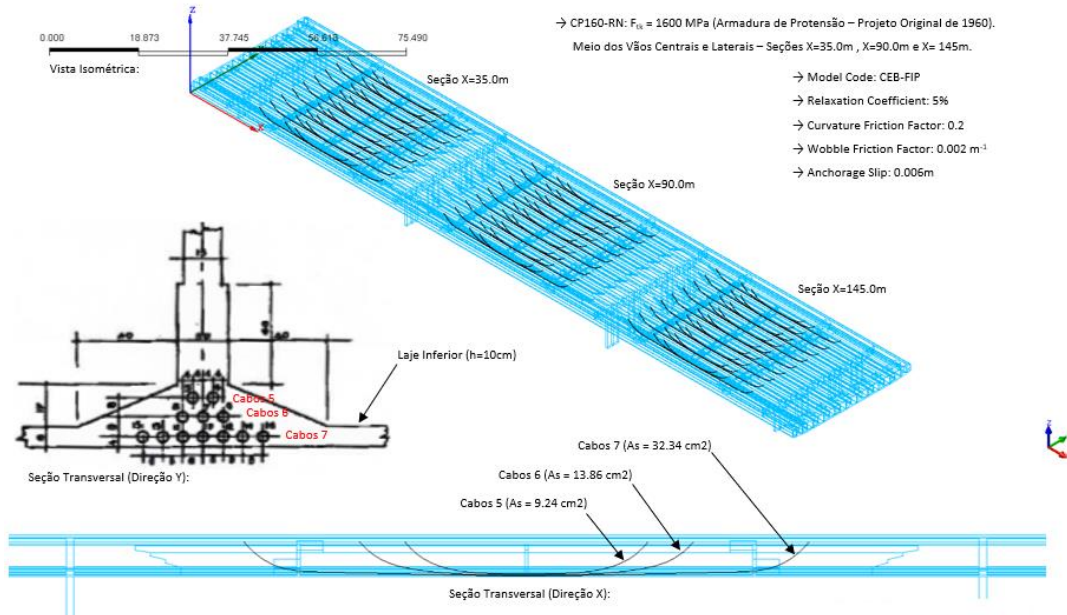
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 27 – Malha de Elementos Finitos (*Reinforcement Elements*) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 1 a 4 nos Apoios Centrais – Projeto Original de 1960



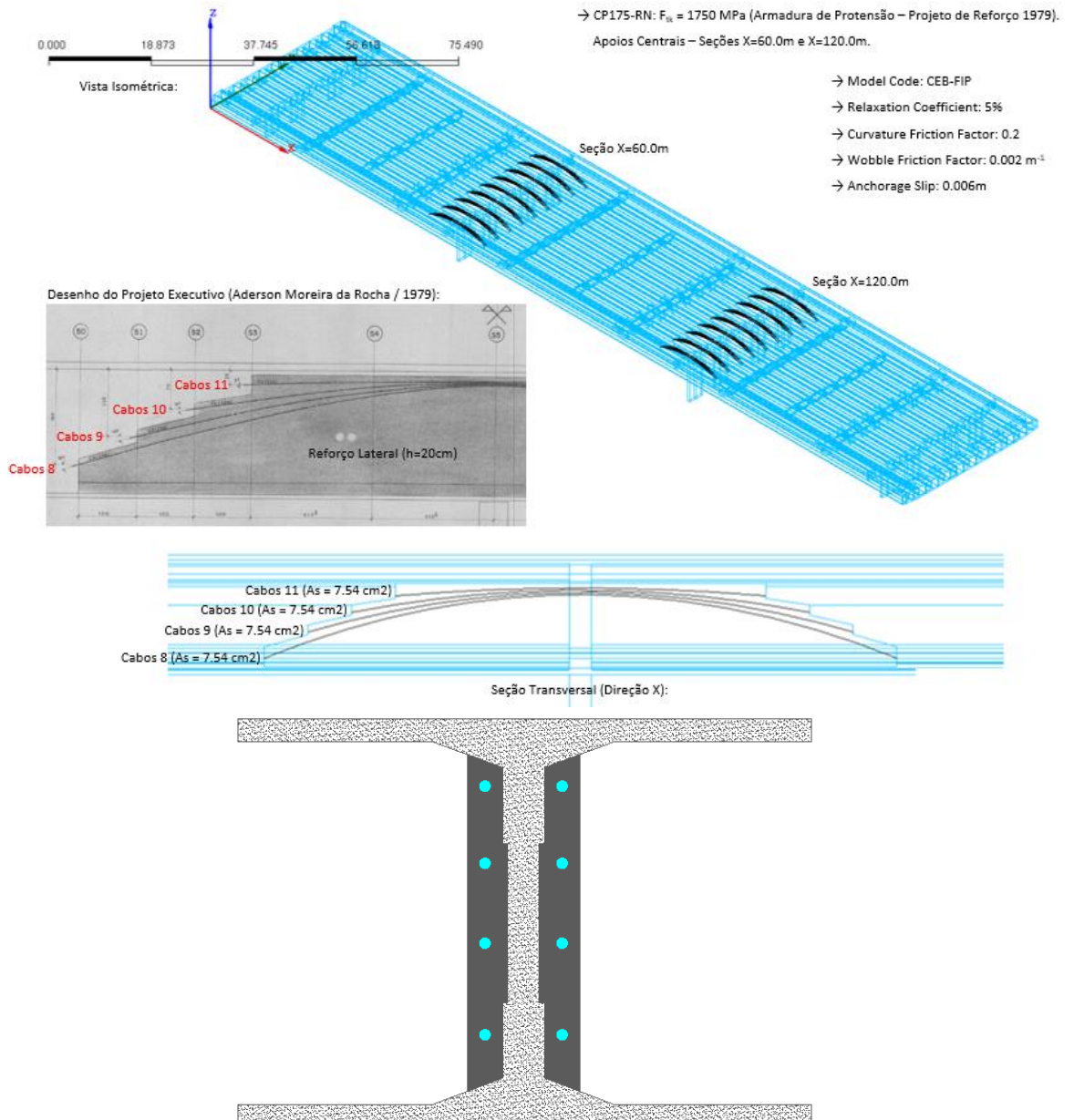
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 28 – Malha de Elementos Finitos (*Reinforcement Elements*) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 5 a 7 no Meio dos Vãos – Projeto Original de 1960



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figuras 29 – Malha de Elementos Finitos (*Reinforcement Elements*) no Midas-FEA. Cabos de Protensão 8 a 11 nos Apoios Centrais – Projeto de Reforço em 1979



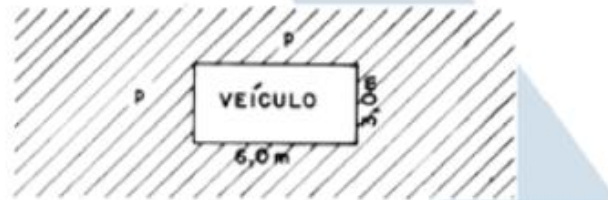
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

2.4. Aumento do desempenho da capacidade de carga da estrutura de TB36 para TB45

Na definição dos carregamentos da Ponte Braghetto foi também adotado veículo trem-tipo TB45, conforme a NBR 7188/2013 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de pedestre. O trem-tipo compõe-se de um veículo e de cargas uniformemente distribuídas na pista e nos passeios conforme indicado na Figura 30.

Figura 30 – Cargas de Veículo – TB45 (Parte 1/2)

Classe da ponte	Veículo			Carga uniformemente distribuída				Disposição da carga
	Tipo	Pesototal		p		p'		
		kN	t _f	kN/m ²	kgf/m ²	kN/m ²	kgf/m ²	
45	45	450	45	5	500	3	300	Carga p em toda a pista
30	30	300	30	5	500	3	300	Carga p' nos passeios
12	12	120	12	4	400	3	300	

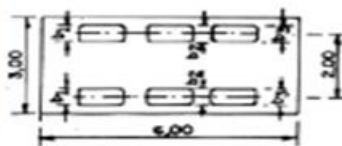
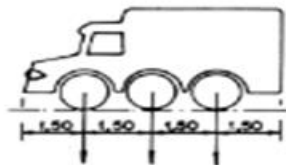


As características do veículo com as cargas por roda e as dimensões das mesmas também são definidas na NBR 7188/2013 conforme indicados na Figura 31.

Figuras 31– Cargas de Veículo – TB45 (Parte 2/2).

	Unidade	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total de veículo	kN-t _f	450-45	300-30	120-12
Peso de cada roda dianteira	kN-t _f	75-7,5	50-5	20-2
Peso de cada roda traseira	kN-t _f	75-7,5	50-5	40-4
Peso de cada roda intermediária	kN-t _f	75-7,5	50-5	-
Largura de contato b ₁ de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contato b ₃ de cada roda traseira	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contato b ₂ de cada roda intermediária	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m ²	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre os eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

TIPOS 45 E 30



2.5 Avaliação do Estado Limite Último ELU

Nesta seção, será apresentada a análise de esforços atuantes e o dimensionamento estrutural das vigas longarinas protendidas (seção T) com a contribuição das mesas inferior e superior das lajes do tabuleiro da ponte do Braghetto para a avaliação do momento limite último resistente da seção e do seu nível de segurança para as principais combinações de carga.

Vale ressaltar que a análise teórica da capacidade resistente de uma estrutura baseada em informações esparsas da construção sem dispor da totalidade dos detalhes do projeto executivo deve ser utilizada apenas como parâmetros gerais de avaliação qualitativa do comportamento estrutural.

Inicialmente, são apresentados os diagramas de esforços (tensões na direção longitudinal, forças cortantes e momentos fletores) para as principais combinações que levaram aos maiores esforços na estrutura.

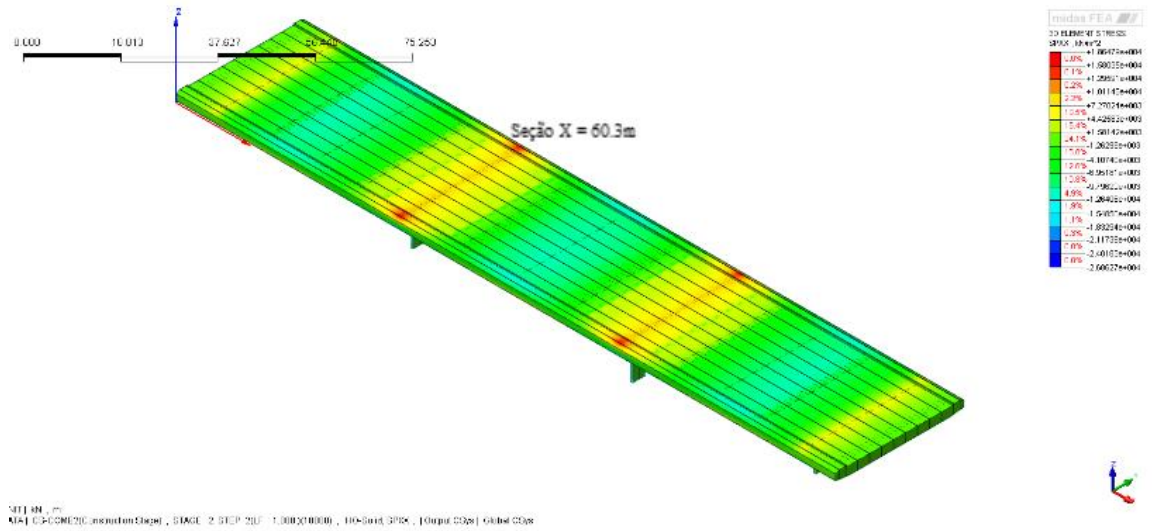
Os cálculos foram feitos para dois estágios distintos de construção (*Construction Stages*). O primeiro estágio de construção (*Stage1*) corresponde ao projeto original da ponte compreendido entre os anos de 1960 e 1979, levando-se em conta os efeitos de fluência e retração do concreto durante esse período, conforme parâmetros definidos no CEB-FIP. O segundo estágio de construção (*Stage2*) corresponde ao reforço estrutural nos apoios para a estrutura já deformada com a inclusão dos conjuntos de cabos de protensão 8 a 11 (ver Figura 22), conforme definido abaixo.

Para cada uma das planilhas de dimensionamento, serão apresentados os resultados para o projeto original imediatamente antes da execução do reforço (*Stage1 – Step2*) e em seguida para o projeto original com reforço estrutural após 10.000 dias (*Stage2 – Step2*). As avaliações foram feitas para o apoio central (seção X = 60.3 m) e para o meio do vão central (seção X = 90.15 m).

A título ilustrativo, será apresentada em maiores detalhes a determinação do momento limite último da seção da longarina central da ponte na seção X=60.30m (apoio central) para a combinação CS-COMB2 no Estágio de Construção 2 após 10.000 dias da construção (*Stage2 – Step2*), utilizando-se os recursos do programa Midas-FEA.

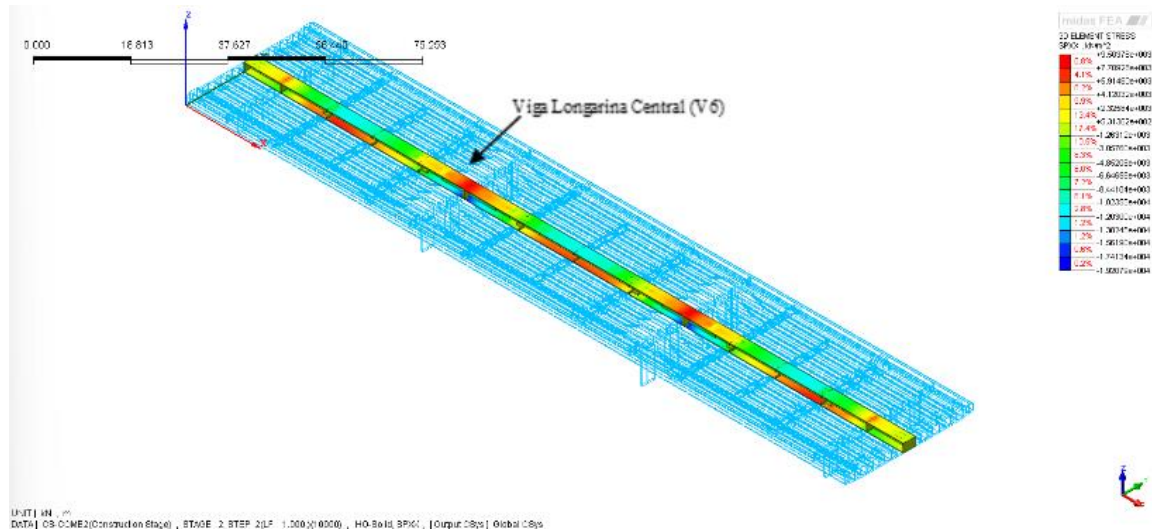
Inicialmente, são apresentadas as tensões normais das longarinas nas seções escolhidas para a determinação da linha neutra da seção (Figura 32) e em seguida são mostrados os esforços solicitantes de cálculo na seção desejada (Figura 33).

Figura 32 – Tensões Normais Sxx [KN/m2] no Midas-FEA



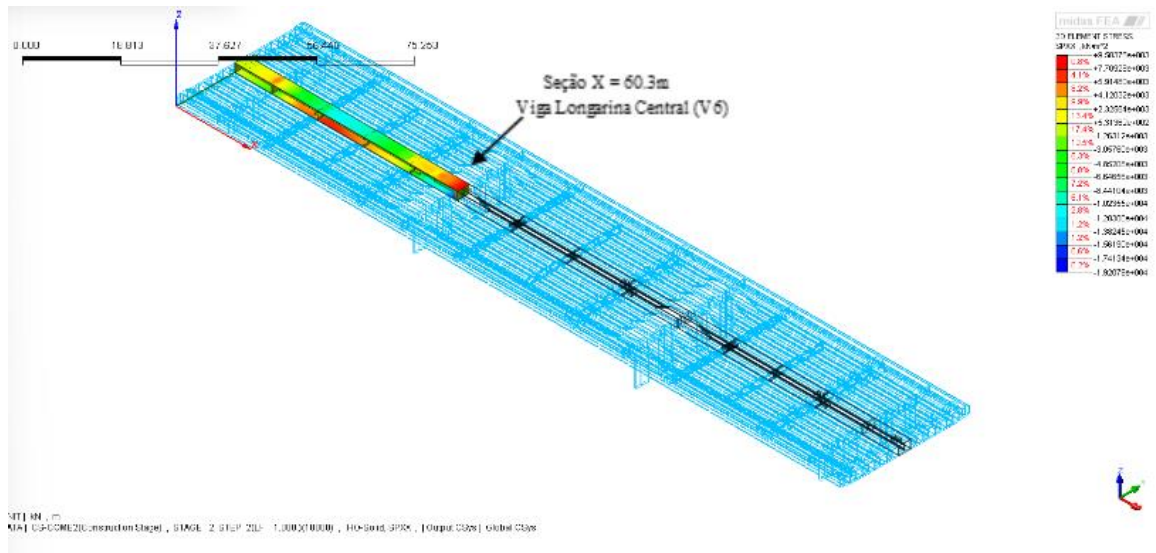
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 32b – Tensões Normais Sxx [KN/m2] na Viga Longarina Central



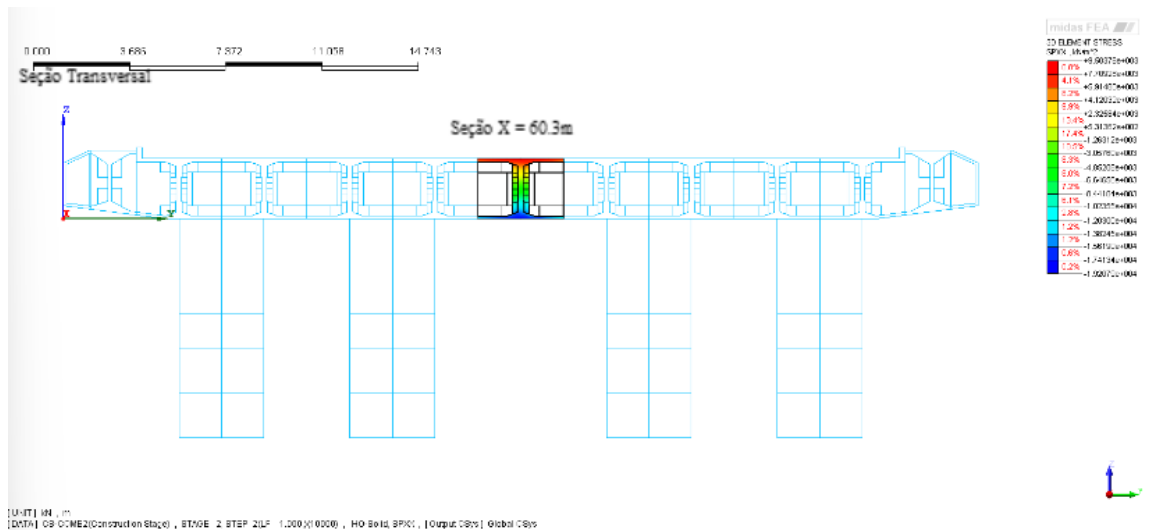
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 32c – Tensões Normais Sxx [KN/m2] na Viga Longarina Central



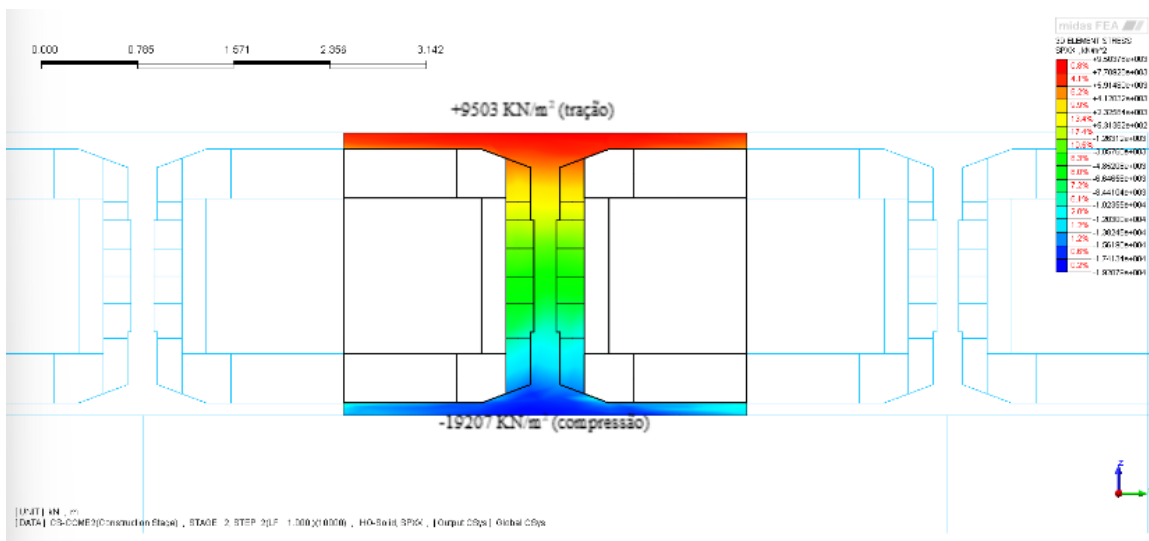
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 32d – Tensões Normais Sxx [KN/m2] na Viga Longarina Central



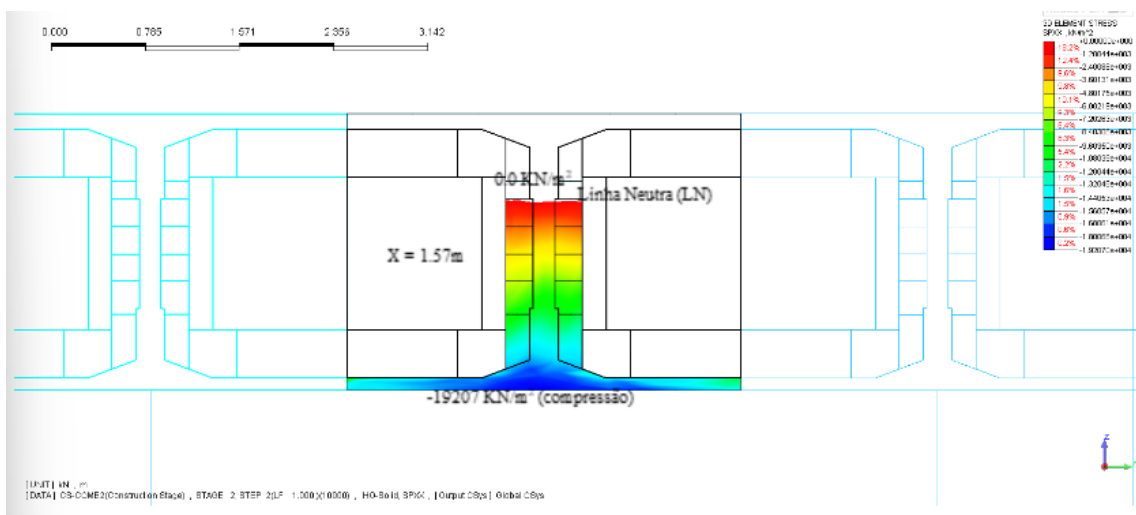
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 32e – Tensões Normais Sxx [KN/m²] na Viga Longarina Central em Detalhe



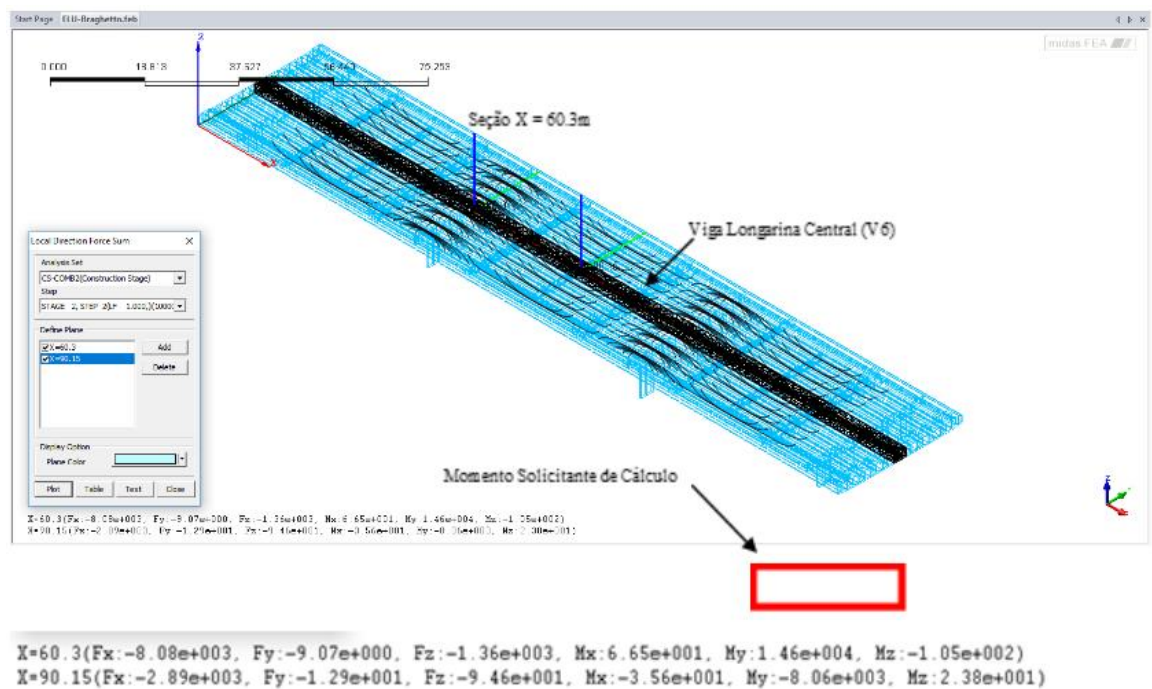
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 32f – Tensões Normais Sxx [KN/m²] na Região Comprimida e Posição da Linha Neutra



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

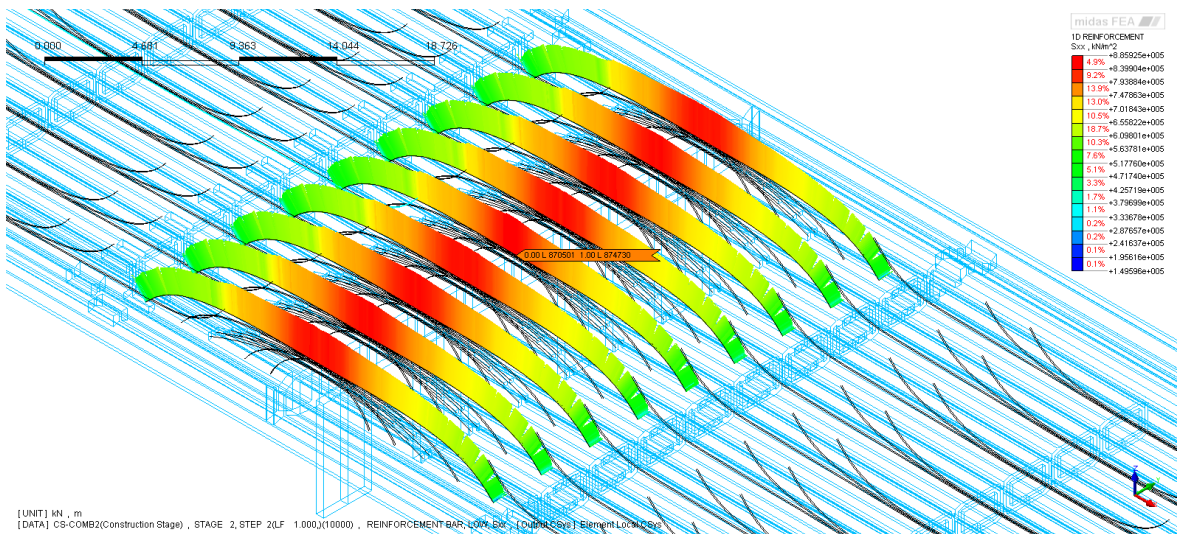
Figura 33 – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*) Esforços na Seção X = 60.3m (Apoio Central)



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

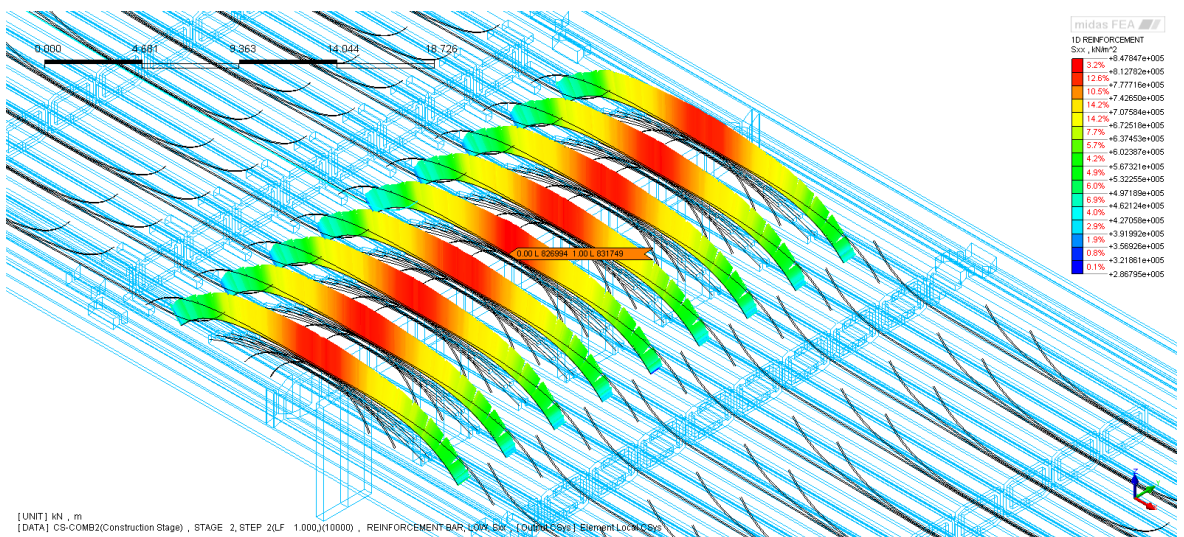
A seguir, são apresentadas as tensões normais em cada um dos cabos de protensão que passam na seção X=60.30m. Nesta seção, estão os conjuntos de cabos 1 a 4 do projeto original de 1960 (ver Figura 33) e os conjuntos de cabos 8 a 11 do projeto de reforço de 1979 (ver Figuras 34):

Figura 33a – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 1 – Projeto Original de 1960



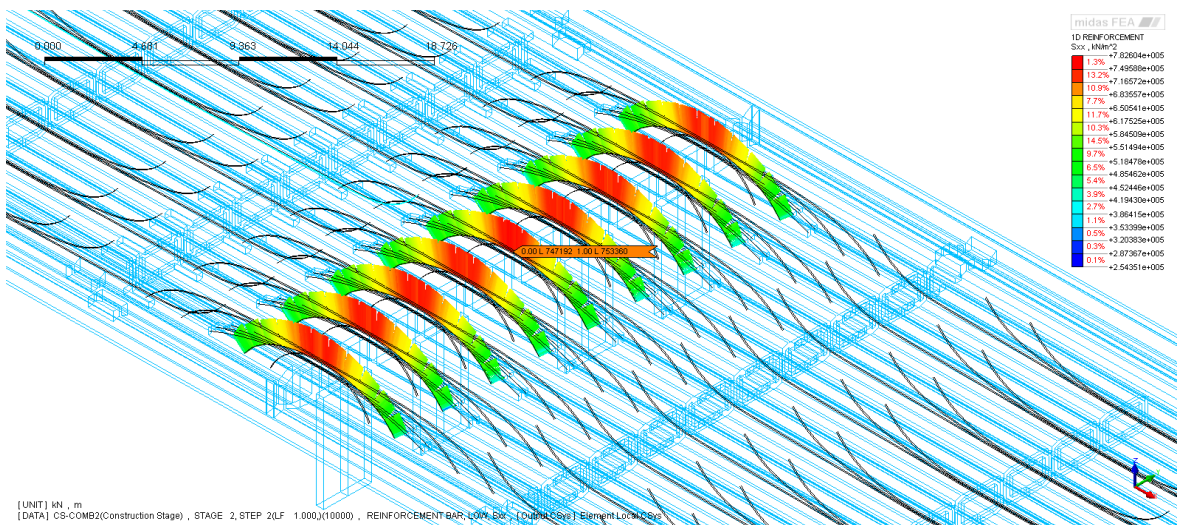
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 33b – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 2 – Projeto Original de 1960



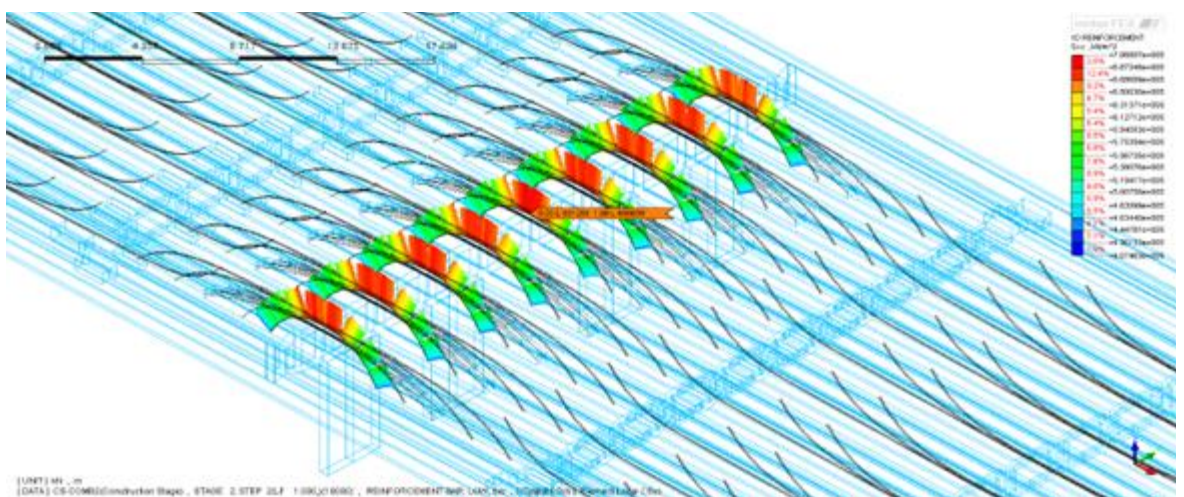
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 33c – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 3 – Projeto Original de 1960



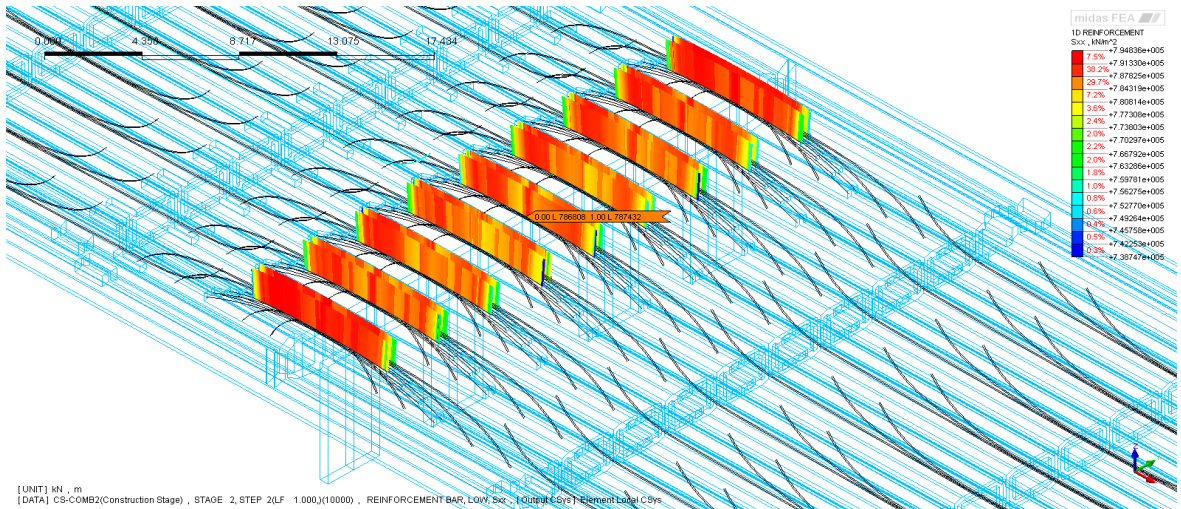
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 33d – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 4 – Projeto Original de 1960



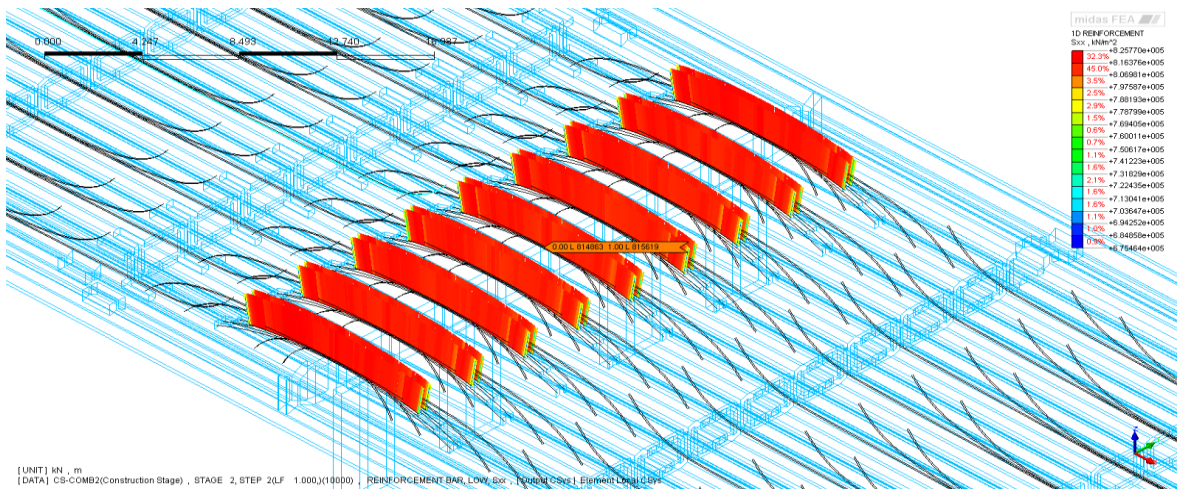
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 34a – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 8 – Projeto de Reforço de 1979



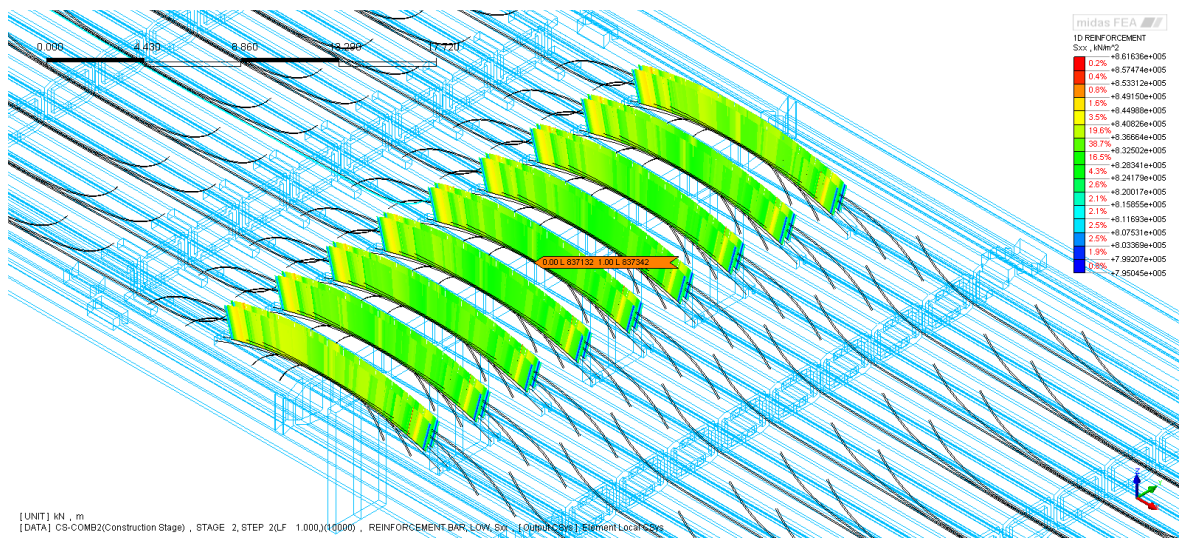
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 34b – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m²] nos Cabos 9 – Projeto de Reforço de 1979



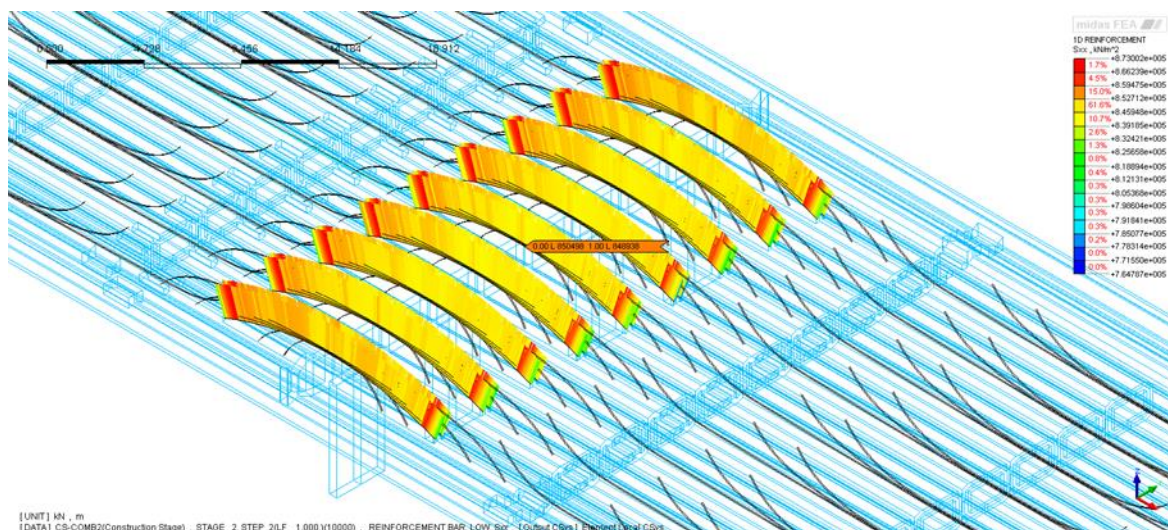
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 34c – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m2] nos Cabos 10 – Projeto de Reforço de 1979



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 34d – CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*). Tensões Normais Sxx [KN/m2] nos Cabos 11 – Projeto de Reforço de 1979



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

2.6 Análise do Estado Limite de Serviço – Fissuração (ELSW)

O estado Limite de Serviço é alcançado quando as fissuras têm aberturas iguais aos valores máximos especificados pela NBR-6118/2014 no subitem 13.4.2. No caso das estruturas de concreto protendido com protensão parcial, a abertura de fissura característica está limitada a 0.2mm, a fim de não prejudicar a estética e a durabilidade.

De acordo com a NBR-6118/2014, a verificação é feita considerando-se estágio II (concreto fissurado à tração e comportamento elástico dos materiais). Para cada grupo de elementos das armaduras passivas e de protensão (excluindo-se os cabos protendidos que estejam dentro de bainhas, os quais não são levados em conta no cálculo da fissuração), deve-se considerar uma área crítica do concreto de envolvimento, constituída por um retângulo cujos lados não distam mais de 7ϕ o contorno do elemento da armadura.

Os cálculos foram feitos para dois estágios distintos de construção (*Construction Stages*). O primeiro estágio de construção (*Stage1*) corresponde ao projeto original da ponte compreendido entre os anos de 1960 e 1979, levando-se em conta os efeitos de fluência e retração do concreto durante este período conforme parâmetros definidos no CEB-FIP. O segundo estágio de construção (*Stage2*) corresponde ao reforço estrutural nos apoios para a estrutura já deformada com a inclusão dos conjuntos de cabos de protensão 8 a 11.

A seguir, será apresentada uma tabela com resumo das principais análises realizadas para a verificação do estado limite de serviço para abertura de fissuras (ELSW) da estrutura para seções nos apoios centrais e meio do vão considerando o projeto original e o projeto com o reforço de 1979.

Tabela 1 – Estado Limite de Serviço – Fissuração (ELSW) – Tabela Resumo das Análises

Estado Limite de Serviço - Fissuração (ELSW)						
Combinação	Estágio Construção	Seção X=60.3m (Apoio)	Situação	Seção X=90.15m (Vão)	Situação	Descrição
CS-COMB10 (ELSW)	Stage 1 - Step2 Time = 6950 days	$M_{sd} = 7910 \text{ KN.m}$ $w = 0.258\text{mm}$ $w_{lim} = 0.200\text{mm}$	Não Atende!	$M_{sd} = 3730 \text{ KN.m}$ $w = 0.154\text{mm}$ $w_{lim} = 0.200\text{mm}$	OK!	Projeto Original 1960
CS-COMB10 (ELSW)	Stage 2 - Step2 Time = 10000 days	$M_{sd} = 6490 \text{ KN.m}$ $w = 0.137\text{mm}$ $w_{lim} = 0.200\text{mm}$	OK!	$M_{sd} = 3710 \text{ KN.m}$ $w = 0.152\text{mm}$ $w_{lim} = 0.200\text{mm}$	OK!	Projeto 1960 Reforço 1979
Stage 1 - Step1	Time = 0 days	Ano 1960 - Aplicação dos Cabos 1, 2, 3 e 4 (Apoio) e Cabos 5, 6 e 7 (Meio Vão).				
Stage 1 - Step2	Time = 6950 days	Ano 1979 - Antes do Reforço c/ efeitos de fluência e retração no concreto (19 anos ~ 6950 dias).				
Stage 2 - Step1	Time = 6950 days	Ano 1979 - Após aplicação dos Cabos de Reforço 8, 9, 10 e 11 (Apoio).				
Stage 2 - Step2	Time = 10000 days	Ano 1987 - 10000 dias após projeto original (tempo infinito p/ cálculo de fluência e retração).				

- ▶ Projeto Original 1960 → Não Atende ELSW no apoio.
Atende ELSW no meio do vão.
- ▶ Projeto Original 1960 + Reforço 1979 → Atende ELSW no apoio e meio do vão.

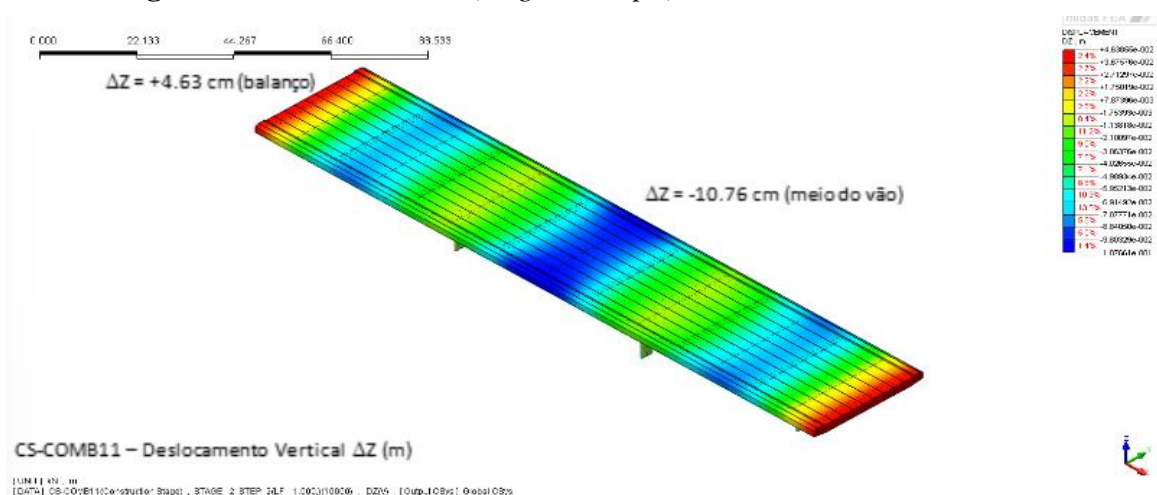
2.7 Análise do Estado Limite De Serviço – Deformação (ELSD):

Nesta seção, será apresentada a verificação do estado limite de deformações excessivas na estrutura. Esse estado é alcançado quando as deformações (flechas) atingem valores limites estabelecidos para a utilização normal conforme especificado pela NBR-

6118/2014 no subitem 13.3. No caso de pontes em concreto armado ou protendido, o deslocamento máximo está limitado a $(L/250)$, a fim de não prejudicar a estética e causar insegurança aos usuários, sendo L o vão livre entre pilares.

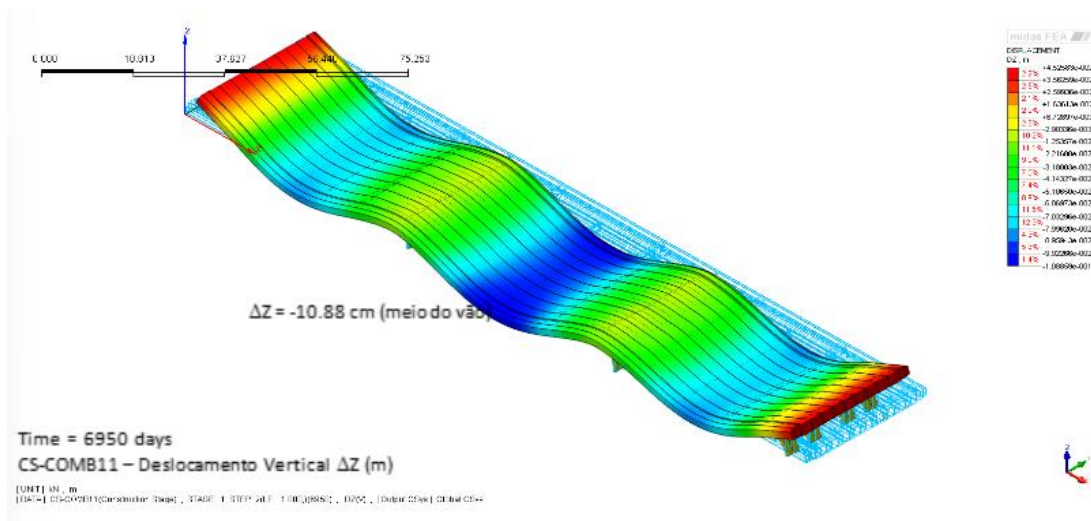
Os cálculos foram feitos para dois estágios distintos de construção (*Construction Stages*). O primeiro estágio de construção (*Stage1*) corresponde ao projeto original da ponte compreendido entre os anos de 1960 e 1979, levando-se em conta os efeitos de fluência e retração do concreto durante este período conforme parâmetros definidos no CEB-FIP. O segundo estágio de construção (*Stage2*) corresponde ao reforço estrutural nos apoios para a estrutura já deformada com a inclusão dos conjuntos de cabos de protensão 8 a 11, conforme Figura 35.

Figura 35 – CS-COMB11 (*Stage2 – Step2*) – Deslocamentos Verticais



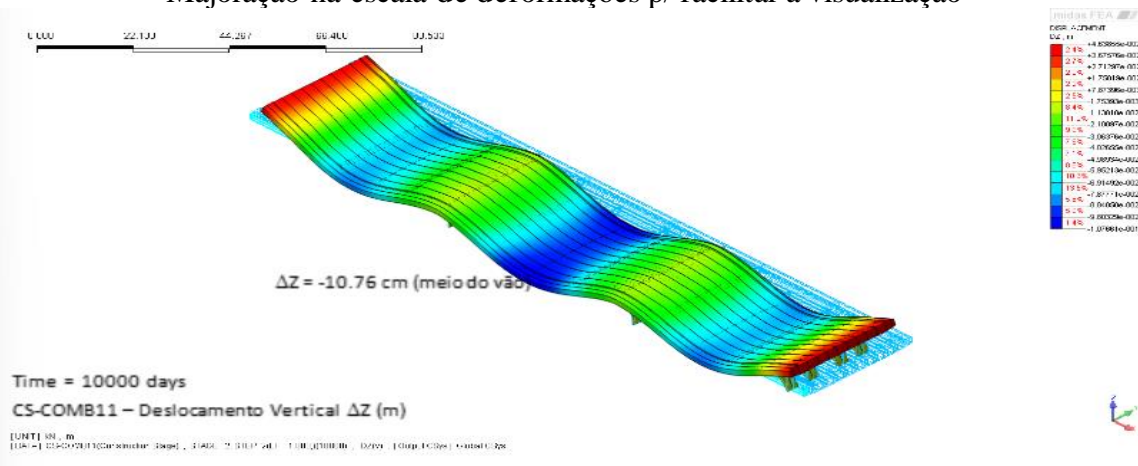
Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 35a – CS-COMB11 (*Stage1 – Step2*) – Deslocamentos Verticais. Observação: Majoração na escala de deformações p/ facilitar a visualização



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

Figura 35b – CS-COMB11 (*Stage2 – Step2*) – Deslocamentos Verticais. Observação: Majoração na escala de deformações p/ facilitar a visualização



Fonte: Relatório Técnico R. A Rocha. 2018.

A seguir, será apresentada uma tabela com resumo das principais análises realizadas para a verificação do estado limite de deformações excessivas (ELSD) para seções nos balanços e meio do vão considerando o projeto original e o projeto com o reforço de 1979.

Tabela 2 – Estado Limite de Serviço – Deformação (ELSD) – Tabela Resumo das Análises

Estado Limite de Serviço - Deformação (ELSD)						
Combinação	Estágio Construção	Seção X=90.0m (Vão)	Situação	Seção X=0.00m (Balanço)	Situação	Descrição
CS-COMB11 (ELSD)	Stage 1 - Step2 Time = 6950 days	$\Delta Z = -10.88\text{cm}$ $\Delta Z_{\text{lim}} = -24\text{cm}$	OK!	$\Delta Z = +4.52\text{cm}$ $\Delta Z_{\text{lim}} = +8.0\text{cm}$	OK!	Projeto Original 1960
CS-COMB11 (ELSD)	Stage 2 - Step2 Time = 10000 days	$\Delta Z = -10.76\text{cm}$ $\Delta Z_{\text{lim}} = -24\text{cm}$	OK!	$\Delta Z = +4.63\text{cm}$ $\Delta Z_{\text{lim}} = +8.0\text{cm}$	OK!	Projeto 1960 Reforço 1979

Stage 1 - Step1	Time = 0 days	Ano 1960 - Aplicação dos Cabos 1, 2, 3 e 4 (Apoio) e Cabos 5, 6 e 7 (Meio Vão).				
Stage 1 - Step2	Time = 6950 days	Ano 1979 - Antes do Reforço c/ efeitos de fluência e retração no concreto (19 anos ~ 6950 dias).				
Stage 2 - Step1	Time = 6950 days	Ano 1979 - Após aplicação dos Cabos de Reforço 8, 9, 10 e 11 (Apoio).				
Stage 2 - Step2	Time = 10000 days	Ano 1987 - 10000 dias após projeto original (tempo infinito p/ cálculo de fluência e retração).				

- ▶ Projeto Original 1960 → Atende ELSD no meio do vão e na extremidade do balanço.
- ▶ Projeto Original 1960 + Reforço 1979 → Atende ELSD no meio do vão e na extremidade do balanço.

A título ilustrativo, são apresentadas na Tabela 3 as deformações totais no meio do vão central da ponte para diversas combinações de carga. Vale ressaltar que pela NBR 6118/2014 não é necessário verificar as deformações da estrutura para as combinações de estado limite último (CS-COMB1 a CS-COMB4) que apresentaram valores entre $15.18\text{cm} \leq \xi \leq 23.92\text{cm}$. Por outro lado, nas combinações quase permanentes de serviço (CS-COMB11 e CS-COMB12) previstas em norma, a deformada total no meio do vão central foi de $\xi = 10.76\text{cm}$.

É interessante observar que as deformações medidas “*in loco*” no nivelamento topográfico realizado em 1998 na face superior do tabuleiro ($z = 9.95\text{cm}$) e realizado na face inferior do tabuleiro em 2018 ($15.25\text{cm} \leq \xi z \leq 19.05\text{cm}$) encontram-se entre os valores mínimos obtidos pelo modelo computacional do Midas-FEA para ELSD previstos e os resultados estão dentro dos limites máximos aceitáveis ($L/250 = 24\text{cm}$).

Tabela 3 – Deformações no Vão Central p/ Diversas Combinações de Carga

Estado Limite de Serviço - Deformação (ELSD) - Stage 2 / Step 2 - Time = 10000 days				
Combinação	Meio do Vão Central	Flecha Limite	Situação	Observação
CS-COMB1	$\Delta Z = -15.18\text{cm}$	$\Delta Z_{\text{lim}} = -24.00\text{cm}$	OK!	Combinação p/ ELU
CS-COMB2	$\Delta Z = -23.90\text{cm}$	$\Delta Z_{\text{lim}} = -24.00\text{cm}$	OK!	Combinação p/ ELU
CS-COMB3	$\Delta Z = -23.85\text{cm}$	$\Delta Z_{\text{lim}} = -24.00\text{cm}$	OK!	Combinação p/ ELU
CS-COMB4	$\Delta Z = -23.92\text{cm}$	$\Delta Z_{\text{lim}} = -24.00\text{cm}$	OK!	Combinação p/ ELU
CS-COMB11	$\Delta Z = -10.76\text{cm}$	$\Delta Z_{\text{lim}} = -24.00\text{cm}$	OK!	Combinação p/ ELSD

2.8 Verificação Dos Pilares

Nesta seção, será apresentada a análise de esforços atuantes e o dimensionamento estrutural dos pilares em concreto armado para as combinações de carga de estado limite último (ELU) e com isso poder avaliar a capacidade resistente e o nível de segurança. Vale ressaltar que a análise teórica da capacidade resistente de uma estrutura baseada em informações esparsas da construção sem dispor da totalidade dos detalhes do projeto executivo deve ser utilizada apenas como parâmetros gerais de avaliação qualitativa do comportamento estrutural.

A ponte Braghetto apresenta quatro linhas de pilares compostas por quatro pilares cada com seção transversal $50 \times 326 \text{ cm}^2$ e alturas variando de 3.65m a 8.40m (ver Figura 36). A título ilustrativo, será apresentada a avaliação dos esforços atuantes e o dimensionamento estrutural do pilar P3A (seção $X=120.0\text{m}$) por se tratar de um pilar de bordo situado na região central da ponte que recebe maiores carregamentos e possui um maior comprimento de flambagem (ver Figuras 36 a 38). Os cálculos foram feitos para a combinação de carga CS-COMB2 (*Stage2 – Step2*), ou seja, para o projeto original com reforço estrutural após 10.000 dias da construção.

Posteriormente, é feita a integração de esforços no programa Midas-FEA para a obtenção dos momentos fletores, esforços cortantes e normais atuantes nas seções de topo e base do pilar, seguido das respectivas planilhas de dimensionamento, indicando-se as ferragens calculadas.

Figura 36 – Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares). CS-COMB2 – Tensões Verticais σ_{zz} [KN/m²]

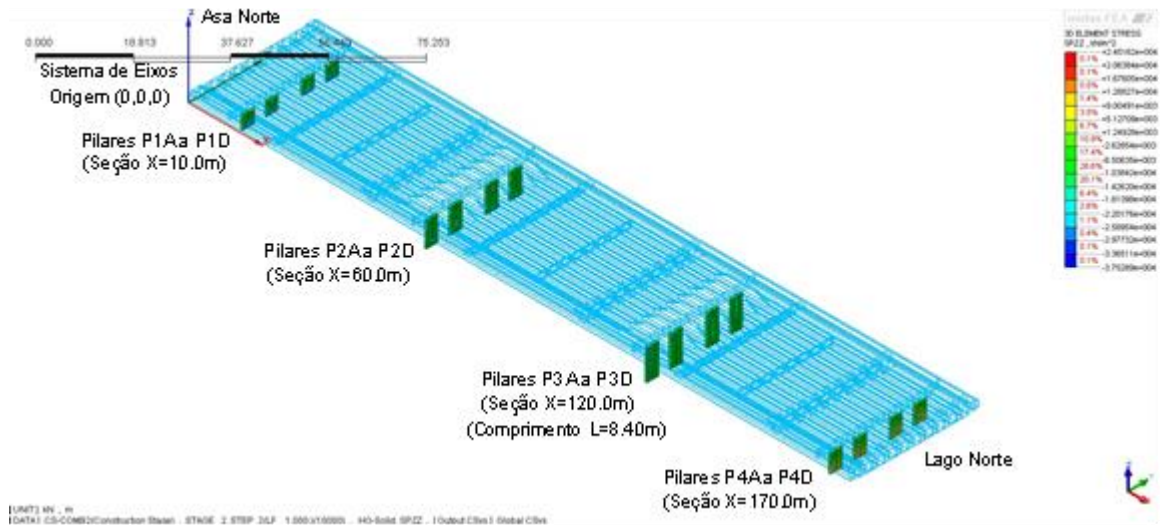


Figura 36b – Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares P3A a P3D). CS-COMB2 – Tensões Verticais σ [KN/m²]

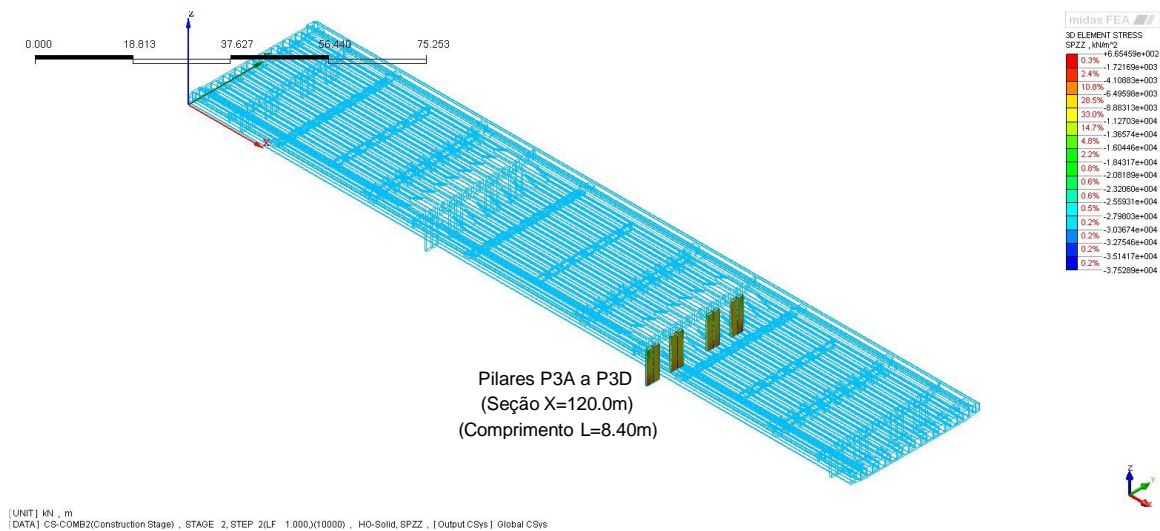


Figura 36c – Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilares P3A a P3D). CS-COMB2 – Tensões Verticais σ_{zz} [KN/m²]

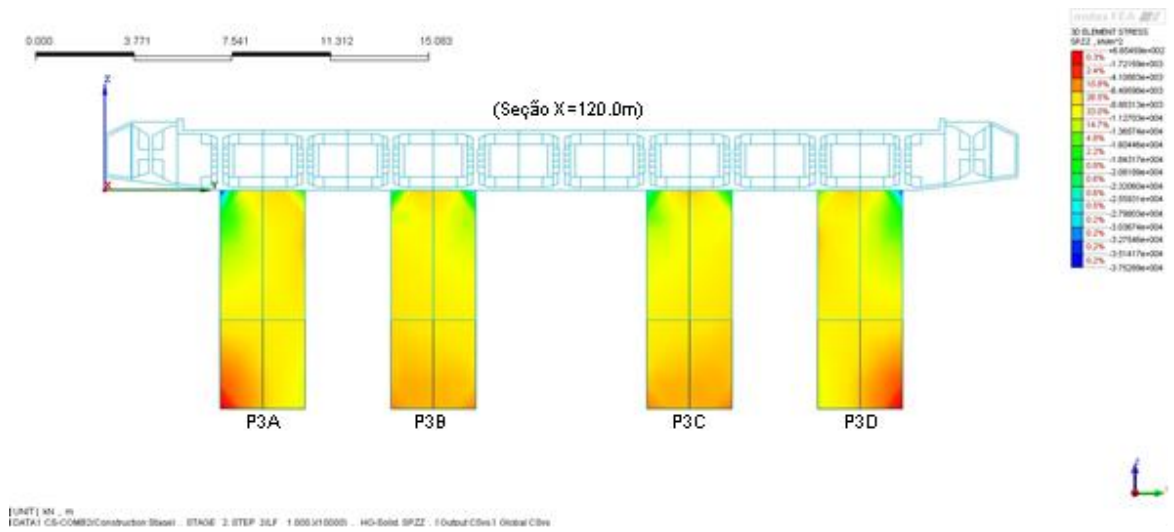


Figura 37 – Malha de Elementos Finitos – Midas-FEA (Pilar P3A). CS-COMB2 – Tensões Verticais σ_{zz} [KN/m²]

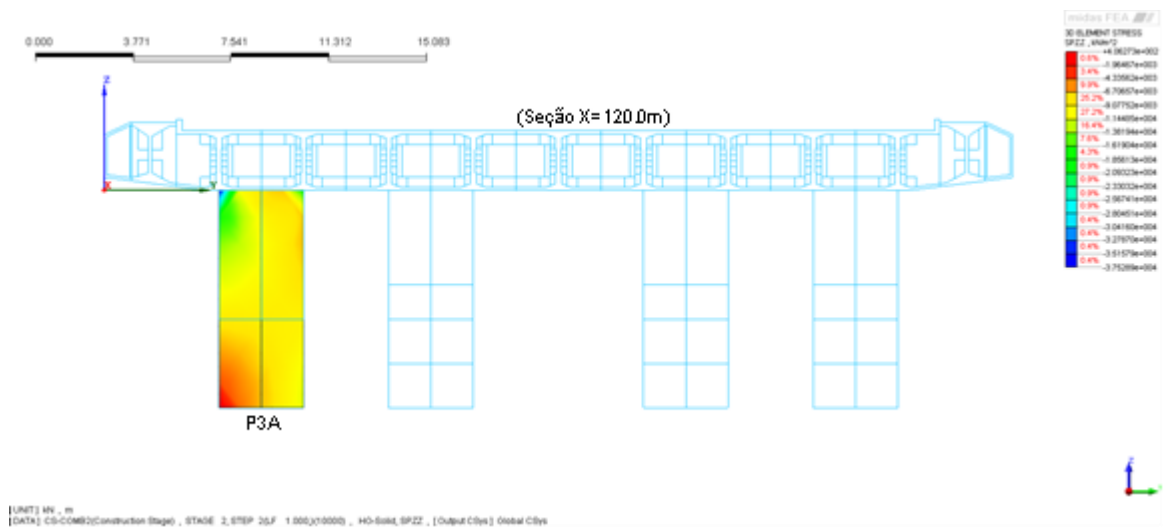
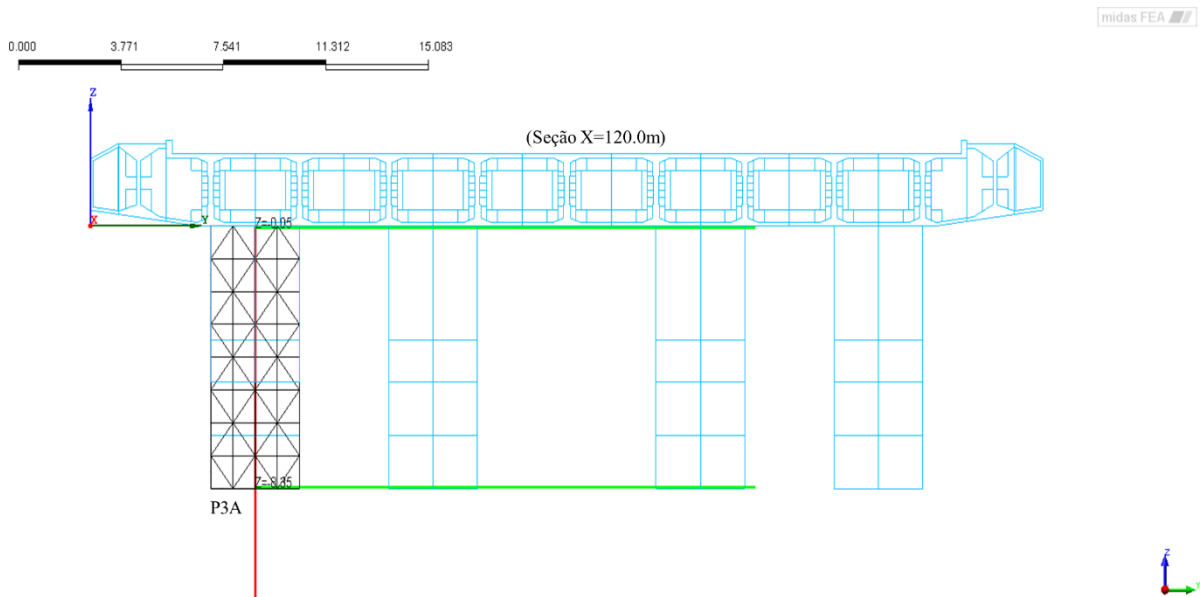
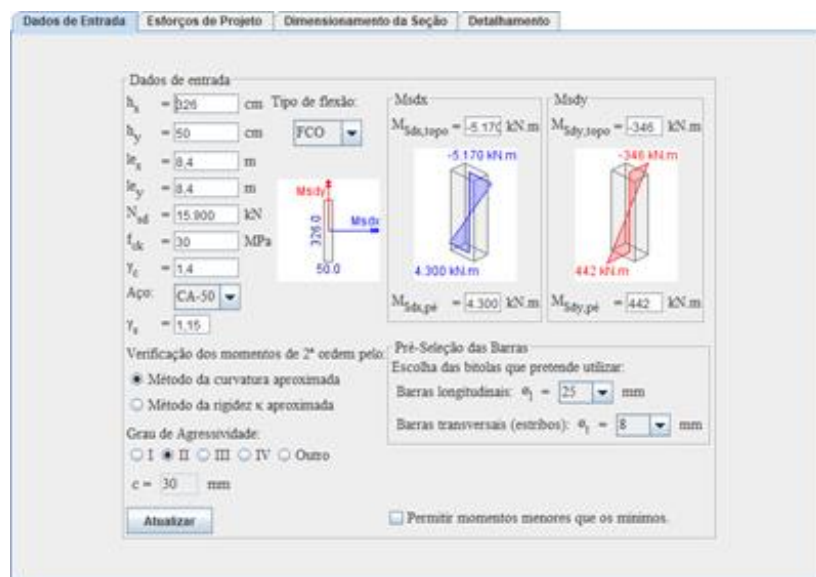


Figura 38 – Integração de Esforços – Midas-FEA (Pilar P3A). CS-COMB2 – Tensões Verticais σ_{zz} [KN/m²]



Figuras 39 – CS-COMB2 – Dimensionamento de Pilares (P3A) – Parte 1

(continua...)



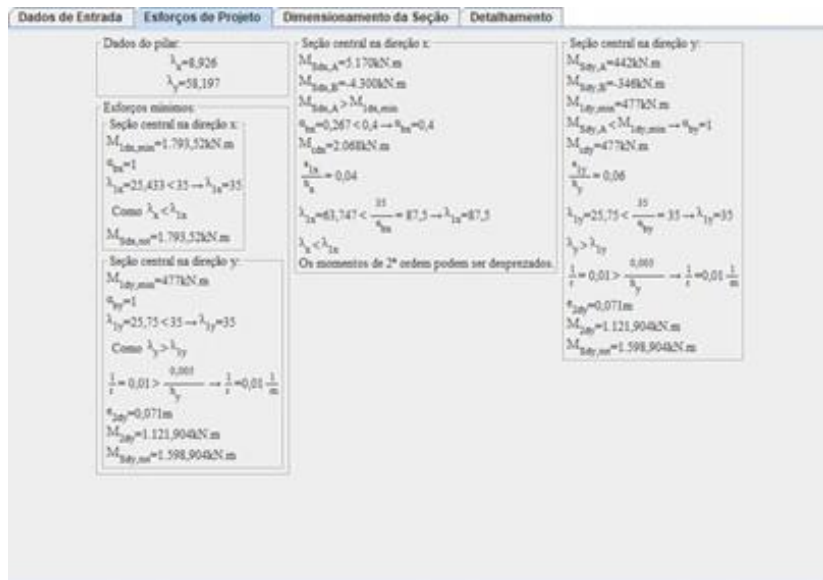
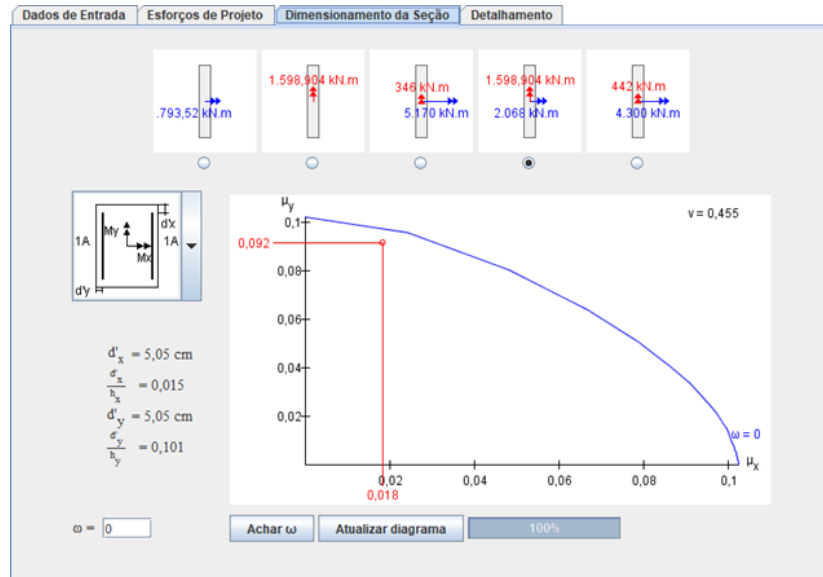


Tabela 4 – CS-COMB2 – Dimensionamento de Pilares (P3A) – Parte 2

Descrição	Pilar P3 - 50x326cm ²
Combinação	CS-COMB2
h1 (cm)	50,00
h2 (cm)	326,00
A _c (cm ²)	16300,00
f _{cd} (MPa)	21,43
f _{yd} (MPa)	434,78
w	0,000
y _d (KN/cm ²)	43,48
A _s (cm ²)	0,00

A_s^{min} (cm ²)	65,20
□ (mm)	25
$A_{s,barras}$ (cm ²)	4,91
N ^{barras}	14
$A_s^{recomendado}$	22 □ 25mm
Estribo	□ 8 c/20cm

Pode-se observar pelas planilhas de dimensionamento apresentadas na Tabela 4 que a taxa geométrica de armadura do pilar é $w = 0.00$ e, portanto, deve-se utilizar armadura mínima nos pilares. Como os desenhos do projeto executivo original (formas e armaduras) da ponte do Braghetto se perderam ao longo do tempo e não foram encontrados e o dimensionamento acima indica armadura mínima nos pilares, julga-se que os pilares devam atender os níveis mínimos de segurança.

De forma similar aos pilares, não existem desenhos do projeto executivo (formas e armaduras) dos blocos de coroamento e das fundações da ponte do Braghetto. No caso das fundações, outro fator complicador é que em função do processo de assoreamento do lago Paranoá boa parte dos blocos encontram-se total ou parcialmente soterrados por materiais carreados pela água tornando extremamente complicado até mesmo o levantamento da geometria dos blocos e as definições da fundação (tipo, quantidade de estacas, diâmetro, comprimento etc.). O modelo computacional deixa claro que as cargas permanentes como peso próprio e revestimento representam uma parcela substancial dos carregamentos e nunca ocorreram indícios de recalques ou outros problemas correlacionados com fundações. Ao longo dos anos de existência da ponte existem indícios que a sua infraestrutura (blocos e fundações) não apresenta problemas de segurança estrutural.

2.9 Laje de Aproximação e Console de Apoio

Foi realizada a análise de esforços e o dimensionamento estrutural de uma laje de aproximação com 29 metros de largura por 3 metros de comprimento, de modo a abranger toda a pista de rolamento da ponte, sendo apoiada na extremidade do tabuleiro, e o restante da laje é apoiado em solo, exceto no primeiro metro próximo à extremidade do tabuleiro da ponte.

A análise estrutural foi realizada utilizando-se o programa computacional STRAP 2016 com a laje de espessura igual a 25cm e resistência característica de $F_{ck} = 30$ MPa. O apoio da laje no solo foi modelado com base elástica e coeficientes de mola $K_z = 20000$ KN/m³.

Foram considerados os carregamentos de peso próprio (PP) da laje de transição calculado automaticamente pelo *software*, a carga de multidão (MULT) e a carga devido a um veículo trem-tipo (TB- 45) com os respectivos coeficientes de impacto da NBR 6118/2014:

ESFORÇOS PARA DIMENSIONAMENTO:

Os esforços para dimensionamento foram obtidos para as cargas combinadas:

$$1.35*PP + 1.5*MULT + 1.5*TB45$$

$$1.35*PP + 1.5*TB45$$

Figura 40 – Diag. Momento M_x – Laje de transição – Envoltória Mínima – (kN.m)

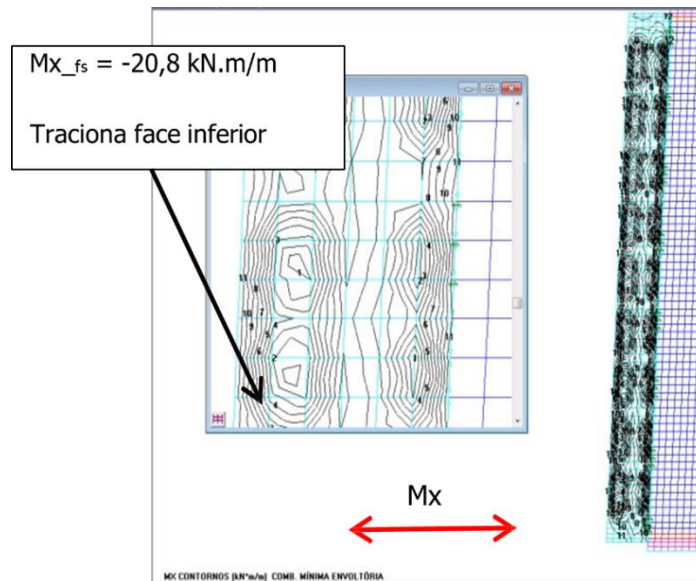
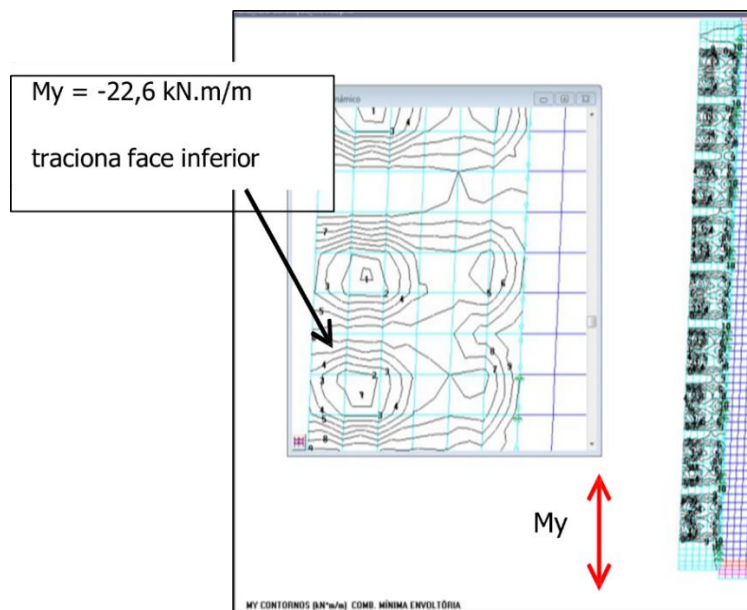


Figura 41 – Diag. Momento M_y – Laje de transição – Envoltória Mínima – (kN.m)



Na sequência, apresentam-se os cálculos para o dimensionamento dos momentos fletores no estado limite último (ELU).

• Direção X:

$bw = 100 \text{ cm} , h = 25 \text{ cm}, d' = 4 \text{ cm}$

$M_x = 20,8 \text{ kN.m}$

• **Esforços na Laje:**

$M_d =$	2080.0	(kgf.m)	: Esforços STRAP (COMBINADO)
$\gamma_f =$	1.0		: coeficiente de momento de cálculo.
$M_d = \gamma_f * M_d$	2080.0	(kgf.m)	

• **Características dos Materiais:**

$F_{ck} =$	30.0	(MPa)	
$F_{cd} =$	214.29	(kgf/cm ²)	
$F_{yk} =$	500.0	(MPa)	
$F_{yd} =$	4347.83	(kgf/cm ²)	
$F_{ct}^m = 0.3 * (F_{ck})^{2/3}$	2.896	(MPa)	: resistência média à tração do concreto.
$F_{ctk}^{sup} = 1.3 * F_{ct}^m$	3.765	(MPa)	: resistência superior à tração do concreto.
$F_{ctk}^{sup} =$	37.65	(kgf/cm ²)	

• **Dados Geométricos da Seção de Concreto:**

$b =$	100.0	(cm)	: cálculo por metro de largura.
$h =$	25.0	(cm)	: espessura da laje.
$d' =$	4.0	(cm)	
$d = h - d' =$	21.00	(cm)	: altura útil da seção de concreto.
$W_0 = b * h^2 / 6 =$	10416.7	(cm ³)	

• **Limites para Armadura Simples:**

$x_1 = 0.5 * d =$	10.50		
$y_1 = 0.8 * x_1 =$	8.40	(cm)	
$z_1 = (d - y_1 / 2)$	16.80	(cm)	
		(cm)	
$M_1 = 0.85 * (b/100) * y_1 * f_{cd} * z_1 / \gamma_f$	25704.0	(kgf.m)	: momento limite para armadura simples.
$M_{min} = [0.8 * W_0 * f_{ctk}^{sup} / \gamma_f] * (10^{-2})$	3137.84	(kgf.m)	: momento mínimo.

• **Dimensionamento à Flexão da Seção de Concreto:**

$y =$	0.55	(cm)	: $y = d * [1 - \sqrt{1 - (2 * M_d / (0.85 * (b/100) * d^2 * f_{cd})}]^{0.5}$
$z =$	20.72	(cm)	: $z = d * [1 - (0.5 * y / d)]$
$A_s = M_d / [(z/100) * F_{yd}]$	2.31	(cm ² /m)	: armadura calculada
$\rho_{min} = 0.15\% . b . h$	0.00150		: taxa de armadura mínima
$A_s^{min} = \rho_{min} * b * h$	3.75	(cm ² /m)	: armadura mínima

- Direção Y:

$$b_w = 100 \text{ cm} , h = 25 \text{ cm} , d' = 4 \text{ cm}$$

$$M_x = 22,6 \text{ kN.m}$$

- **Esforços na Laje:**

$M_d =$	2260.0	(kgf.m)	: Esforços STRAP (COMBINADO)
$\gamma_f =$	1.0		: coeficiente de momento de cálculo.
$M_d = \gamma_f * M_d$	2260.0	(kgf.m)	

- **Características dos Materiais:**

$F_{ck} =$	30.0	(MPa)	
$F_{ctd} =$	214.29	(kgf/cm ²)	
$F_{yk} =$	500.0	(MPa)	
$F_{yd} =$	4347.83	(kgf/cm ²)	
$F_{ct}^m = 0.3 * (F_{ck})^{2/3}$	2.896	(MPa)	: resistência média à tração do concreto.
$F_{ct}^{sup} = 1.3 * F_{ct}^m$	3.765	(MPa)	: resistência superior à tração do concreto.
$F_{ctk}^{sup} =$	37.65	(kgf/cm ²)	

- **Dados Geométricos da Seção de Concreto:**

$b =$	100.0	(cm)	: cálculo por metro de largura.
$h =$	25.0	(cm)	: espessura da laje.
$d' =$	4.0	(cm)	
$d = h - d' =$	21.00	(cm)	: altura útil da seção de concreto.
$W_0 = b * h^2 / 6 =$	10416.7	(cm ³)	

- **Limites para Armadura Simples:**

$x_1 = 0.5 * d =$	10.50		
$y_1 = 0.8 * x_1 =$	8.40	(cm)	
$z_1 = (d - y_1 / 2)$	16.80	(cm)	
		(cm)	
$M_1 = 0.85 * (b/100) * y_1 * f_{ctd} * z_1 / \gamma_f$	25704.0		
	3137.84	(kgf.m)	: momento limite para armadura simples.
$M_{min} = [0.8 * W_0 * f_{ctk}^{sup} / \gamma_f] * (10^{-2})$		(kgf.m)	: momento mínimo.

- **Dimensionamento à Flexão da Seção de Concreto:**

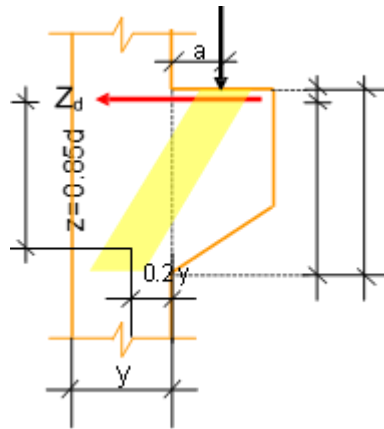
$y =$	0.60		
$y = \min$	20.70	(cm)	: $y = d * [1 - [1 - (2 * M_d / (0.85 * (b/100) * d^2 * f_{ctd})]^{0.5}]$
$A_s = \max(A_s, A_s^{min})$		(cm ² /m)	: armadura (a ser dada)
	2.51		
	0.00150		
	3.75		
	3.75		

Observando as reações de apoio da laje de transição sobre o console de apoio da ponte do Braghetto para a combinação ELU-COMB1, de modo a permitir o cálculo da sua amadura como console curto, conforme formulação analítica de Leonhardt & Monnig – Vol.2 [1978]:

Figuras 42 – ELU-COMB1 / Dimensionamento de Console Curto

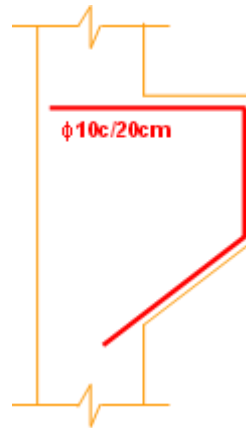
Dimensionamento da Armadura (Leonhardt & Monnig - Vol.2 - 1978): **Vd**

f_{yk} (MPa)	500,00
f_{ck} (MPa)	30,00
γ_s	1,15
γ_t	1,4
V (kN)	52,0
a (m)	0,30
b (m)	1,00
Cobrimento (m)	0,03
h (m)	0,55
d (m)	0,52
z (m) = 0,85 d	0,44
$Z_d = [\gamma_t \cdot V \cdot a] / z$ (kN)	49,41
f_{vd} (kN/cm ²)	43,48
A_s (cm ²)	1,14
A_s^{obtida}	ϕ 10c/20cm



Verificação da Biela Comprimida:

V (kN)	52,0
a (m)	0,30
b (m)	1,00
h (m)	0,55
d (m)	0,52
z (m) = 0,85 d	0,44
Cobrimento (m)	0,03
$\tau_{wd} = [\gamma_t \cdot V] / [b \cdot z]$	164,71
$\tau_{wd}^{lim} = 0,18 f_{cd}$	3857,14



Foram apresentados, pela equipe projetista, detalhadamente, os projetos de avaliação estrutural, reforço e restauração da ponte do Braghetto. Em virtude de deformações observadas desde a sua inauguração, existência de pontos com deslocamentos do concreto e exposição da armadura, furos no concreto devido a impacto

de veículos e outras situações que causam desconforto ao usuário, foi solicitada pelo DER/DF uma avaliação do ponto de vista estrutural do estado em que se encontra atualmente a ponte do Braghetto via modelo computacional e em função dos resultados obtidos foram propostos tratamentos para reforço e restauração da estrutura.

De forma similar aos resultados encontrados previamente pela WRJ Engenharia, as análises de Estado Limite Último (ELU) indicam que a Ponte do Braghetto atende os fatores de segurança exigidos pela NBR-6118/2014. Segue abaixo um resumo dos resultados:

- WRJ Engenharia (CP-160RN) e armaduras passivas:

$$M_{ud}^{\text{vão central}} = 1934 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{vão central}} = 1661 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

$$M_{ud}^{\text{apoio}} = 3594 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{apoio}} = 2530 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

- RA Rocha Engenharia (CP-160RN) e armaduras passivas:

$$M_{ud}^{\text{vão central}} = 1939 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{vão central}} = 1115 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

$$M_{ud}^{\text{apoio}} = 2823 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{apoio}} = 2117 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

- RA Rocha Engenharia (CP-140RN) e armaduras passivas:

$$M_{ud}^{\text{vão central}} = 1804 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{vão central}} = 1115 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

$$M_{ud}^{\text{apoio}} = 2812 \text{ tf.m} > M_{sd}^{\text{apoio}} = 2117 \text{ tf.m} \quad [\text{OK!}]$$

Os resultados do modelo computacional executados pela empresa RA Rocha Engenharia, considerando a hipótese de plastificação nos negativos, também atende o ELU. Os resultados encontrados também indicam que a estrutura atende ELS para fissuração, deformação excessiva e fadiga conforme prescrito na NBR-6118/2014.

Conseqüentemente, a estrutura foi reforçada e/ou restaurada para corrigir apenas problemas localizados para ter garantido os coeficientes normais de segurança, assim como recebeu tratamentos de reformulação da plataforma viária necessários para aumentar o conforto e a segurança dos usuários, sendo recomendadas as seguintes intervenções:

- Inclusão da laje de transição e de consoles de apoio em concreto armado nas extremidades dos balços da ponte;

- Armadura de reforço nos apoios ($\phi 16c/10cm$) p/ absorver esforços devido à laje de transição. Essa ferragem deverá ser disposta sobre a face superior do tabuleiro após remoção do capeamento nas seções X=10.0m e 170.0m, ou seja, nos pilares de extremidade da ponte na direção do tráfego de veículos;
- Armadura de reforço ($\square 25c/10cm$) p/ absorver esforços transversais nos apoios centrais. Essa ferragem deve ser disposta sobre a face superior do tabuleiro após remoção do capeamento nas seções X=60.0m e 120.0m, ou seja, nos pilares centrais na direção transversal ao tráfego de veículos;
- Tratamento das anomalias cadastradas como áreas de concreto segregada, armaduras expostas e com baixo cobrimento e injeção das fissuras e trincas com resina epóxi;
- Adequação do greide e reformulação do pavimento existente para pavimento alteado e incorporado à estrutura para reduzir cargas de enchimento e aumentar a rigidez do tabuleiro.

Embora a Ponte Braghetto apresente grandes deformações que são reportadas desde a época da sua inauguração, com o reforço estrutural de 1979 proposto pelo próprio Aderson Moreira da Rocha (autor do projeto), a estrutura ficou estável desde então e passou a atender as prescrições de norma para ELU e ELS. O DER/DF considerou conveniente em função de alguma surpresa que possa ser encontrada durante a restauração da ponte (cabos rompidos ou anomalias em galerias lacradas) sugerir um reforço com protensão externa apenas para aumentar ainda mais o fator de segurança da estrutura e reduzir as deformações existentes.

2.10 Protensão Externa – Verificações

Tem-se como ponto de partida os entendimentos firmados em comum acordo entre a empresa projetista RA Rocha Engenharia, a empresa responsável pelo CQP do projeto

– NCEE Engenharia e o órgão público DER/DF para adicionar armaduras ativas por meio de utilização de protensão externa, no sentido de proporcionar maiores condições de durabilidade à estrutura bem como conferir aumento de capacidade resistente das vigas longarinas. A protensão externa foi dimensionada de acordo com os seguintes critérios definidos em conjunto:

- Foi utilizado Protensão Limitada de acordo com a NBR 6118:2014, ou seja, deve-se atender o Estado Limite de Abertura de Fissuras;
- Tendo em vista a grande probabilidade de existirem cordoalhas rompidas ou danificadas, foram considerados apenas 70% das cordoalhas dos projetos originais.

Ressalta-se que também foram adicionados cabos de protensão externa nas vigas transversinas localizadas sobre os pilares, bem como nas vigas transversinas das extremidades dos balanços, com base nos mesmos critérios expostos anteriormente para as vigas longarinas, e ainda para atender os esforços adicionais introduzidos pela protensão externa das vigas longarinas especialmente nos trechos em balanço das transversinas existentes sobre os pilares.

De forma geral, a empresa RA Rocha finalizou a memória de cálculo adicional, com a avaliação do momento resistente último (M_{ud}), considerando a inclusão das cordoalhas externas, para seções no meio do vão central e sobre os apoios do vão central, a verificação do atendimento das tensões de serviço para o Estado Limite de Abertura de Fissuras, e ainda verificações adicionais pertinentes.

2.10.1 Verificações – Viga Longarina

Momento solicitante de cálculo / Estado Limite Último:

- Peso Próprio: (diagrama meio vão central) – tf.m:

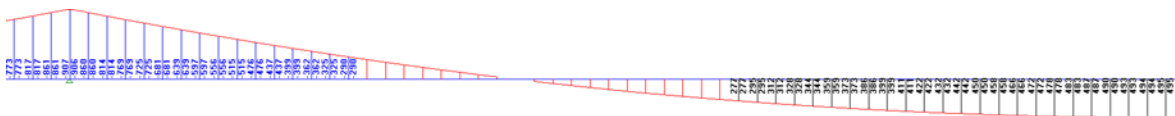
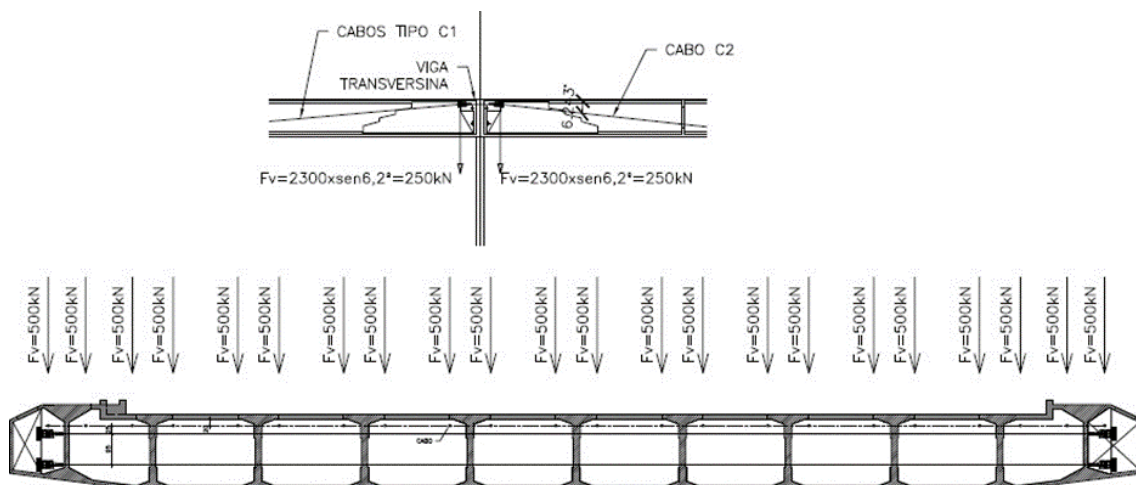


Figura 43 Cargas utilizadas no dimensionamento



Momento:



$$M_k = 2965 \text{ kN.m}$$

Como a viga transversina tem dimensões de viga parede, determina-se o tirante tracionado, conforme F. Leonhard, Volume 2:

$$\frac{l}{d} \cong \frac{3,25}{2,30} = 1,4$$

$$\text{Para } 2,5 > \frac{l}{d} > 1, \text{ o braço de alavanca } Z = 0,1 \cdot d \cdot (2,5 + 2 \frac{l}{d})$$

$$Z = 0,1 \cdot 2,30 \cdot (2,5 + 2 \cdot 1,4) \cong 1,22 \text{ m}$$

Tirante:

$$T = \frac{M_{s,d}}{Z} = \frac{1,4 \cdot 2965}{1,22} = 3402 \text{ kN}$$

2.10.3 Protensão Externa – Momento Resistente / Estado Limite Último

A seção resistente final, de altura igual a 230cm, conta com as armaduras existentes (tanto as passivas quanto as ativas) e com a armadura de protensão externamente ancorada. Será utilizado um cabo de 12 cordoalhas de 15,2mm de aço CP190-RB de cada lado das vigas totalizando 2 cabos por viga, conforme características das seções transversais a seguir:

Momento Positivo: Armadura Ativa CP190 RB

Fck = 30 Mpa;

Armadura Passiva Considerada: $ep,sup = 26cm$

As = 48cm² (desprezando a armadura existente) $ep,inf = 69cm$

Ds 145cm $E_p = 200000 MPa$ Tensão de escoamento: $f_{pyk} = 1710 Mpa$

Resistência à tração: $f_{ptk} = 1900 Mpa$

De acordo com a NBR 6118:2104, para pós-tração com cordoalhas engraxadas, tensão máxima σ_{pi} aplicada pelo aparelho de protensão foi:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,8 \cdot f_{ptk} = 0,8 \cdot 1900 = 1520 MPa \\ 0,88 \cdot f_{pyk} = 0,88 \cdot 1710 = 1504,8 MPa \end{cases} \quad \therefore \sigma_{pi} = 1504,8 MPa$$

Foi considerado, inicialmente, perda de protensão total em 10%, portanto, após as perdas, a tensão de pré-alongamento

$$\Delta\sigma_{p\infty} = 1504,8 \cdot (1 - 0,10) \cong 1354 MPa$$

Adotou-se cabo com 6 cordoalhas $\emptyset = 15,2mm$, área de 1 cabo = $6 \cdot 1,4 = 8,4cm^2$

Empregam-se dois cabos de cada lado da transversina, um abaixo do C.G. da seção transversal e o outro cabo acima do C.G.

$$Ap_{inf} = Ap_{sup} = 2 \cdot 8,4 = 16,8cm^2$$

2.10.4 Capacidade Resistente para absorver o esforço de tração (tirante)

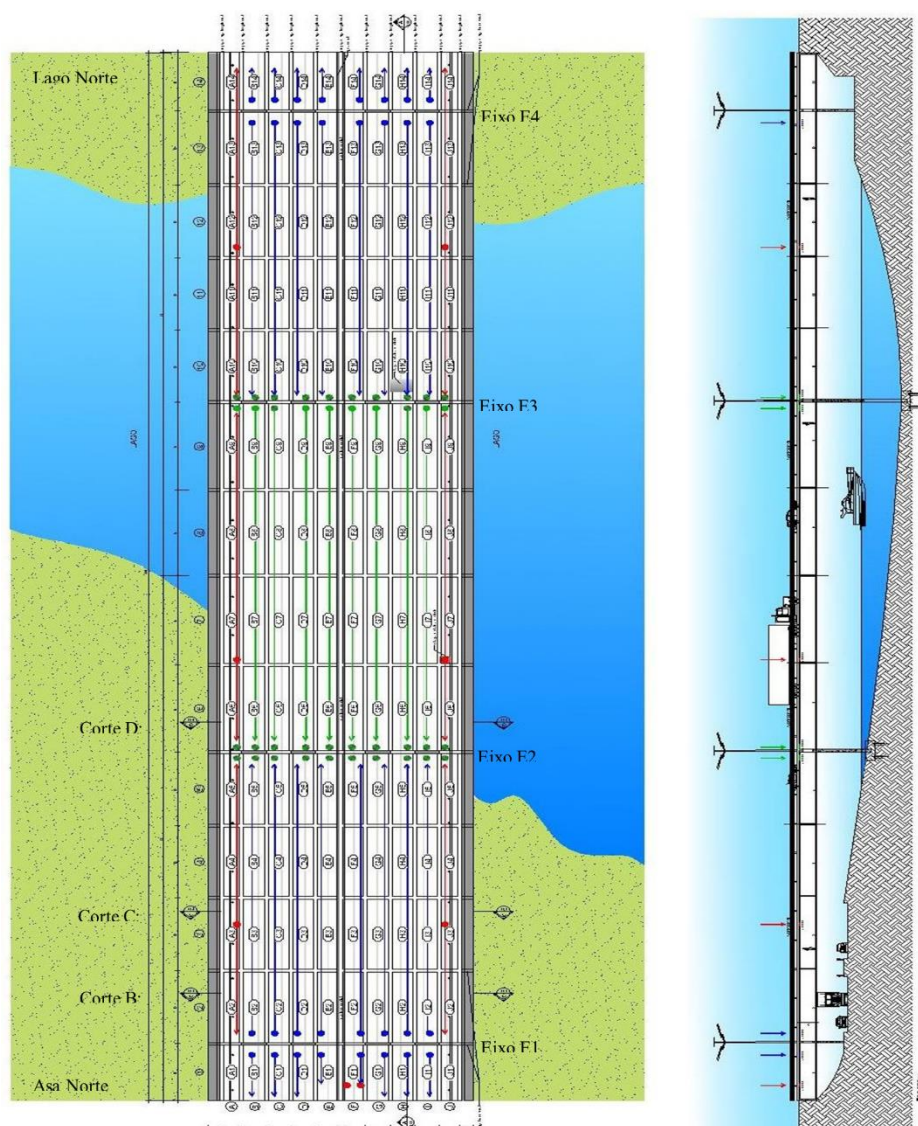
$$Rd = As \cdot fy + Ap_{sup} \cdot \sigma_{p\infty}$$

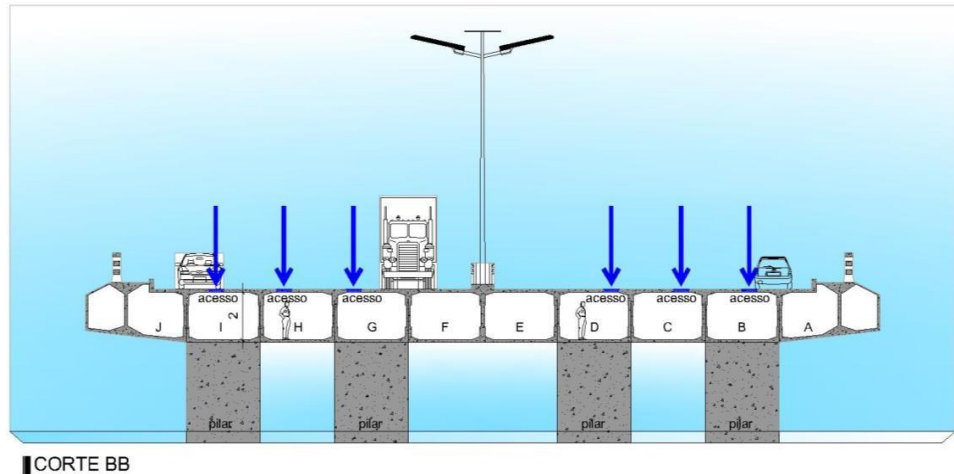
$$Rd = 48,43,48 + 16,8 \cdot 135,4 = 4362kN > Md = 1,4 \cdot 2965 = 4151kN \text{ (OK)}$$

3.0 PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL

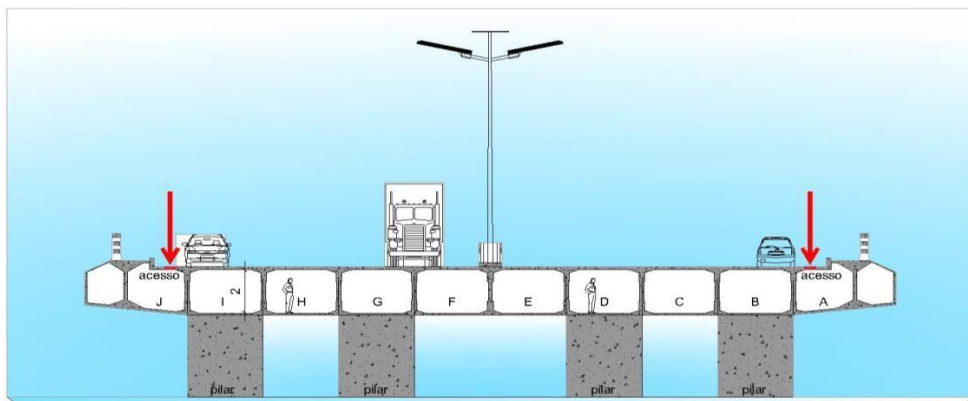
Foram realizadas vistorias nas áreas externas e internas da ponte do Braghetto por equipe técnica especializada com o objetivo de obter informações precisas das reais condições em que se encontrava. A parte interna da ponte foi vistoriada por meio de acessos de inspeção localizados na parte superior do tabuleiro na própria pista de rolamento da ponte, o que foi possível somente com a interrupção temporária do tráfego de veículos

Figuras 44 – Acessos de Inspeção da Ponte do Braghetto – Planta e Corte A



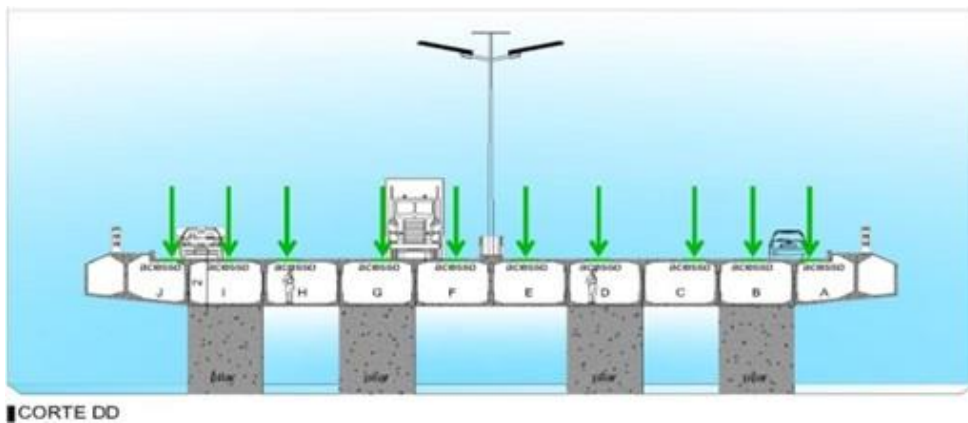


■ CORTE BB



■ CORTE CC

Figura 45 – Acessos de Inspeção da Ponte do Braghetto – Cortes B, C e D. Observação:
 Figura cortesia do arquiteto Francisco Júnior – DETEC/DE/NOVACAP



■ CORTE DD

De imediato, pode-se observar claramente uma estrutura com a face superior do tabuleiro visivelmente deformada, em especial no vão central e nas bordas junto aos passeios laterais. Durante a vistoria também foi observada a existência de muitas fissuras e pontos localizados de segregação e deterioração do concreto de regiões com baixo cobrimento com exposição e corrosão de armaduras.

Foram detectados muitos pontos com infiltração caracterizados pela ocorrência de passagem ou acúmulo de água junto a poros do concreto, fissuras, falhas ou aberturas na superfície causadas em especial por água da chuva do sistema de drenagem. Esses pontos de infiltração acabaram causando carreamento de materiais, ferrugem e coloração alaranjada no concreto.

Em virtude da cota do gabarito rodoviário da pouca altura disponível entre as pistas que unem os Eixos W3 e L2 Norte, que passam sob a ponte do Braghetto no trecho final da Asa Norte, existe um longo histórico de colisões na laje inferior do tabuleiro da ponte por caminhões de maior altura que trafegavam sob a ponte. Muitas dessas colisões provocaram inúmeros acidentes, levando ao deslocamento de parte do concreto da laje inferior e exposição de armaduras, muitas das quais já tiveram intervenções por parte do próprio DER/DF para corrigir problemas localizados, impedir o aumento do tamanho dos furos na laje de concreto e evitar quedas de materiais sobre os veículos.

Em função das deformações visíveis no tabuleiro, foram realizados inúmeros levantamentos do nivelamento da estrutura por equipe topográfica, conforme pode-se observar nos relatórios técnicos RTS 2.3-055, 067, 072, 074 e 082/98 realizados pela Concremat Engenharia em 1998 na parte superior do tabuleiro e mais recentemente, em Maio/2018, pelo próprio DER/DF.

3.1 Relatório Fotográfico de Manifestações das Patologias

Nesta seção, das Figuras 46 a 75, será apresentado um relatório fotográfico das principais patologias e anomalias encontradas na ponte do Braghetto e que foram alvo das intervenções realizadas no período da reabilitação.

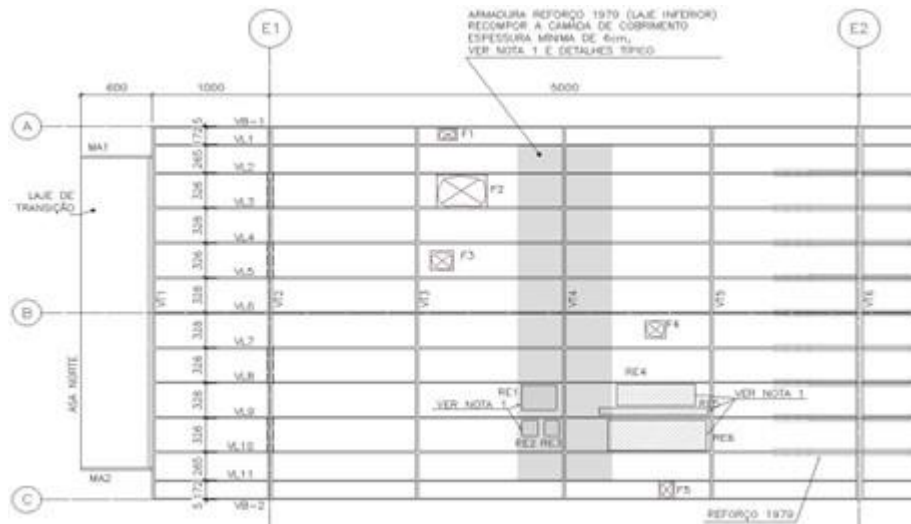


Figura 46 – Laje Inferior do Tabuleiro Eixos E1 a E2 Furos Existentes (F1 a F5s) Furo – Parcialmente Reparados (RE1 a RE6)



Figura 47 – Furos na Laje Inferior do Tabuleiro (F2, F3 e Furos Reparados)

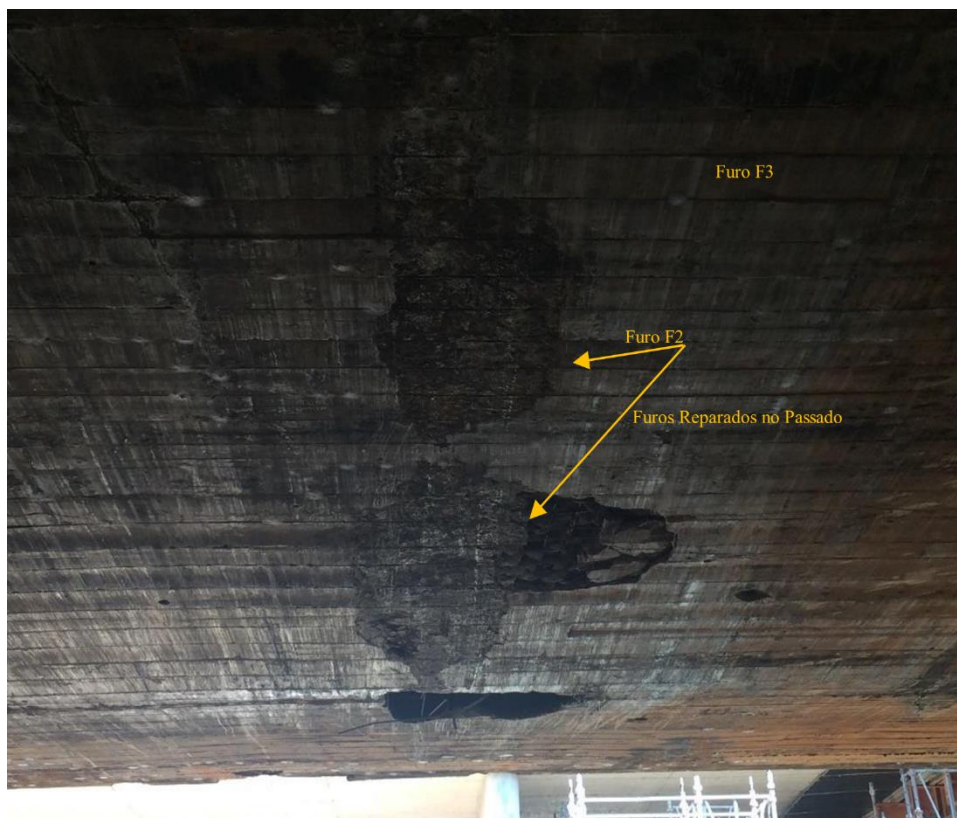


Figura 48 – Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F1)



Figura 49 – Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F2)



Figura 50 – Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F3)

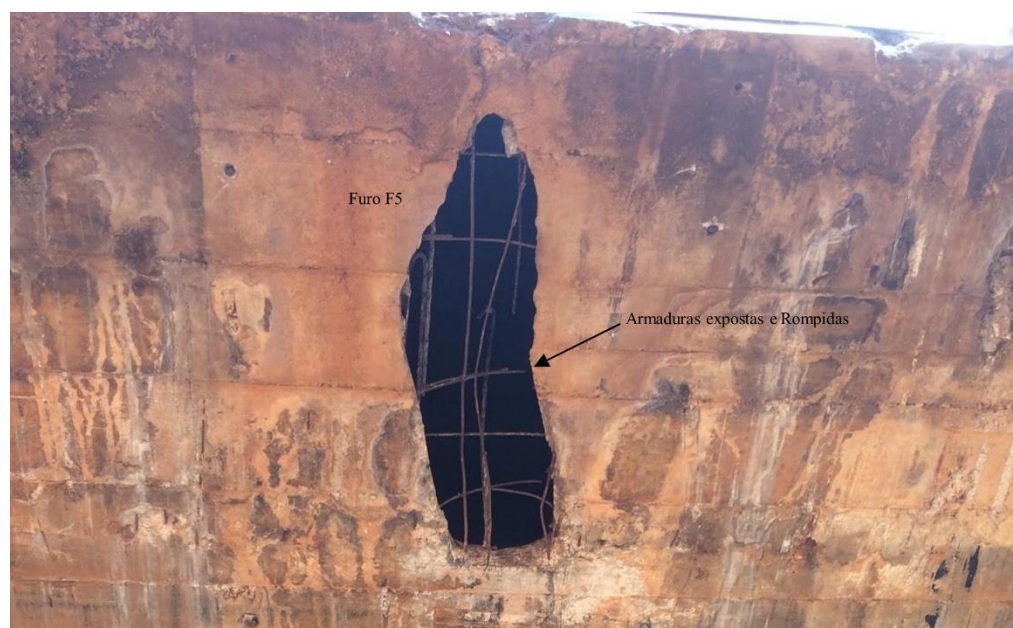


Figura 51 – Furo na Laje Inferior do Tabuleiro (F4)



Figura 52 – Furos Existentes e Reparos na Laje Inferior do Tabuleiro

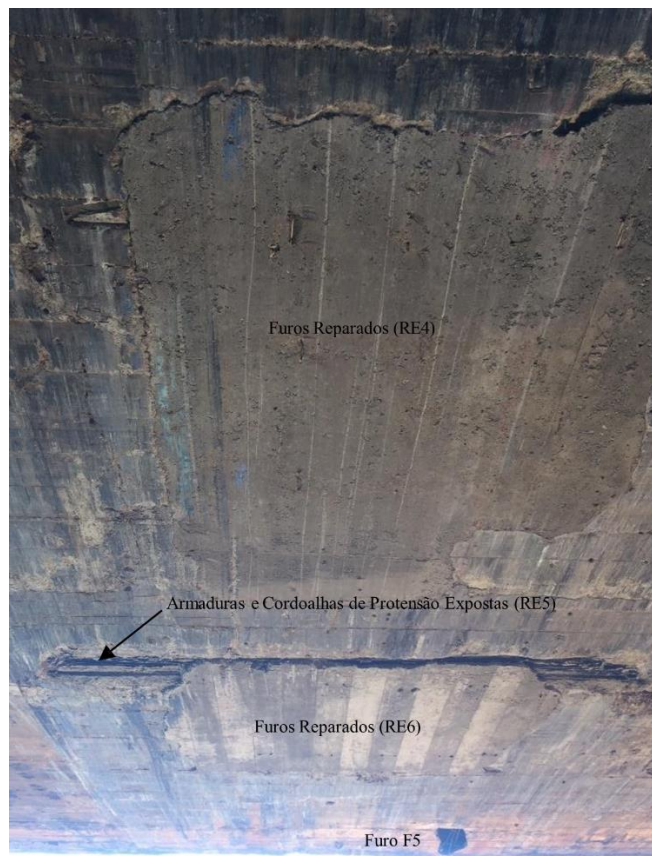


Figura 53 – Croqui localização armadura de reforço 1979 (laje inferior)

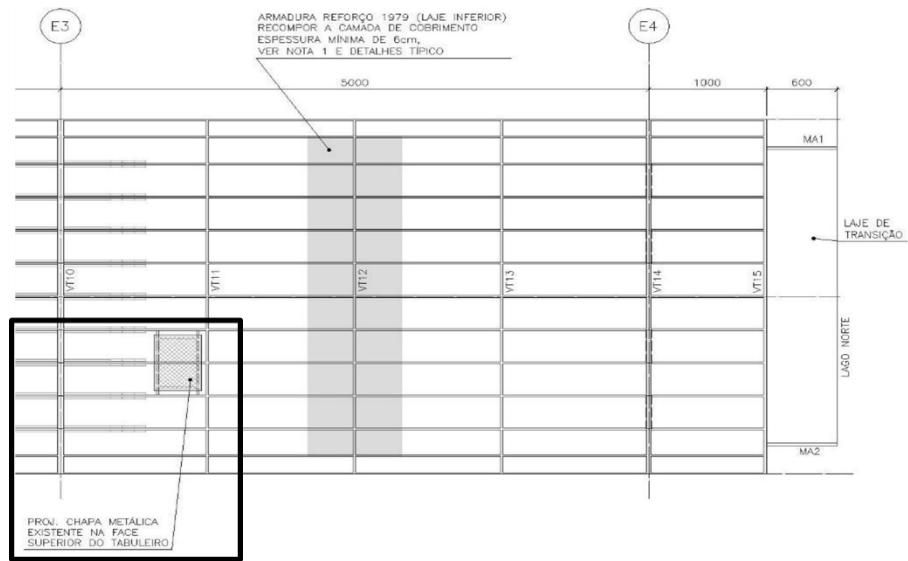


Figura 54 – Laje Superior do Tabuleiro – Eixos E3 a E4 Chapa Metálica p/ Vedar Furo Existente na Laje



Figura 55 – Tubulações de Drenagem da Galeria Celular entre VL1 e VL2



Figura 56 – Infiltrações de Água e Carbonatação do Concreto. Tubulações de Drenagem Desativadas da Galeria Celular entre VL1 e VL2



Figura 57 – Tubulações de Drenagem – Infiltrações de Água e Deslocamentos do Concreto. Encontro da Tubulação de Drenagem com Laje de Topo



Figura 58 – Tubulações de Drenagem - Infiltrações de Água e Deslocamentos do Concreto



Figura 59 – Encontro da Tubulação de Drenagem com Laje de Topo

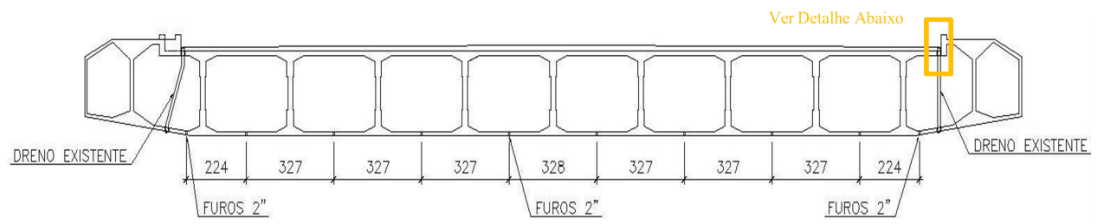


Figura 60 – Tubulações de Drenagem de Água Pluvial nas Laterais da Pista de Rolamento. (Observação: Grande quantidade de terra, matéria orgânica e plantas)

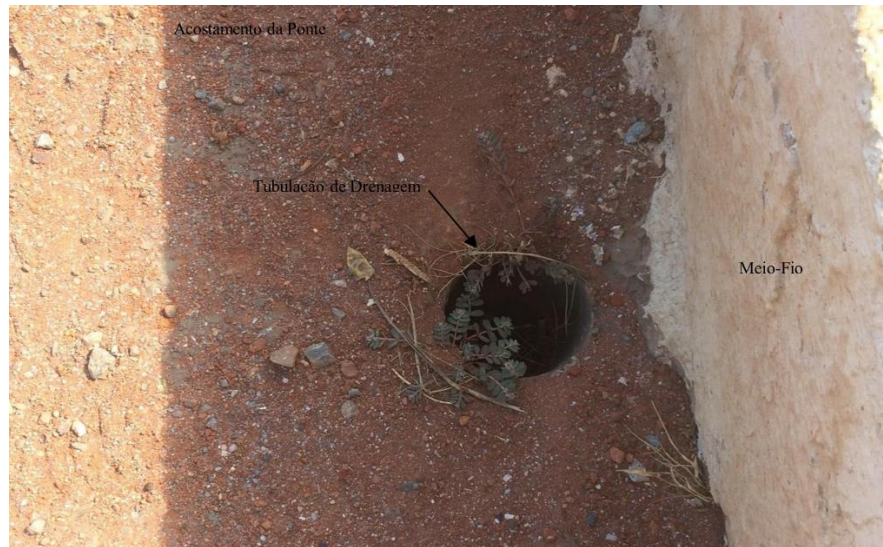


Figura 61 – Tubulações de Drenagem de Água Pluvial nas Laterais da Pista de Rolamento. (Observação: Tubulação totalmente obstruída)



Figura 62 – Deslocamentos do Concreto na Laje Superior. Observação: Locais de acesso (visitas) que foram lacrados



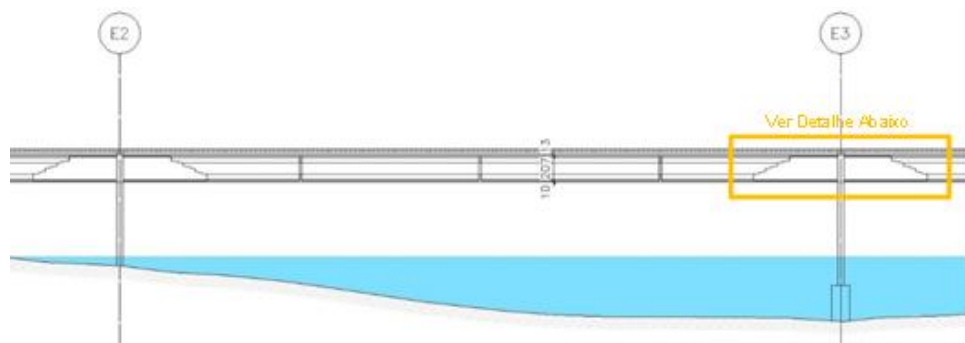
Figura 63 – Deslocamentos do Concreto na Laje Superior. Observação: Locais de acesso que foram lacrados



Figura 64 – Deslocamentos do Concreto na Laje Superior e Armaduras Expostas



Figura 65 – Regiões com Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas



Figuras 66 – Regiões com Concreto Segregado, Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas



Figuras 67 – Regiões com Baixo Cobrimento e Armaduras Expostas Vigas Transversinas de Topo



Figura 68 – Armaduras Passivas e Cordoalhas de Protensão Expostas Laje Inferior do Tabuleiro (Colisão de Veículos)



Figura 69 – Armaduras Passivas e Cordoalhas de Protensão Expostas
Laje Superior do Tabuleiro (Quebra da Mísula da Longarina para colocação de Visita)



Figura 70 – Trincas na Face Interna das Galerias Celulares



Figura 71 – Trincas na Face Interna das Galerias Celulares



Figura 72 – Trincas na Fachada Externa da Ponte

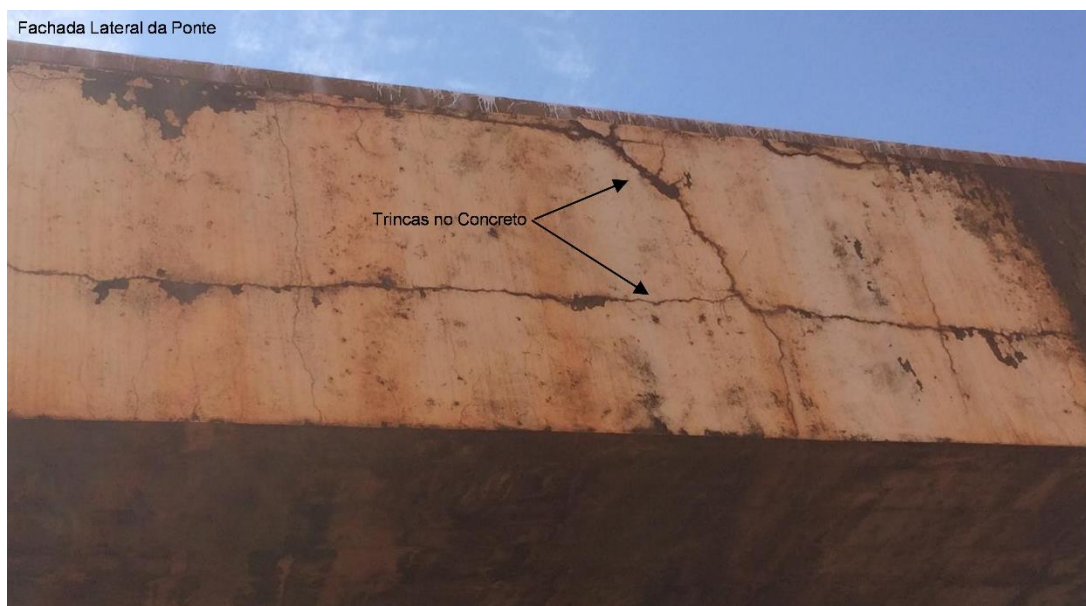


Figura 73 – Trincas na Laje de Fundo do Tabuleiro da Ponte. (Observação: Sinais de Resina Epóxi para Preenchimento das Trincas no Passado)

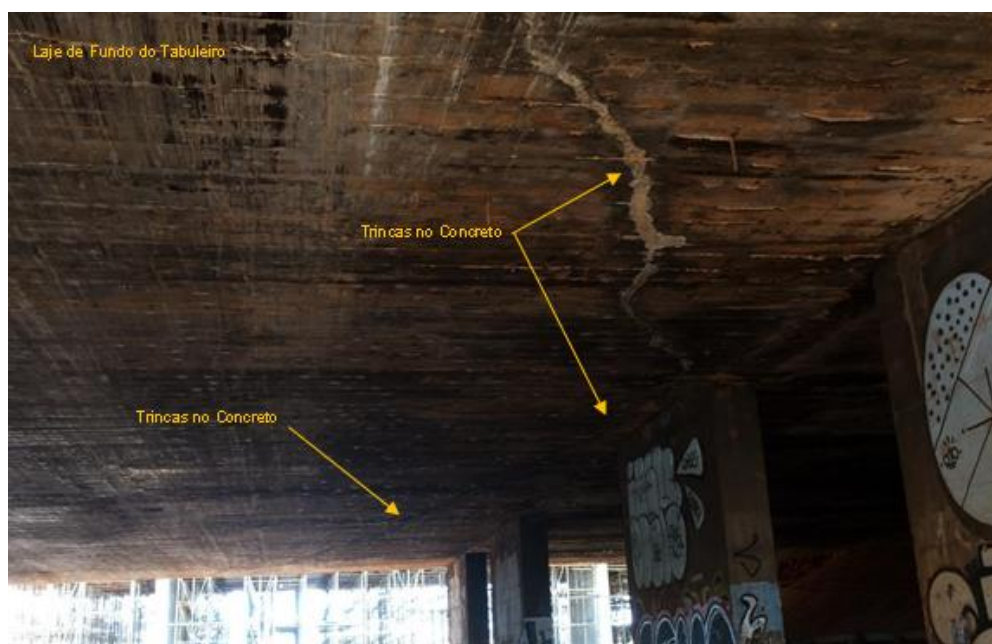


Figura 74 – Trincas nas Paredes das Longarinas. Pontos de Infiltração, Carreamento de Material, Ferrugem e Coloração Alaranjada no Concreto



Figura 75 – Trincas nas Paredes das Longarinas. Pontos de Infiltração, Carreamento de Material, Ferrugem e Coloração Alaranjada no Concreto



3.2 Metodologia de Recuperação

De uma maneira geral, pode-se concluir que a incidência das patologias no concreto e na armadura ocorrem de forma generalizada, embora não cheguem a comprometer a estabilidade global da estrutura e nem sua resistência local. Dessa forma, a recuperação dos elementos estruturais é feita visando reestabelecer condições mínimas de durabilidade do concreto, bem como manter um aspecto visual homogêneo e ampliar a vida útil da estrutura.

Muitas dessas manifestações patológicas, como corrosão, tiveram sua gênese devido ao pequeno cobrimento de armadura que era previsto na norma NB1 de 1960, quando da realização da construção da ponte Braghetto.

Metodologia geral para a recuperação do cobrimento de concreto para as armaduras expostas e corroídas:

- Cortar todo o concreto deteriorado até atingir uma camada de concreto sã e homogêneo para total exposição da armadura utilizando rebarbadores, martelos de baixa potência ou manualmente com uso de marretas e ponteiros;
- Apicoar todas as faces do concreto mesmo que não apresentem anomalias para receber o cobrimento de recomposição e homogeneização;
- Escovar energicamente todas as armaduras com perda de seção $\leq 10\%$ da seção original e aplicar *primer* anticorrosivo à base de zinco (ARMATEC ZN);
- Substituir as armaduras com perda de seção $> 10\%$ da seção original. As barras que irão substituir os trechos de armadura afetadas serão solidarizadas à estrutura através de solda, transpasse ou chumbamento com adesivo epoxídico respeitando-se critérios normativos de ancoragem das armaduras;

- Lavar toda a superfície a ser recomposta com jateamento de água deixando-a na condição “saturada e seca”;
- Com a superfície na condição “saturada e seca”, aplicar como ponte de aderência uma pasta composta de cimento, água e adesivo acrílico, como o VEDAFIX, na proporção 1:1 (água:adesivo) com quantidade suficiente de cimento para aplicação da pasta com pincel;
- Aplicar a ARGAMASSA ESTRUTURAL 250 da VEDACIT ou equivalente logo em seguida, com a ponte de aderência no estado fresco. O produto pode ser aplicado manualmente e compactado com a ponta dos dedos, sobre o substrato em camadas de 10 mm. Após a compactação, executar ranhuras para promover melhor aderência da camada posterior. Na aplicação das camadas subsequentes, umedecer a camada anterior e repetir o processo de aplicação não ultrapassando o intervalo máximo de 1 hora, à temperatura de 25°C, entre as camadas. O acabamento pode ser executado com sarrafo de madeira e esponja levemente umedecida. Finalizada a aplicação, promover cura úmida ou química, com agente de cura química, como o TRI-CURING da VEDACIT ou equivalente, respeitando o consumo;
- Para a recomposição de peças com reparos rasos (profundidade inferior a 3.0cm), a reconstituição deverá ser realizada com argamassa aditiva com microsílca, adicionado na proporção entre 5% e 15% sobre o peso do cimento;
- Para recomposição de peças com reparos profundos (profundidade superior a 3.0cm) a reconstituição deverá ser feita utilizando microconcreto aditivado com microsílca ou graute. A necessidade do uso de formas deverá ser definida de acordo com as condições locais.

Metodologia geral do tratamento de trincas e fissuras com injeção de resina a base de epóxi:

- Alargar a superfície da trinca/fissura formando uma cunha com cerca de

- 1.0cm de largura para cada um dos lados;
- Limpar a superfície de todos os contaminantes tais como óleos, graxas e qualquer tipo de partícula preferencialmente com jato de água;
 - Secar a trinca/fissura com jato de ar;
 - Selar as superfícies da trinca/fissura para impedir o epóxi de vazar quando da injeção;
 - Fazer furos ao longo da trinca/fissura espaçados de 10 a 30cm e ligeiramente mais profundos que a altura da trinca/fissura;
 - Introduzir tubos plásticos nos furos com pontas salientes de cerca de 10cm e fixados no selante;
 - Fazer a injeção do epóxi em um tubo de cada vez, começando pelo inferior se a trinca/fissura for vertical e por uma das extremidades se a trinca/fissura for horizontal. Nessa fase, todos os outros tubos estarão com a extremidade externa obturada;
 - Terminada a injeção de todos os tubos, cortar as pontas salientes e limpar a superfície tratada, lixando o material excedente com lixadeiras elétricas.

Para resolver os recorrentes problemas dos furos na laje inferior do tabuleiro devido às colisões de veículos que provocaram inúmeras perdas de seção de concreto da laje inferior e exposição de armaduras, foi reforçada a estrutura com armaduras complementares de costura, conforme projeto específico (TTN-BRAGHETTO-RAROCHA-DE-006). Vale ressaltar que, de acordo com o novo arranjo das vias de circulação de veículos do Trevo de Triagem Norte (TTN), a pista abaixo da ponte deixará de existir e, portanto, uma vez resolvido os problemas existentes, as colisões de veículos deixarão de ocorrer.

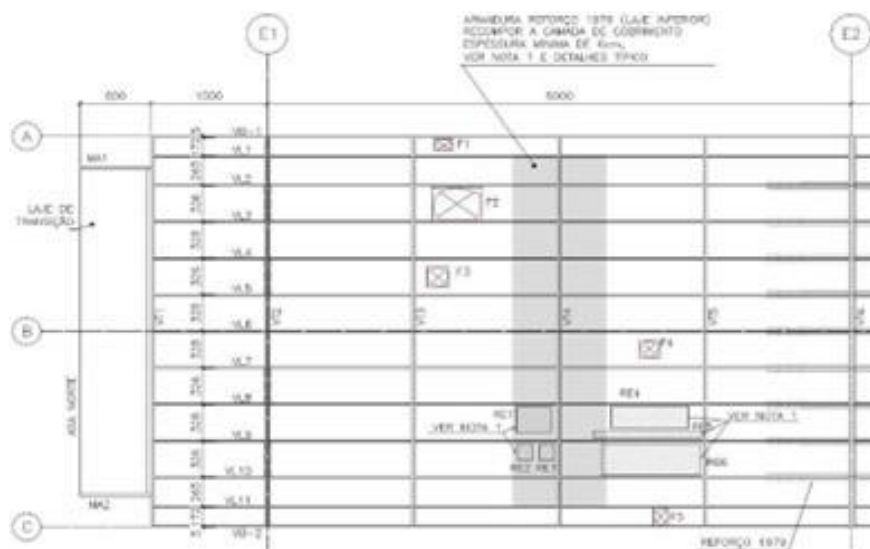
Metodologia geral do tratamento e recuperação dos furos nas lajes inferior e superior do tabuleiro:

- Escorar toda a região no entorno dos furos antes de iniciar as operações de restauração e reforço para evitar acidentes;

- Cortar todo o concreto deteriorado até atingir camada de concreto sã e homogêneo utilizando rebarbadores, marteletes de baixa potência ou manualmente com marretas e ponteiros;
- Avançar cerca de 10cm além das superfícies deterioradas de modo a formar um contorno regular com geometria retangular;
- Apicoar todas as faces cortadas do concreto para receber o cobrimento de recomposição e homogeneização;
- Executar projeto de reforço com introdução de ferragem adicional ($\square 10$ c/10cm) e camada de recobrimento com concreto estrutural de resistência característica $F_{ck} = 30$ MPa, aditivado com microsílica, conforme Figuras 76 e 77.

Figuras 76 – Recuperação dos Furos na Laje Inferior do Tabuleiro – Eixos E1 a E2

(continua...)



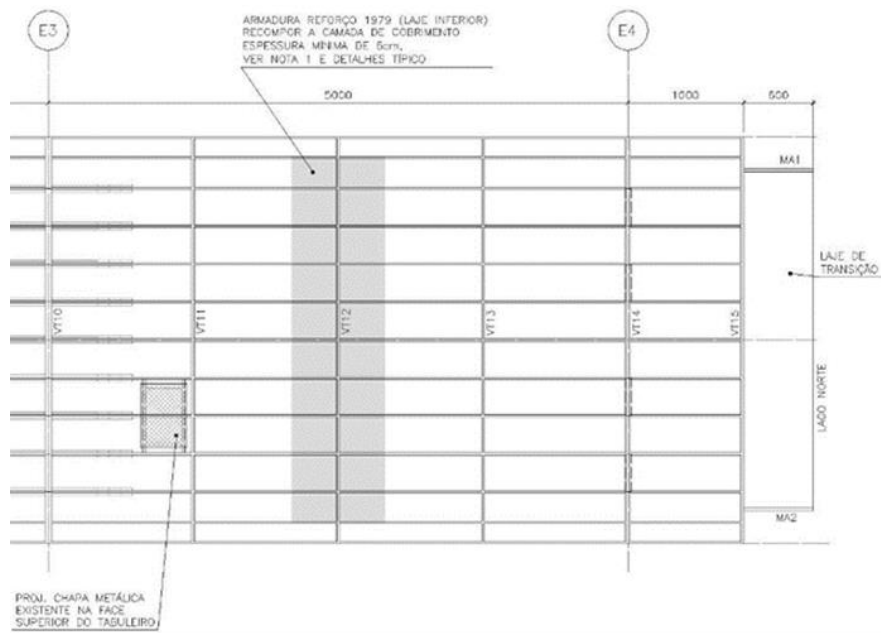


Figura 76b – Recuperação dos Furos na Laje Inferior do Tabuleiro – Eixos E1 a E2

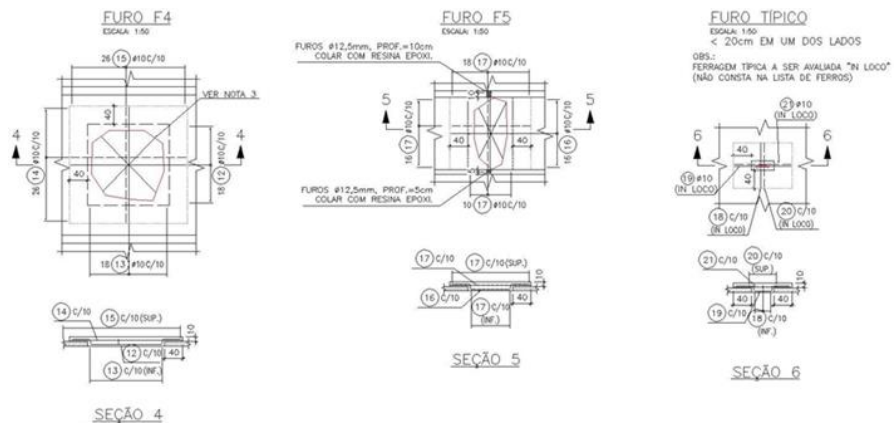
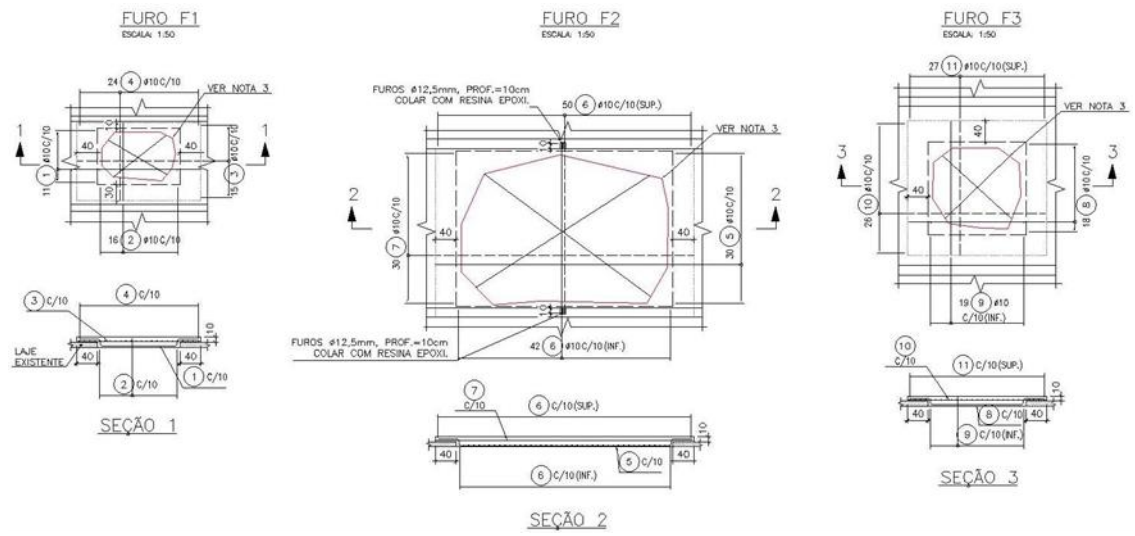


Figura 77 – Recuperação dos Furos na Laje Superior do Tabuleiro – Eixos E3 a E4



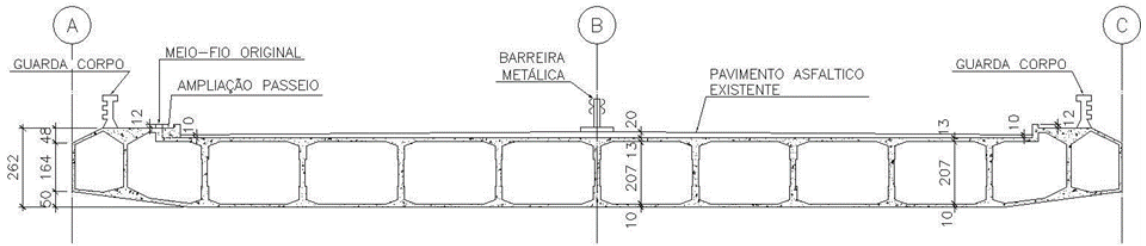
fabricante para selar, impermeabilizar e uniformizar as superfícies absorventes do concreto;

- Posteriormente à aplicação do selador, limpar novamente a superfície com remoção completa de óleos, graxas e contaminantes para aplicação de tinta à base de resina acrílica (sumacril acrílico fosco ou equivalente) com 2 demãos de 40 micrometros seguindo recomendações de uso do fabricante.

O sistema de drenagem de água pluvial foi recuperado com o tratamento dos pontos de infiltração e a substituição dos condutos existentes por peças novas para evitar problemas futuros com acúmulo de água, carreamento de materiais, ferrugem e alteração da coloração do concreto. No projeto de reforço e recuperação da ponte do Braghetto, recomendou-se a inclusão de novos furos de drenagem com diâmetro $\phi = 2''$ a serem executados na laje inferior do tabuleiro para evitar acúmulo de água na galeria celular, conforme projeto executivo específico.

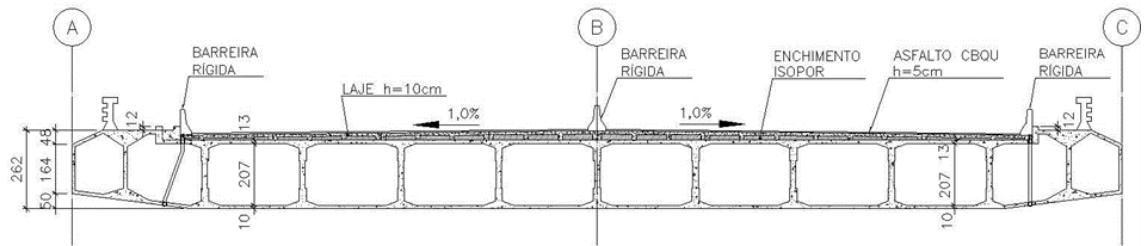
Para combater o problema das deformações existentes no tabuleiro da ponte, utilizou-se a remoção completa do pavimento, ou seja, a retirada da camada de pavimento asfáltico até atingir a face superior do estrado celular e uma adequação do greide com um sistema de pavimento alteado e incorporado à estrutura que permitirá uma redução das cargas permanentes do pavimento atual e um pequeno aumento da rigidez do tabuleiro, garantindo maior conforto e segurança aos usuários.

Figura 78 – Reformulação do Greide – Seção Transversal Antiga e Modificada



SEÇÃO TRANSVERSAL ATUAL

ESCALA: 1:125



SEÇÃO TRANSVERSAL MODIFICADA

ESCALA: 1:125

Figura 79 – Reformulação do Greide – Barreiras Rígidas (Guarda-Corpo)

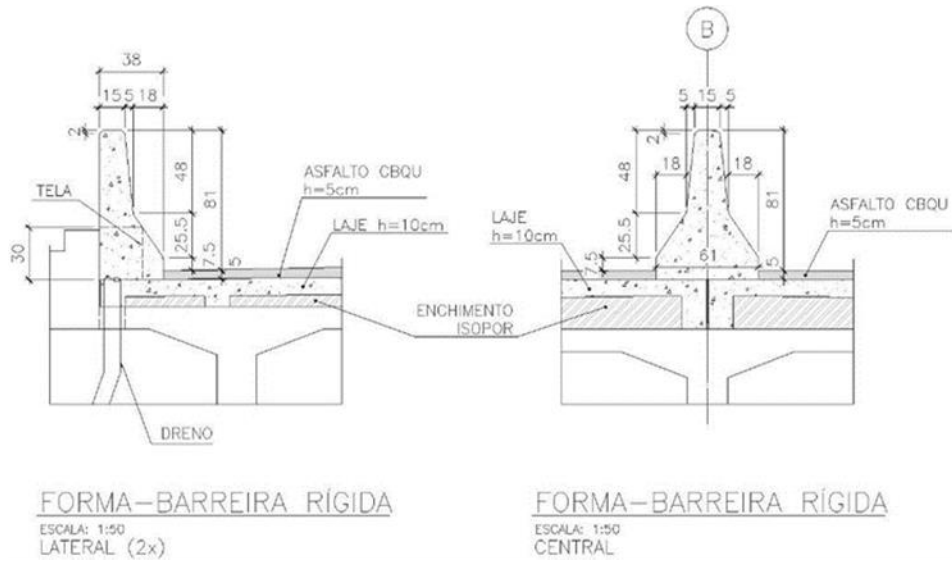


Figura 80 – Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo Típico – Planta

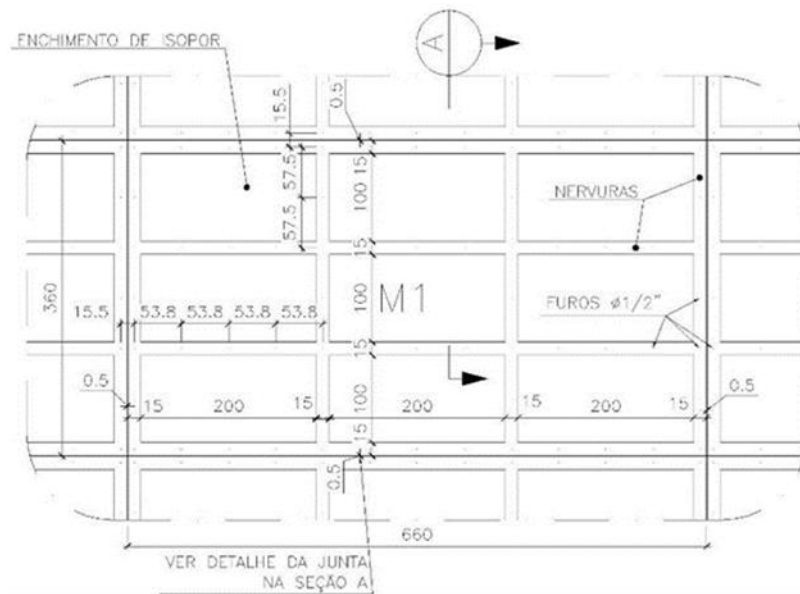


Figura 81 – Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo Típico – Seção A

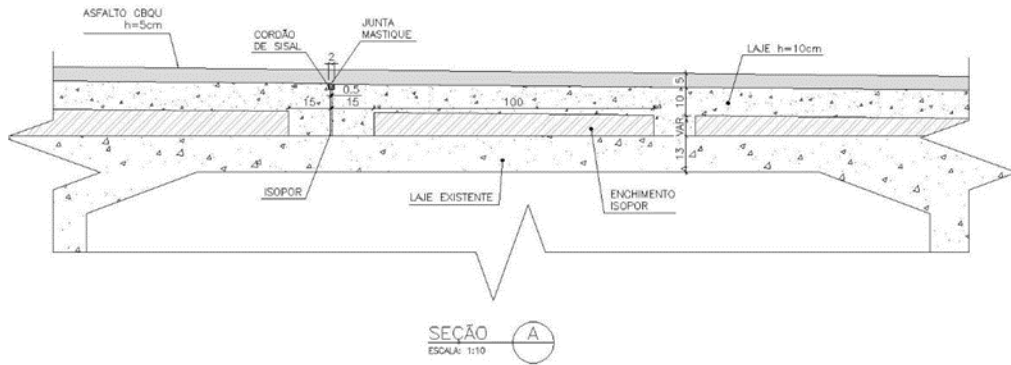


Figura 82 – Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo 1 a 3 – Armadura

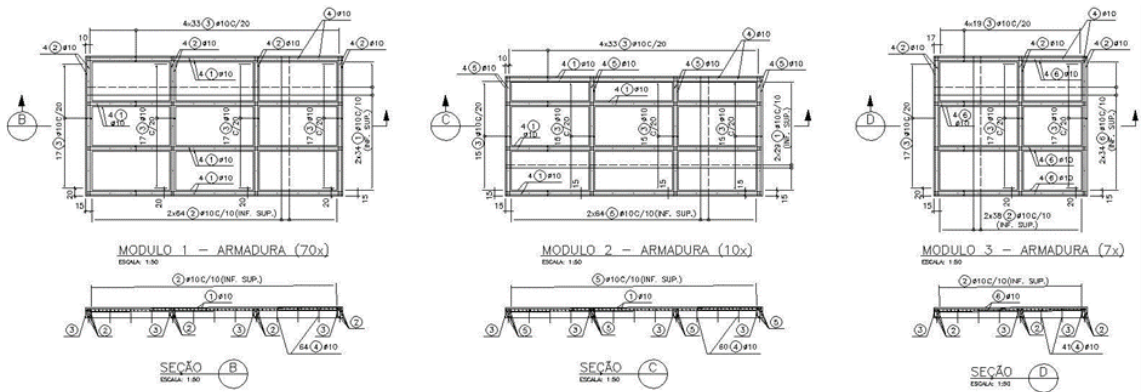


Figura 83 – Reformulação do Greide – Piso Elevado – Módulo 4 a 6 – Armadura

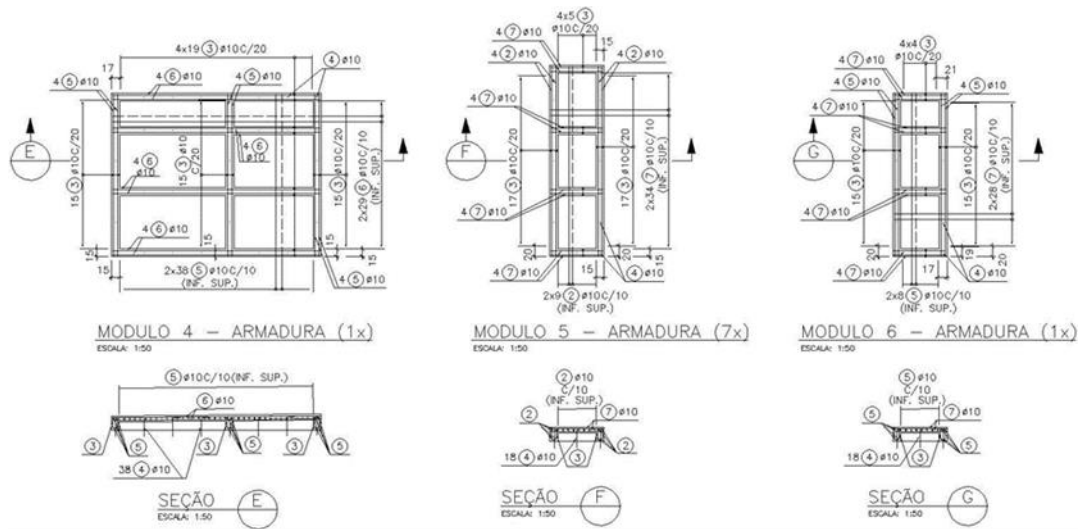
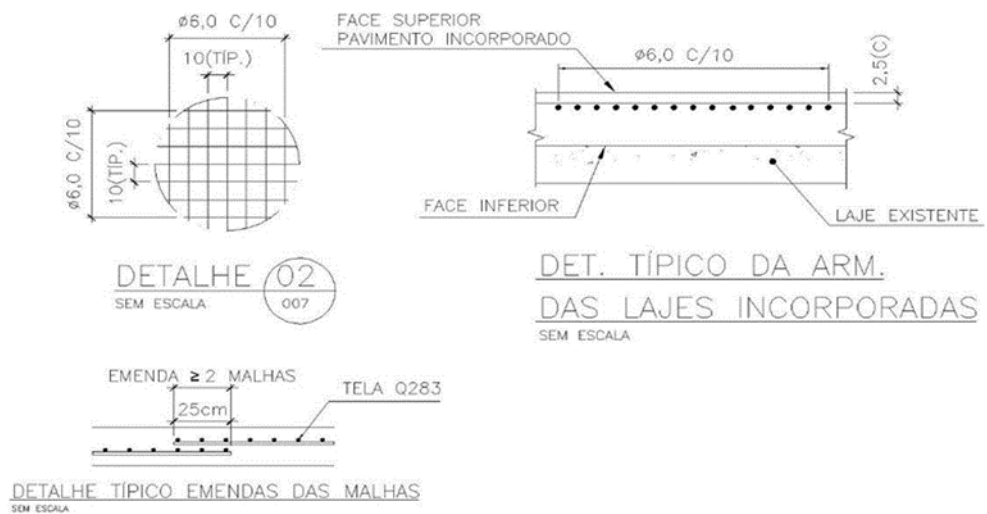


Figura 84 – Reformulação do Greide – Piso Incorporado – Tela na Face Superior



3.2.1 Relatório Fotográfico Recuperação Estrutural

A seguir, apresentam-se as imagens do processo de recuperação da Ponte Braghetto.

Figura 85 – Armadura novas vigas de apoio a protensão



Figura 86 – Tratamento de trincas nas vigas existentes e perfurações das passagens dos cabos de protensão



Figura 87 – Abertura da visitas e tratamento do concreto com jateamento de água



Figura 88 – Tratamento do concreto com jateamento de água



Figura 89 – Tratamento de trincas



Figura 90 – Fiação de armadura das Barreiras de concreto com epóxi



Figura 91 – Retirada da pavimentação existente e regularização do tabuleiro



Figura 92 – Retirada da pavimentação existente e regularização do tabuleiro



Figura 93 – Armadura das novas vigas



Figura 94 – Execução vigas transversinas internas



Figura 95 – Tratamento de trincas área interna

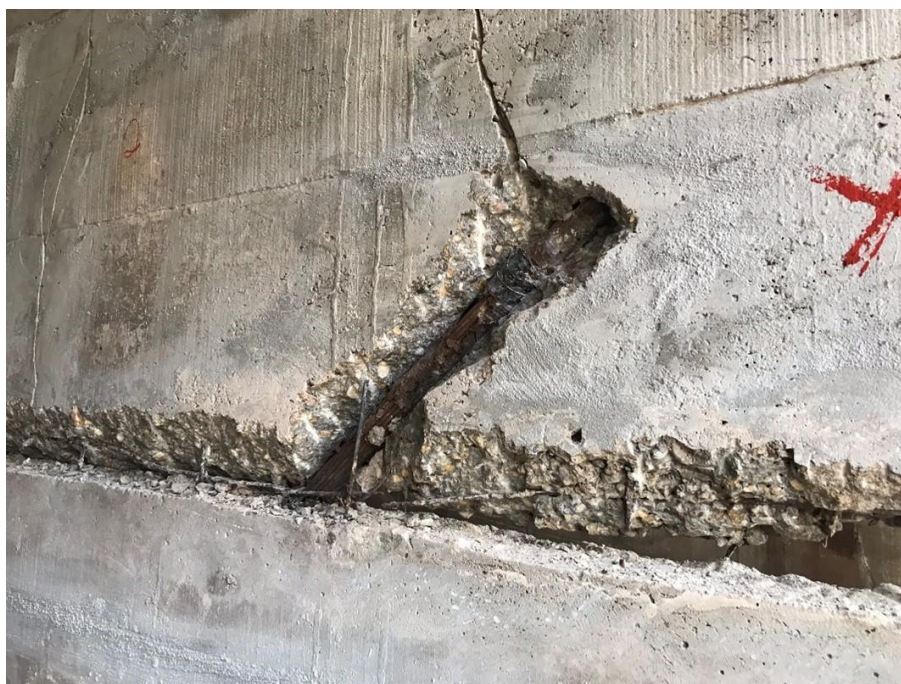


Figura 96 – Recuperação dreno



Figura 97 – Recuperação dreno



Figura 98 – Abertura no tabuleiro



Figura 99 – Tratamento de trincas com resina epóxi

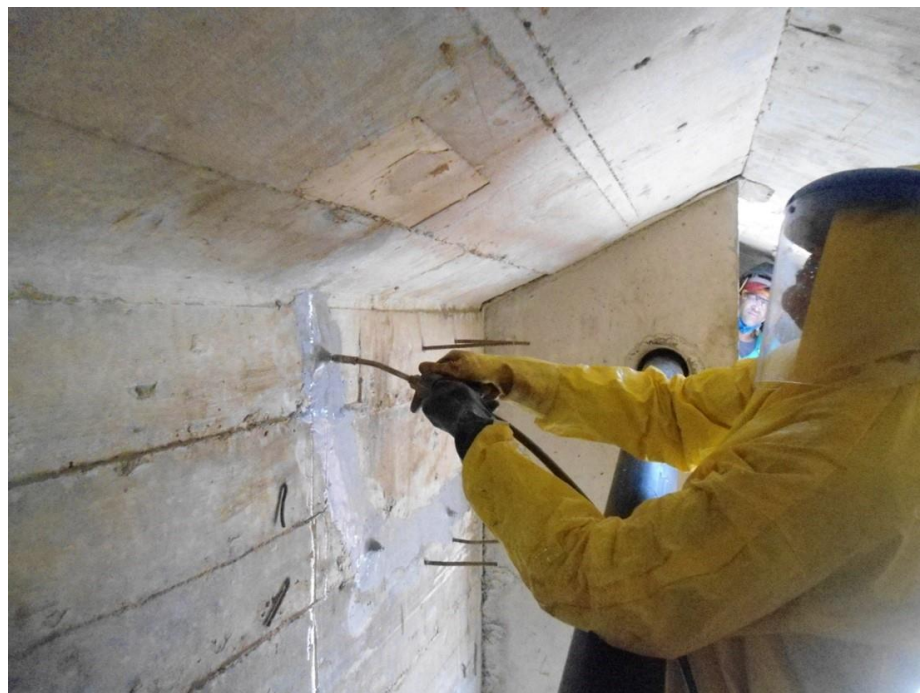


Figura 100 – Tratamento de trincas com resina epóxi



Figura 101 – Cabos de protensão novos



Figura 102 – restauração da laje inferior



Figura 103 – Reforço nos pilares etapa 1



Figura 104 – Reforço nos pilares etapa 2



Figura 105 – Concretagem reforço nos pilares



Figura 106 – Detalhe da execução da armadura de reforço dos pilares



Figura 107 – Detalhe da concretagem da camada de recobrimento de reforço dos pilares



Figura 108 – Detalhe da concretagem da camada de recobrimento



Figura 109 – Execução de tratamento na laje inferior



Figura 110 – Instalação de enscadeira para tratamento na parte submersa dos pilares

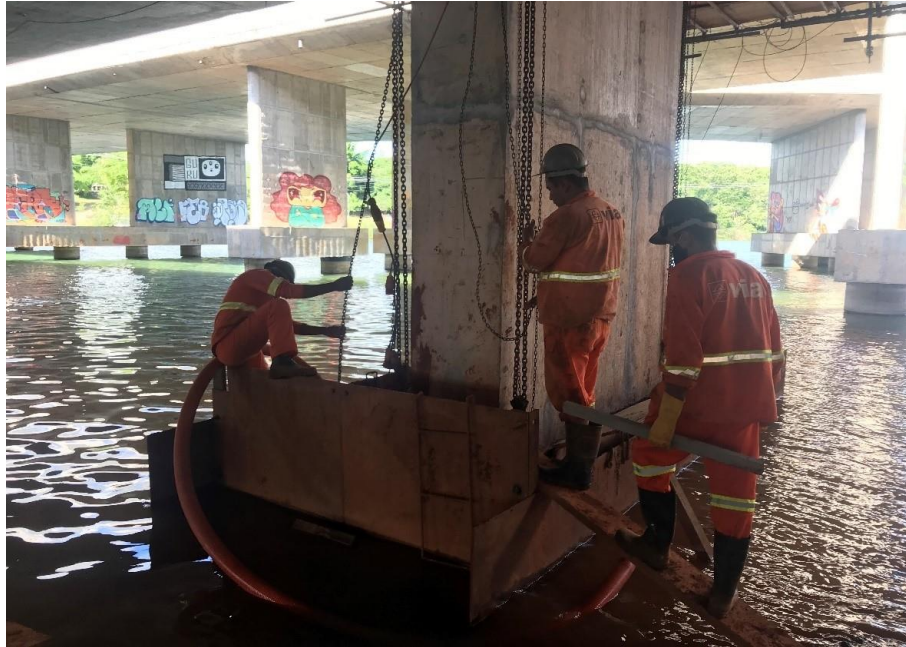
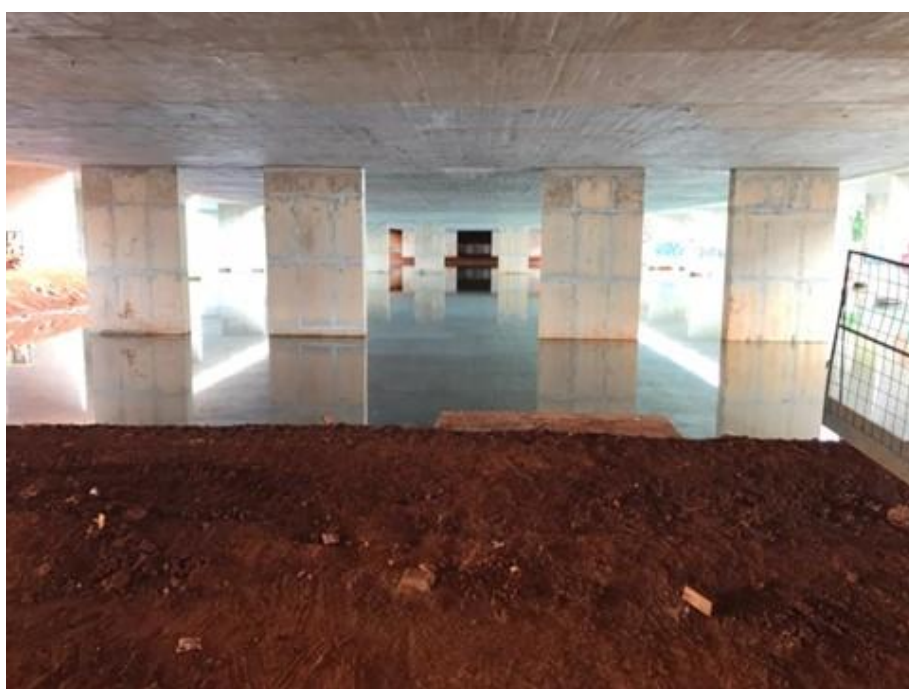


Figura 111 – Concretagem reforço dos pilares



Figura 112 – Vista laje inferior e pilares restaurados



4. AVALIAÇÕES DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E DA CURVA DE DESEMPENHO E DEGRADAÇÃO

O processo de coleta de dados sobre degradação de qualquer empreendimento começa no planejamento com estudo da documentação histórica, análise dos projetos originais e processos construtivos e as normas aplicadas durante a construção. Outro ponto fundamental é a percepção do ciclo de vida da OAE e como os materiais e elementos componentes se comportaram diante do ambiente externo, as condições de uso e manutenção do local onde está inserida. Essa anamnese deve fornecer ao inspetor técnico informações sobre a relação causa e efeito, customizando dados específicos sobre a degradação e perda de desempenho do conjunto edificado. A curva de desempenho da Ponte Braghetto foi obtida antes da recuperação estrutural, ou seja, no estado usual da ponte. No entanto, como forma de registro histórico, descreve-se uma análise com a realização de ensaios estático e dinâmico de cargas na ponte

Deve-se compreender que os materiais e elementos construtivos trabalham em conjunto agregando esforços e estabilizando sistemas, conforme estabelecido na BS ISO 15686-5:2017 e mesmo na ABNT NBR 15575-1:2021. A degradação de um material não significa o colapso total de um empreendimento, mas pode representar a perda de seu desempenho e risco para sua operação. Essa é a curva natural de aprendizado adotada pelos pesquisadores e a base fundamental para coleta de informações coesas.

4.1 Avaliação do comportamento estrutural da Ponte Braghetto – EPTT, com a realização de ensaios estático e dinâmico Degradação.

A Ponte do Braghetto, inaugurada em junho de 1961, como informado anteriormente, possui 180 metros de comprimento, 29 metros de largura e 4 metros de altura e interliga o Eixo Rodoviário Norte-Sul (DF-002) à Estrada Parque Torto (DF-007), sendo a única ponte de ligação entre a Asa Norte e o Lago Norte.

Construída em concreto armado em sistema de caixaão perdido, a Ponte Braghetto, nos últimos anos vinha sendo manchete na imprensa devido às diversas manifestações patológicas existentes e visíveis a olho nu nos seus elementos estruturais e em razão da falta de manutenção preventiva e corretiva, gerando insegurança aos seus usuários.

A NOVACAP, em parceria com o DER, realizou, no dia 17/06/2019, ensaios estático e dinâmico na estrutura da ponte, utilizando equipamentos de tecnologia avançada, adquiridos pela Companhia por meio de convênio firmado com a FAP/DF, em 2013. O objetivo primordial desses ensaios é a avaliação do comportamento estrutural, após a realização da obra de recuperação de responsabilidade do DER/DF, o que contribuirá para verificação do projeto executivo.

Os equipamentos de monitoração foram dispostos na pista sentido Asa Norte – Lago Norte e no veículo de prova. Os sensores são interligados, por meio de cabos, a um sistema de aquisição de dados e este a um microcomputador com *software* de análise integrado. Ao todo, serão utilizados nos ensaios 34 instrumentos de medição.

No veículo de prova de carga, uma carreta de aproximadamente 58 toneladas, foram instalados 10 extensômetros elétricos ligados a um sistema de aquisição de dados (microcomputador e aquisitor de sinais).

Na superestrutura da ponte foram instalados 24 sensores, sendo:

- 8 extensômetros elétricos;
- 4 transdutores de deslocamento;
- 4 acelerômetros;
- 3 clinômetros;
- 3 sensores de temperatura; e
- 2 *lasers*.

Durante os ensaios de campo, os valores experimentais foram registrados e, posteriormente, confrontados com os valores determinados a partir do modelo numérico elaborado com base nas propriedades estruturais do projeto.

A comparação desses valores possibilitará a avaliação do desempenho estrutural do viaduto, com as cargas previstas no projeto executivo de reforço.

A NOVACAP contou com a consultoria técnica do professor Dr. Pedro Almeida, da Universidade de São Paulo, e com a participação de engenheiros do quadro técnico do DER/DF.

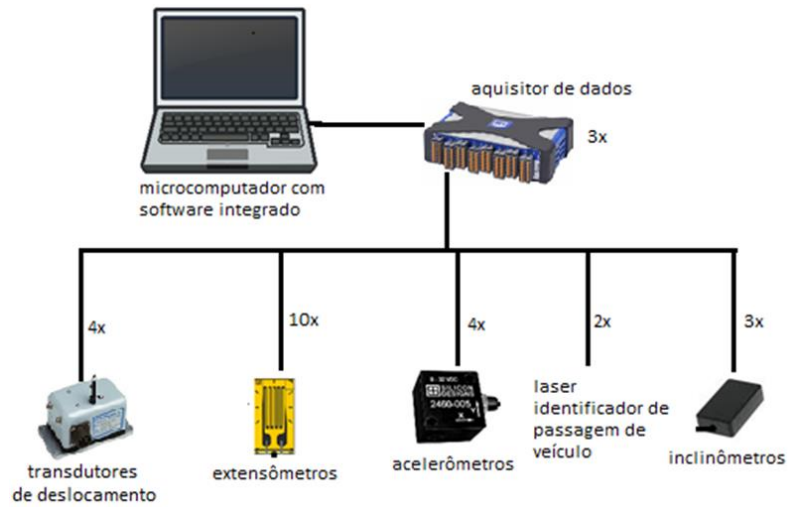
Figura 113 – Equipe de técnicos Novacap e DER/DF no teste de carga da Ponte Braghetto em 2019



Fonte: O autor.

A instrumentação da estrutura foi realizada para monitoração dos efeitos estruturais, tais como: deslocamentos, vibrações, rotações e deformações, com registro de temperatura ambiente e da estrutura. Os veículos trafegam por toda extensão do viaduto, ou seja, nos oito vãos, e monitorados pelo sistema de aquisição de dados, conforme desenho esquemático a seguir:

Figura 114 – Desenho esquemático ensaios



Após a realização do ensaio estático, será realizado o ensaio dinâmico com uma carreta carregada e instrumentada, previamente, com sensores (extensômetros) para medição das forças do veículo, conforme desenho esquemático:

Figuras 115 – Desenho esquemático ensaios



Prova de carga estática conforme Figuras 116 a 118:

- Arranjo AE1: 20 caminhões tipo caçamba carregados com aproximadamente 30 toneladas de brita, posicionados no meio do vão entre pilares, quatro por vão, um por faixa, avançando um por vez no sentido Asa Norte – Lago Norte;

- Arranjo AE2: 20 caminhões tipo caçamba carregados com aproximadamente 30 toneladas de brita, posicionados ao longo de toda extensão da ponte, na faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AE3: 20 caminhões tipo caçamba carregados com aproximadamente 30 toneladas de brita, posicionados no 1º vão entre apoios AP1 e AP2, cinco por faixa, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AE4: 20 caminhões tipo caçamba carregados com aproximadamente 30 toneladas de brita, posicionados no 2º vão entre apoios AP2 e AP3, cinco por faixa, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AE5: 20 caminhões tipo caçamba carregados com aproximadamente 30 toneladas de brita, posicionados no 3º vão entre apoios AP3 e AP4, cinco por faixa, sentido Asa Norte – Lago Norte.

Figura 116 – Caminhões caçambas carregados com 30 toneladas



Fonte: o autor.

Figura 117 – Caminhões caçambas carregados com 30 toneladas



Fonte: o autor.

Figura 118 – Equipamentos para leitura dos valores prova de carga



Fonte: o autor.

Prova de Carga Dinâmica com Veículo de Prova Instrumentado, Figuras 119 a 121.

- Arranjo AD1: Veículo de Prova Instrumentado (VPI) passará a velocidade baixa, em conjunto com os caminhões caçambas por todos os vãos da ponte, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AD2: VPI passará a velocidade baixa, em conjunto com os caminhões caçambas por toda extensão da ponte, pela faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AD3: VPI trafegando à velocidade de 20 km/h por toda extensão da ponte, pela faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AD4: VPI trafegando à velocidade mais alta que conseguir, por toda extensão da ponte, pela faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AD5: VPI trafegando à velocidade mais alta que conseguir, com frenagem no meio do 1º vão da ponte, pela faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte;
- Arranjo AD6: VPI trafegando à velocidade mais alta que conseguir, com frenagem no meio do 2º vão da ponte, pela faixa à direita, sentido Asa Norte – Lago Norte.

Figura 119 – Sensores instalados no ensaio



Fonte: o autor.

Figura 120 – Sensores instalados no ensaio



Fonte: o autor.

Figura 121 – Sensores instalados na parte inferior da ponte



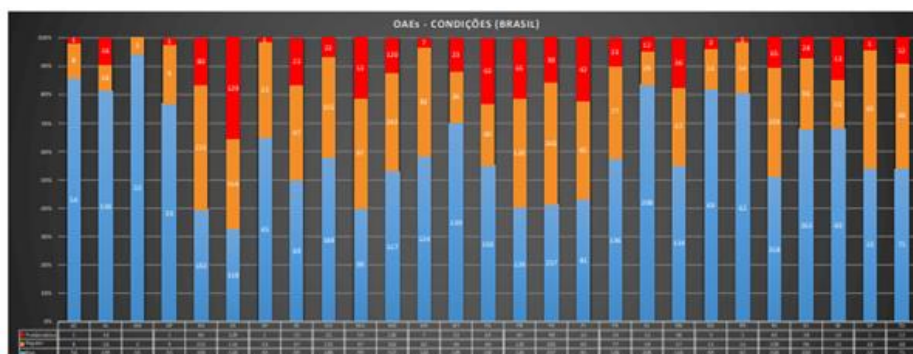
Fonte: o autor.

É importante mencionar que os resultados informados no momento dos ensaios foram satisfatórios, foi solicitado o relatório final dos ensaios, estes não foi fornecido pela Novacap pois estava em aprovação pela equipe técnica.

Existe uma programação de ensaios e testes a serem executados na Ponte Braghetto, portanto, esses critérios podem ser revisados e/ou validados à luz de novas informações acerca do comportamento da estrutura.

Além das regiões onde estão instaladas as OAE's, os dados registram informações como a tipologia, permitindo aprofundar o conhecimento sobre as ações ambientais, efeitos de degradação ou mesmo estado de conservação de cada elemento amostral conforme gráfico da Figura 123.

Figura 123 – Segregação das AOE's segundo nota final obtida na inspeção



Fonte: DNIT.

Além da nomenclatura específica para OAE, para a análise da degradação, gestão, manutenção e operação, atualmente, há normativas mais atuais como ABNT NBR 9452:2019, DNIT 010:2004 – PRO, bem como experiências aprendidas com outras pesquisas como Simões e colab. (2021) e Macêdo (2016), e mesmo cursos de treinamento especializados, como os oferecidos pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON).

Durante o cadastro da degradação, as anomalias registradas devem representar a descaracterização do elemento ou sistema, tendo em mente a referência do estado de conservação novo. O diagnóstico da degradação deve deixar evidente a natureza da anomalia bem, como os dados para rastrear o elemento componente da estrutura, sua posição diante do projeto e as alterações que a manifestação patológica está ocasionando. A própria ABNT NBR 9452:2019 sugere a Tabela 4 com referência qualitativa e quantitativa utilizada para mitigar possíveis interpretações ambíguas durante a inspeção.

Tabela 5 – Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade.

Nota	Cond	Estrutura	Funcionalidade	Durabilidade
5	Excelente	Apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	Há segurança e conforto aos usuários.	Perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	Apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	Há pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	Há pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que poder vir a gerar alguma deficiência estrutural, sem riscos a estabilidade da obra. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	Há desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	Há pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de moderada a alta agressividade ambiental.
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança estrutural, sem risco iminente. A evolução pode levar ao colapso estrutural a curto prazo.	Funcionalidade comprometida, com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A OAE apresenta anomalias moderadas a abundantes, que comprometam sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	Há danos que geram graves, elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. Necessária intervenção imediata.	A OAE não apresenta condições funcionais de utilização.	A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR9452:2019.

A classificação da condição deve ser registrada entre Crítica e Excelente, pontuando de 1 a 5 pontos de acordo com a caracterização da estrutura, funcionalidade e durabilidade observada no local. Percebe-se que a análise tem o foco em dois critérios: segurança e funcionalidade. Ao propor o termo “durabilidade”, a ABNT NBR 9452:2019 espera que o inspetor avalie diretamente os efeitos associados à sua vida útil, ou seja, o tempo estimado em que a estrutura ainda pode cumprir suas funções em serviço. Um indicador extremamente complexo, como será visto mais adiante.

4.3 Vida útil

O estudo da vida útil de elementos e sistemas construtivos parte de modelos de deterioração estocásticos, atribuindo-se probabilidades da ocorrência de danos em determinado universo amostral. A sequência de variáveis que afetam os edifícios em uso e o comportamento dos sistemas trabalhado em conjunto foram apresentados por

pesquisadores como Gomide e colab. (2011) e Pereira (2013). Ainda com a análise do empreendimento de forma global, a BS ISO 15686-5 (2017) indica que a Vida Útil Total Prevista (VUE) do sistema edificado é o agrupamento de todas as variáveis que atuam durante o ciclo de vida proposto a equação (1):

$$VUE = VUR * A * B * C * D * E * F * G \quad (1)$$

Onde: VUE = vida útil total prevista;
VUR = vida útil de referência;
A = fator relativo à qualidade dos materiais;
B = fator relativo ao nível de qualidade do projeto;
C = fator relativo ao nível de qualidade de execução;
D = fator relativo ao nível de qualidade do ambiente interior;
E = fator relativo ao nível de qualidade do ambiente exterior;
F = fator relativo às características de uso;
G = fator relativo ao nível de manutenção.

Do repositório da biblioteca digital Elsevier, somente nos últimos vinte anos, foram publicados 3.682 documentos entre teses, dissertações e artigos em diversos jornais e revistas. Desses documentos, aproximadamente 29,3% (1.080) relatam a análise da vida útil na coleta de informações para valores de referência de degradação, desempenho, durabilidade, estabilidade de materiais e ciclo de vida de sistemas estruturais. As tabelas divulgadas por laboratórios, fabricantes, ensaios controlados e amostras postas à prova não conseguem justificar edificações com duzentos anos ou mais como encontradas na Itália, França ou outros países do velho continente. Essa ainda será uma longa caminhada e tema de muitos estudiosos.

Voltando à equação (1), quanto ao comportamento de sistemas ortótopos, como as estruturas de concreto armado, deve-se analisar os múltiplos fatores e os nexos de causa e efeito em análise global, tornando o processo de quantificar a vida útil quase inviável. O valor calculado de acordo com a BS ISO 15686- 5:2017 pode ser a linha de referência para novas construções, com planejamento, apoio computacional, controle de processos e recursos atuais e ainda com poucos sucessos quando aplicado ao ambiente construído.

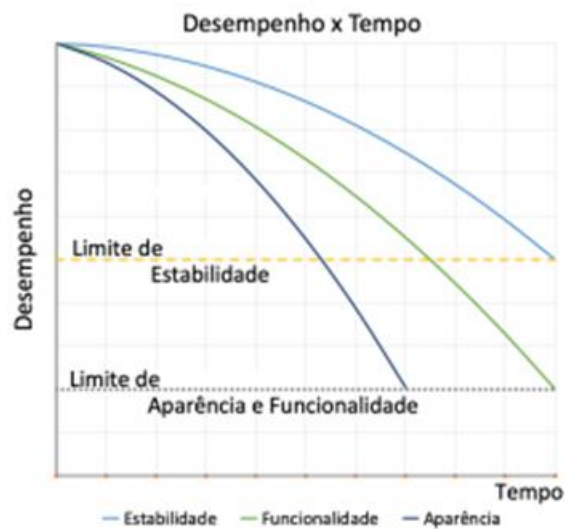
4.4 Inspeção Visual

Por apresentar baixo investimento, as inspeções visuais atendem como base de coleta primária, por modelos hedônicos nos quais a qualificação de um item pode gerar parâmetros comparativos. Estudos apresentados por Oliveira (2018) demonstram que variáveis subjetivas, como estabelecidas por métodos como Ross-Heidecke, podem ser confiáveis, desde que a equipe de vistoriadores passe por treinamento específico e possuam formulários coesos, direcionados a coleta específica da informação com as opções de respostas já pré-definidas.

O cadastro de observações para análise do comportamento de amostras sempre foi o utilizado em áreas técnicas como medicina, biologia, química, física e arquitetura. A exemplo de Aldahdouh (2018), o pesquisador deve manter-se em um planejamento de rotina, anotando as alterações da amostra, formando uma linha histórica capaz de descrever coerentemente todos os efeitos observados. Segundo Gomide e colab. (2011), a qualidade total da inspeção é saber o que está procurando e qual a relação de causa e efeito, cadastrando com critério e de forma clara o banco de dados da inspeção. Não existe formulário padrão, mas uma anamnese profunda e estudo do histórico do empreendimento a ser vistoriado.

É normal que o desempenho seja afetado ao longo do tempo dado a quantidade de variáveis que envolvem o ciclo de vida de um empreendimento. Nesse sentido, Moser (1999) fornece a base $VUE = VUR * A * B * C * D * E * F * G$ gráfica (Figura 124) para referência visual da perda de desempenho a partir da degradação da aparência, funcionalidade e segurança.

Figura 124 – Critério aplicado a inspeções visuais para percepção do desempenho ao longo do tempo



Fonte: adaptado em *layout* de (MOSER, 1999).

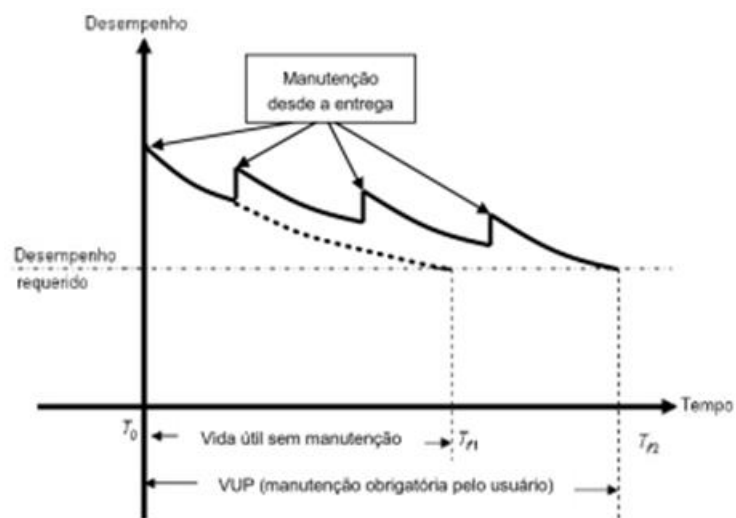
O estudo de Moser (1999) deixa claro o sentido natural da manifestação patológica. Em casos de pontes, por exemplo, a perda de aparência como abrasão da camada asfaltada, abaulamento do asfalto, presença de trincas visuais, desgaste irregular da faixa de rolagem, entupimento vias drenantes, fissuras em juntas de dilatação já indicam ao inspetor uma sequência de ações e danos que irão ocorrer quanto à funcionalidade e segurança do empreendimento em estudo. A aparência na maioria das vezes é o primeiro indicador para análises mais profundas ou a decisão de contratação de equipes de controle com equipamentos.

Informações obtidas por inspeções coesas e orientadas embasam decisões sobre o desempenho de empreendimentos, auxiliando a gestão urbana, inclusive para ações de reuso ou requalificação como demonstrado em Galimi (2021).

4.5 Desempenho

Desde 2015, os estudos a respeito do desempenho de empreendimentos no Brasil têm avançado, exigindo ajustes conforme estabelecido na ABNT NBR 15575-1:2021, com ciclo de vida do imóvel semelhante ao apresentado na Figura 125. Tais curvas e entendimentos estão sendo reformulados e novos modelos surgem como o caso da visão sistemática do desempenho, onde a vida útil não indica o fim do elemento estrutural como ora proposto em ensaios e curvas dose resposta de laboratório.

Figura 125 – Desempenho ao longo do tempo



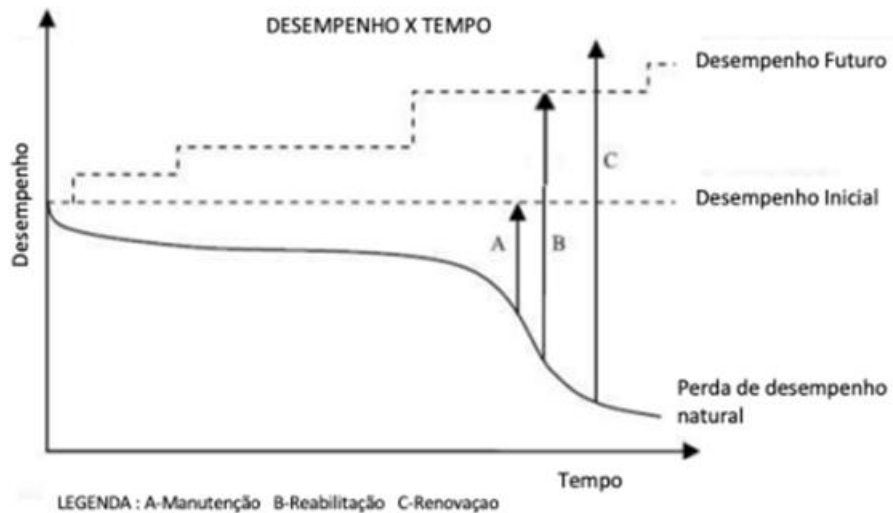
Fonte: ABNT NBR 15575-1:2021.

Miranda e Calejo (2020) demonstram que, em teoria, o desempenho tem uma perda em estágios diferentes do tempo, formando uma curva composta. Em seus estudos mais recentes, o desempenho terá sempre a característica crescente, levando o investidor a aplicar recursos com manutenção, reabilitação e renovação, como demonstrado na Figura 126.

Uma associação de resistências e até mesmo química podem ou não afetar a aparência, a funcionalidade e a segurança do empreendimento quando analisado de forma global. Isso abre o caminho para a análise dos critérios de desempenho, separando os efeitos que vistoriamos dos dados de fornecedores e laboratórios, passando a interpretar

as ações de projeto, processo construtivo, manutenção, ações ambientais e condição de uso sem depender da vida útil. Todos os componentes e elementos se agrupam e formam um só, com suas características únicas e específicas, a maneira mais natural encontrada em diversos modelos científicos, inclusive estruturas de concreto, como o caso da OAE.

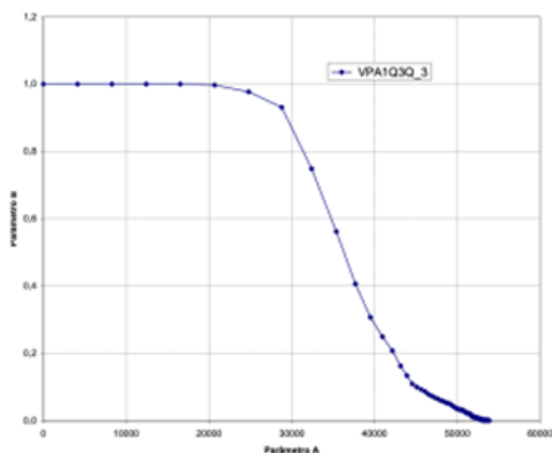
Figura 126 – Desempenho x Tempo processos de recuperação



Fonte: Miranda e Calejo, 2020.

Ao restringir o desempenho somente ao modelo de cálculo estrutural, a variação de rigidez e deformação possui íntima correlação com desempenho e degradação. Estudos sobre essa correlação de causa e efeito é convergência de múltiplos parâmetros quando solicitados a trabalharem conjuntamente, como demonstrado em P.G. Bergan e T.H. Soreide (1977) e Pantoja (2003). Ambos os estudos também deixam o paradigma do material de forma isolada e passam a analisar o conjunto de variáveis aplicadas em sistemas estruturais. Essa é a análise mais próxima da real condição de uso da estrutura e seus componentes durante o ciclo de vida de um empreendimento (Figura 127).

Figura 127 – Degradação dos parâmetros da matriz de rigidez da estrutura



Fonte: Pantoja, 2003.

Na pesquisa, é demonstrado que, após um período de solicitações e degradação da estrutura em sua fase inicial, há uma acentuada perda de desempenho do sistema analisado. Após esse ponto crítico, a tendência é que degradação e desempenho sejam curvas menos acentuadas, tendência parabólica até o declínio total do edifício, como já demonstrado em Oliveira e Pantoja (2022). Em seus estudos, foram apresentadas quatro segmentações para a qualificação do desempenho sendo: Mínimo (DM), Intermediário (DI), Superior (DS), já qualificados na ABNT NBR 15575-1 (2021), e a necessidade de inclusão do Desempenho Especial (DE) utilizado para obras de engenharia que exigem especial atenção quanto a ciclo de vida, evitando ao máximo sua degradação. Nesse seletor grupo estão os patrimônios culturais, empreendimentos de altíssima importância, como algumas OAE's, hospitais, bases aéreas e similares nas quais a interrupção geraria transtornos financeiros e operacionais significativos ao gestor privado ou público.

4.4 O Caso da Ponte Braghetto

Com campo amostral de 10.408 obras de arte especiais e registros de inspeções coletados nos anos de 2009 a 2021, foi possível ajustar variação da degradação ao longo do tempo. A coleta de dados está aderente às normas ABNT NBR 9452:2019, DNIT 010:2004 – PRO as manifestações patológicas e os componentes das pontes e viadutos

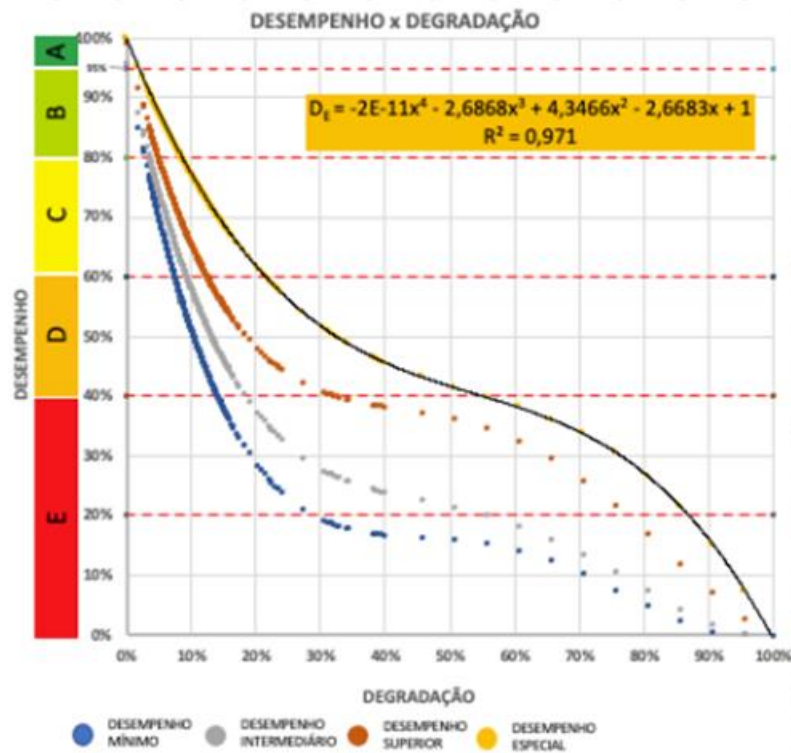
que foram danificados ou alterados. Para a amostra da Ponte do Braghetto e sua importância ao sistema viário da cidade de Brasília, foi adotado o Desempenho Especial. Para empreendimentos com sistemas compostos e apoio de análises não lineares, a melhor adaptação ao polinômio obtido está apresentada na Equação (2):

$$De = -2,6868 \cdot (ID)^3 + 4,3466 \cdot (ID)^2 - 2,6683 \cdot (ID) + 1, \quad (2)$$

Onde: De = Desempenho do sistema;
ID = Indicador de Degradação.

Outras curvas, com materiais compostos e mais sistemas da edificação, ainda estão sendo compostas, alimentando pesquisas futuras. De forma gráfica, o comportamento dos polinômios da Equação (2) com o comportamento do desempenho em obras especiais (De) ao longo da degradação no ciclo de vida de um imóvel pode ser visto na Figura 128.

Figura 128 – Curva de Desempenho e Indicador de Degradação do Sistema Estrutural



Fonte: o autor, .

No caso da ponte, possui estrutura com laje caixão, enrijecida por vigas transversinas, que variam de acordo com os esforços e proteção parcial conforme croqui

excessiva, fissuras decorrentes da variação de temperatura, entre outros, como pode ser perceptível na Figura 131.

Figura 131 – Danos na laje inferior do caixão perdido



Fonte: <https://agendacapital.com.br>.

Apesar do grande número de indicadores de degradação cadastrados na parte externa do viaduto, como demonstrado na Figura 132, a parte interna da laje caixão não se demonstrou danificada, principalmente nos trechos de maior resistência estrutural (Figura 132).

Figura 132 – Vista interna da laje caixão. Turma de Patologia das Estruturas do PPG-FAU-UnB



Fonte: o autor,

Com os dados de campo, o cálculo do indicador de degradação (ID) foi obtido calculando a média das notas de classificação parametrizadas, conforme demonstrado na Tabela 6.

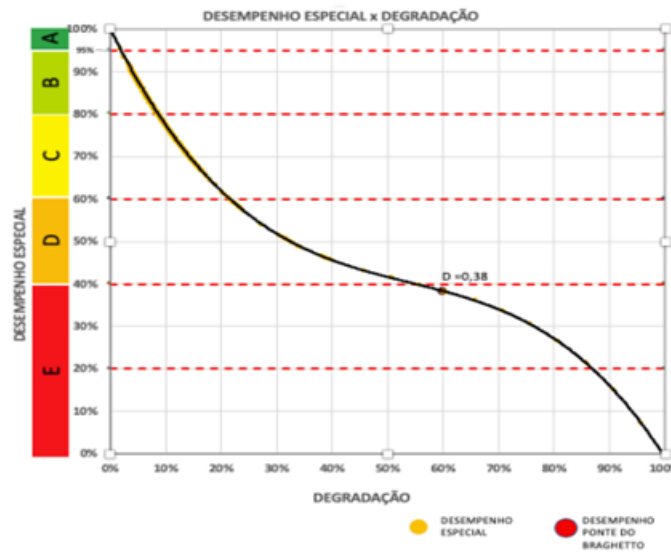
Tabela 6 – Indicador de Degradação - Ponte do Braghetto

Estrutura	Elemento	Nota durabilidade	Nota estrutural	Nota funcionalidade	Máx.	Nota	Parametrizado
Superestrutura	Alas	4 - Boa	4 - Boa		15	8	0,47
Superestrutura	Juntas	0 - A classificar	4 - Boa	4 - Boa	15	8	0,47
Superestrutura	Lajes	3 - Regular	4 - Boa		15	7	0,53
Mesoestrutura	Aparelhos de Apoio	0 - A classificar	4 - Boa		15	4	0,73
Mesoestrutura	Pilares	2 - Ruim	2 - Ruim		15	4	0,73
Infraestrutura	Infraestrutura	4 - Boa	4 - Boa		15	8	0,47
Encontros	Laje de Transição	3 - Regular	0 - A classificar	3 - Regular	15	6	0,60
Encontros	Taludes	3 - Regular	4 - Boa		15	7	0,53
Elementos e Acessórios de Segurança	Defensa	0 - A classificar	0 - A classificar	2 - Ruim	15	2	0,87
Elementos e Acessórios de Segurança	Guarda-corpo	4 - Boa	0 - A classificar	4 - Boa	15	8	0,47
Elementos e Acessórios de Segurança	Guarda-rodas	4 - Boa	0 - A classificar	2 - Ruim	15	6	0,60
Elementos e Acessórios de Segurança	Passeio	3 - Regular	0 - A classificar	3 - Regular	15	6	0,60
Elementos e Acessórios de Segurança	Pavimento	3 - Regular	0 - A classificar	1 - Crítica	15	4	0,73
Drenagem	Buzinote	3 - Regular	0 - A classificar	3 - Regular	15	6	0,60
Drenagem	Descida d'água	4 - Boa	0 - A classificar	3 - Regular	15	7	0,53
Indicador de Degradação (ID)							0,60

Fonte: o autor

Com o indicador de degradação já parametrizado na escala de ID = 60,0%, o desempenho pode ser calculado na curva do desempenho especial, com apoio da Equação (2) obtendo o valor $De = 38\%$. Graficamente, o sistema (Figura 133) apresenta o desempenho da Ponte Braghetto.

Figura 133 – Desempenho especial da Ponte Braghetto



Fonte: o autor.

O valor obtido do desempenho (D_e) para a AOE em análise indica que seria necessária é bem aderente ao que foi vistoriado. A certificação “E” propõe que fatores correspondentes a aparência, funcionalidade e segurança do empreendimento devem ser objeto de intervenções severas, principalmente nos sistemas de externos que alteram a aparência. Há falhas reticamente em sistemas de maior uso e funcionalidade com o caso de sistemas pluviais, drenagem e elétrico. Danos recorrentes e de fácil percepção a olho nu, isolando ou impedindo funcionalidade e segurança. A escala de certificação total ainda está em ajustes face ao grande número de dados que ainda estão sendo tratados.

Os estudos apresentados deixam o paradigma de análise do desempenho por meio da vida útil dos materiais e passam para análises não lineares, assim como em muitos sistemas complexos e com grande número de variáveis envolvidas. Os dados estão convergindo para a visão mais próxima da real condição de uso dos empreendimentos. Materiais agrupam-se em sistemas e estes em uma nova edificação com degradação e desempenho específicos, cujos componentes devem ser analisados ao longo do ciclo de vida.

Modelos que possibilitem a coleta de amostras de forma qualitativa, como inspeções, e possam propor o valor quantitativo, como o desempenho, auxiliam decisões

administrativas dos gestores quanto a operação e manutenção do ambiente construído.

O polinômio adotado para descrever empreendimentos que necessitam de desempenho especial se demonstrou aderente, com os valores condizentes aos dados observados. Quanto à certificação dos empreendimentos, os estudos estão bem avançados e serão objetos de novas publicações. A base de dados coletada de forma periódica e sistêmica foi essencial para as análises apresentadas.

5. CONCLUSÕES

A Ponte Braghetto representa um marco na engenharia brasileira pois foi a primeira ponte calculada com proteção parcial e serve como ponto de partida para as futuras operações de manutenção e conservação do patrimônio moderno da capital, além de ser considerada uma das principais artérias viárias de Brasília tanto em termos de importância na infraestrutura urbana, quanto em termos de volume de tráfego.

O presente estudo abordou, também, a conservação e as intervenções feitas na ponte ao longo do tempo que ampliaram sua capacidade de carga e número de faixas de rolamentos. Foram três grandes intervenções estruturais. A inicial, na década de 1979, para corrigir as deformações adicionais desenvolvidas na época da construção da ponte; a segunda, na década de 90, para ampliação da capacidade de carga; e, mais recentemente, em 2018, foi feito um retrofit com reabilitação de todos os elementos estruturais com o objetivo de ampliar a vida útil da ponte Braghetto.

A opção de revitalização da Ponte Braghetto mostrou-se eficiente e conferiu a estrutura durabilidade com o aumento da sua vida útil. O debate em torno do tema de demolição *versus* reabilitação tem ocorrido em todas as esferas públicas. Cabe aos gestores avaliarem todas as possibilidades técnicas, obviamente, sem esquecer os valores culturais e artísticos do patrimônio a ser reabilitado.

Para a análise do Estado Limite Último, os cálculos foram feitos para dois estágios distintos de construção. O primeiro estágio de construção (*Stage1*) corresponde ao projeto original da ponte compreendido entre os anos de 1960 e 1979, levando-se em conta os efeitos de fluência e retração do concreto durante esse período conforme parâmetros definidos no CEB-FIP. O segundo estágio de construção (*Stage2*) corresponde ao reforço estrutural nos apoios para a estrutura já deformada com a inclusão dos conjuntos de cabos de protensão 8 a 11. O resultado dos esforços e tensões após a implementação do reforço estão condizentes com a nova norma NBR6118/2018.

Para a análise do Estado Limite de Serviço considerando a aberturas de Fissuração (Els_w), pôde-se observar que no modelo de cálculo inicial da ponte em 1979 ela apresentava limites superiores ao exigido pelas normas atuais. Entretanto, quando se fez

o reforço estrutural acrescentando nova força de protensão, obtiveram-se valores satisfatórios para o limite de abertura dessas fissuras.

Na análise numérica do Estado Limite de Serviço, observando-se as deformações excessivas (ELSD), notou-se que os valores estabelecidos pela norma NBR-6118/2014 estão dentro dos limites aceitáveis tanto para o período da construção quanto para as demais intervenções. No entanto, em levantamentos topográficos com estação total podem ser observados valores no limite da norma.

Por último, analisou-se os parâmetros de desempenho da Ponte Braghetto que se mostraram complexos devido ao grande número de variáveis envolvidas. Os estudos desse tema devem continuar para que se obtenha uma síntese metodológica que ajude os técnicos a definirem, com mais clareza, a tomada de decisão no sentido de preservar o patrimônio público seja de obras de artes especiais ou mesmo de edificações emblemáticas.

REFERÊNCIAS

- ALDAHDOUH, A. A. **Visual Inspection of Sequential Data: A Research Instrument for Qualitative Data Analysis.** 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575** – Partes 1–6: Edificações Habitacionais – Desempenho: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6892:** Materiais metálicos — Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7680-1:** Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9452.** Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto- Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.
- BARRIENTOS, M. G. G. **Adaptação das Edificações Antigas às Necessidades Atuais.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: FAU/PROARQ, 2004.
- BARROS, A. P. **Estudo exploratório da Sintaxe Espacial como ferramenta de alocação de tráfego.** Dissertação de Mestrado. PPGT-UnB, 2006.
- BISPO, Alba Nélide de Mendonça. **Dos processos de valoração do patrimônio moderno às práticas de conservação em Brasília: o caso do restauro do Palácio do Planalto.** Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2014.
- BS ISO 15686-2. **Builtings and constructed assets -- Service life planning Part 2: Service life prediction procedures.** 2012. Reino Unido, UK. BS ISO 15686-5. Buildings and constructed assets – Service life planning – Life cycle costing. .., 2017. Reino Unido, UK.
- COSTA, L. **Relatório do Plano Piloto.** Brasília: GDF, 1991.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS (DER/DF). **Relatório técnico – Proposta de recuperação do Viaduto sobre a Galeria dos Estados.** Brasília, 2018.
- DNIT010/2004 - PRO. Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido- Procedimento. 2014. Rio de Janeiro: 1.

ENSAIOS DE CARGAS. VALE, M. S. **Diretrizes para racionalização e atualização das edificações:** segundo o conceito da qualidade e sobre ótica do Retrofit. Rio de Janeiro: UFRJ/FAU, 2006.

FORMISANO, A. e MILANI, G. Seismic Vulnerability Analysis and Retrofitting of the SS. Rosario Church Bell Tower in Finale Emilia (Modena, Italy). *Front. Built Environment*. 5:70. doi: 10.3389/fbuil.2019.00070, 2019.

GALIMI, S. **Índice de Requalificação Urbana:** uma proposta para avaliação das intervenções de Retrofit no patrimônio das obras de arte especiais. 2021. Brasília: UnB.

GOMIDE, T. L. F.; NETO, J. C. P. F.; GULLO, M. A. **Inspeção Predial Total** — diretrizes e laudos no enfoque da qualidade total e da engenharia diagnóstica. São Paulo-SP, 2011.

HOLANDA, F. **O espaço de exceção.** Brasília: EDUnB, 2002.

MACDONALD, S. *et al.* **Conservation of modern architecture.** Ed. Donhead, Shaftesbury, UK, 2007.

MACÊDO FERREIRA, B. **Análise Quantitativa Da Ponte Do Bragueto/-DF f Utilizando A Metodologia GDE/.** UnB, . 2016.

MEDEIROS, V. **Urbis Brasiliae.** Brasília: EDUnB, 2013.

MINISTRY OF URBAN DEVELOPMENT. **The Seismic Retrofitting Guidelines of Buildings in Nepal.** Kathmandu, 2016.

MIRANDA, F. M. F.; CALEJO, R. M. G. R. **DEGRADAÇÃO PRECOCE DE EDIFÍCIOS** - Análise e exploração de um banco de dados, 2020. Porto - PT: FEUP.

MORAES, V. T. F.; QUELHAS, O. L. G. **O desenvolvimento da metodologia e os processos de um “retrofit” arquitetônico.** Brasília: Sistema e gestão. Rio de Janeiro, 2012.

MOSER, K. **Towards the practical evaluation of service life** — Illustrative application of the probabilistic approach. *Durability of Building Materials and Components* 8, , n. June, p. 1319–1329, 1999.

NEGREIROS, I. **Retrofit Urbano:** uma abordagem para apoio de tomada de decisão. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, 2018.

OLIVEIRA, I. **Diretrizes para a Conservação Patrimonial a Partir da avaliação da Depreciação do Ambiente Construído.** Distrito Federal, 2018.

OLIVEIRA, I. P.; PANTOJA, J. C. **Avaliação de desempenho e degradação Avaliação de desempenho e degradação de estruturas híbrida**. Brasília, 29. ago. 2022.

P. G. BERGAN; T. H. SOREIDE. Solution of large displacement and stability using the current stiffness parameter. *In: Geilo (Org.); Finite Elements in nonlinear Mechanics*. p. 647–669, 1977. Trondheim, Norway.

PANTOJA, J. C. **Cálculo da carga de colapso plástico de vigas parede via modelagem numérica.**, 2003. Brasília: UnB.

PEREIRA, A. J. D. S. **Avaliação Imobiliária e a sua relação com a Depreciação dos Edifícios.**, 2013. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.

PFEIL, W.; PEREIRA, J. L. M. DE B.; ZOMAR, A. T.; *et al.* **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. 2o ed. Rio de Janeiro, 1980.

RELATÓRIO TÉCNICO – **CONCREMAT ENGENHARIA E TECNOLOGIA S.A.**. São Paulo, 16/12/1998.

RELATÓRIO TÉCNICO – Dept. ENC/UnB 001. Brasília, 26.02.2018.

RELATÓRIO TÉCNICO – **Grupo de trabalho conforme Decreto 38.841 de 06.02.2018**. Brasília, 2018.

RELATÓRIO TÉCNICO – **PONTE DO BRAGHETTO** – RA Rocha Engenharia. Brasília, 27.02.2018.

SIMÕES, L. F.; RODRIGUES, P. F.; PINHEIRO, D. C. C. **Análise crítica dos métodos de inspeção da ABNT NBR 9452:2019**. XXII CBPE 2021, 2021.

UEDA, T.; SHIMOMURA, T. **Guidelines for Retrofit of Concrete Structure** – Draft. JSCE, 1999.

UNESCO, 2005. **Operational Guidelines for the implementation of the World Heritage Convention**. Paris: World Heritage Centre, 2005.