



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Anápolis

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO: ABORDAGEM TÉCNICA
E ESTUDO DE CASO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE**

KAUAN ALEXANDRE DE MELO BRITO

ORIENTADOR: Prof. D.Sc. DIEGO BORJA FERREIRA

PUBLICAÇÃO:
ANÁPOLIS
2025
KAUAN ALEXANDRE DE MELO BRITO

**REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO: ABORDAGEM TÉCNICA
E ESTUDO DE CASO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito
parcial para conclusão de curso.

Orientador: Prof. D.Sc. Diego Borja Ferreira

ANÁPOLIS, 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

BRITO, Kauan Alexandre de Melo

B862r Reforço estrutural em concreto armado: abordagem técnica e estudo de caso da ponte Juscelino Kubitschek. / Kauan Alexandre de Melo Brito. – Anápolis: IFG, 2025.
96 f. il. color.

Orientador: Prof. Dr. Diego Borja Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2025.

1. Reforço estrutural. 2. Técnicas de reforço. 3. Tecnologia de reforço estrutural. 4. Estudos de caso.

I. FERREIRA, Diego Borja (orient.).

II. Título.

CDD 624.25



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 08/2025.1

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No 27º dia do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, às 16:00 horas, na sala T-602 do IFG-Anápoli, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Graduando **Kauan Alexandre de Melo Brito** (matrícula 20211060130161) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Diego Borja Ferreira, Paulo Henrique Menezes Silva e Lucas de oliveira Zuñiga, sob a presidência do primeiro. O trabalho de conclusão de curso tem como título “REFORÇO ESTRUTURAL: ABORDAGEM TÉCNICA E ESTUDO DE CASO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE”, da área de Estruturas, sob orientação do Prof. Diego Borja Ferreira. Após a apresentação, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 100,0 (cem pontos) e o Trabalho de Conclusão de Curso foi considerado (X) aprovado () aprovado com correções () reprovado pela banca examinadora.

Encerra-se a presente sessão às 16 horas e 58 minutos. Eu, Prof. Diego Borja Ferreira dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

Prof. Diego Borja Ferreira

(Assinado eletronicamente)

Prof. Paulo Henrique Menezes Silva

(Assinado eletronicamente)

Prof. Lucas de Oliveira Zuñiga

(Assinado eletronicamente)



Documento assinado digitalmente

LUCAS DE OLIVEIRA ZUNIGA

Data: 10/09/2025 09:48:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kauan Alexandre de Melo Brito

(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Paulo Henrique Menezes Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/09/2025 22:07:59.
- **Kauan Alexandre de Melo Brito**, 20211060130161 - Discente, em 09/09/2025 21:19:13.
- **Diego Borja Ferreira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/09/2025 20:28:02.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 690481

Código de Autenticação: 0c503e4b80



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, S/N, Reny Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)

Documento Digitalizado Público

Ata TCC II ECMOB - Kauan Alexandre de Melo Brito

Assunto: Ata TCC II ECMOB - Kauan Alexandre de Melo Brito
Assinado por: Matheus Tabata
Tipo do Documento: Ata de Defesa
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Público
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

■ **Matheus Tabata Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/09/2025 16:31:57.

Este documento foi armazenado no SUAP em 11/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 756207
Código de Autenticação: ac3eb3f3b0





INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: KAUAN ALEXANDRE DE MELO BRITO

Matrícula: 20211060130161

Título do Trabalho: REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO: ABORDAGEM TÉCNICA E ESTUDO DE CASO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

ANÁPOLIS, 10 / 09 / 2025.
Local Data



Documento assinado digitalmente
KAUAN ALEXANDRE DE MELO BRITO
Data: 10/09/2025 21:44:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS**

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Faço essa dedicatória de forma especial, agradecendo primeiramente a Deus que direcionou todos os caminhos da minha vida até o presente momento da redação desse trabalho, que me deu sabedoria e resiliência para continuar lutando em meio às dificuldades.

Com gratidão, estendo meus agradecimentos aos amigos e professores do Instituto Federal de Goiás - Câmpus Anápolis, que foram fundamentais ao longo desta jornada acadêmica. Seu apoio, incentivo e compartilhamento de conhecimento foram essenciais para minha evolução profissional e pessoal.

Um agradecimento especial ao professor Diego Borja, meu orientador, cuja paciência, dedicação e orientação foram indispensáveis para a realização deste trabalho. Seu compromisso com o ensino e sua disposição em compartilhar seu conhecimento foram inspirações ao longo desse percurso.

Por fim, agradeço novamente a Deus, e encerro essa dedicatória com o seguinte versículo ao seguir minha carreira agora como Engenheiro Civil.

*"Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens, sabendo que receberão do Senhor a recompensa da herança. É a Cristo, o Senhor, que vocês estão servindo."
(Colossenses 3:23-24)*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias e métodos para o reforço estrutural de edificações e obras de arte especiais, destacando orientações normativas quanto à necessidade e execução das técnicas de reforço. O foco central recai sobre a análise do colapso da Ponte Juscelino Kubitschek como estudo de caso, evidenciando sua importância para demonstrar a relevância da manutenção preventiva e da intervenção estrutural oportuna. A partir desse exemplo, ressalta-se como tais medidas podem evitar tragédias e prolongar a vida útil das estruturas. São apresentados métodos tecnológicos e executivos aplicados em reforços estruturais, de acordo com as normas da ABNT e experiências em pontes. Entre as técnicas destacam-se: uso de concreto com adição de armaduras; emprego de chapas ou perfis metálicos; aplicação de polímeros reforçados com fibras (PRF), com ênfase no carbono. Também são descritos os procedimentos de preparação das superfícies para receber o reforço. As informações fornecidas oferecem base fundamental para compreender as principais técnicas disponíveis e apoiar a escolha da solução mais adequada, considerando vantagens e desvantagens de cada método estudado.

Palavras-chave: Reforço estrutural. Técnicas de reforço. Tecnologia de Reforço estrutural. Estudos de caso.

ABSTRACT

This work presents a bibliographic review on technologies and methods for structural strengthening of buildings and special works, highlighting normative guidelines regarding the need and execution of reinforcement techniques. The central focus lies on the analysis of the collapse of the Juscelino Kubitschek Bridge as a case study, emphasizing its importance in demonstrating the relevance of preventive maintenance and timely intervention. From this example, it is highlighted how such measures can prevent tragedies and extend the service life of structures. Technological and executive methods applied in structural strengthening are presented, in accordance with ABNT standards and practical cases in bridges. Among the techniques highlighted are: the use of concrete with additional reinforcement; the employment of steel plates or profiles; and the application of fiber-reinforced polymers (FRP), with emphasis on carbon materials. The procedures for preparing the surfaces to receive the reinforcement are also described. The information provided offers a fundamental basis for understanding the main techniques available and supports the selection of the most appropriate solution, considering the advantages and disadvantages of each method studied.

Keywords: Structural reinforcement. Reinforcement techniques. Structural reinforcement technology. Case studies.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CFRP's	Carbon Fiber Reinforced Polymers
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CEB	Euro-International Committee for Concrete
FIP	Federation for Structural Concrete
ACI	American Concrete Institute
FRP	Fiber Reinforced Polymers
Gpa	Giga Pascal (Unidade de medida, 1 Pascal = 1 N/m ²)
Mpa	Mega Pascal (Unidade de medida, 1 Pascal = 1 N/m ²)
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
OAE	Obra De Arte Especial
DNIT	Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes
ANE	Academia Nacional de Engenharia
DNER	Departamento Nacional de Estruturas e Rodagens

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Corrosão de armadura longitudinal por íons de cloreto apresentado por destaque vermelho e fissuras de deslocamento com destaque verde.....	13
Figura 2.2 - Corrosão de armadura longitudinal por íons de cloreto.....	14
Figura 2.3 - Flechas acentuadas em vigas de concreto.....	14
Figura 2.4 - Nicho de concretagem em viga com a presença de vazios na peça de concreto...	15
Figura 2.5 - Nicho de concretagem em pilar e viga com a presença de vazios na peça de concreto.....	16
Figura 2.6 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cabos de aço de pré-tensionadas.....	18
Figura 2.7 - Características genéricas das fibras de carbono.....	18
Figura 2.8 - Esquema de reforço de vigas à flexão e ao esforço cortante com combate à fissuração.....	19
Figura 2.9 - Exemplo prático de reforço de vigas à flexão e ao esforço cortante com combate à fissuração.....	20
Figura 2.10 - Esquema de reforço de lajes à flexão com combate à fissuração.....	21
Figura 2.11 - Exemplo prático de reforço de laje maciça com combate a esforços de flexão..	21
Figura 2.12- Exemplo prático de reforço de laje nervurada com combate a esforços de flexão..	22
Figura 2.13- Esquema de reforço de pilar de concreto armado com combate a esforços de flexão e compressão por meio do confinamento.....	23
Figura 2.14- Exemplo real de reforço de pilar de concreto armado com combate a esforços de compressão por meio do confinamento.....	23
Figura 2.15- Pilar de concreto com área insuficiente para recebimento de pilar metálico, sem ter ancoragem dos chumbadores no concreto.....	25
Figura 2.16- Viga e pilar de concreto com falha de concretagem, ausência de concreto para resistir os esforços de compressão conforme projeto.....	25
Figura 2.17- Reforço de viga por aumento de seção e novas armaduras longitudinais e transversais.....	28
Figura 2.18- Reforço de viga por aumento de seção e novas armaduras longitudinais e transversais.....	28
Figura 2.19- Configuração de reforço de pilares por aumento de seção total ou parcial e novas armaduras longitudinais e transversais, com a área vermelha sendo o pilar antigo e a indicado em azul as novas armaduras da nova área a ser implementada no reforço.....	29
Figura 2.20- Escarificação do pilar para aderência entre o concreto velho e o novo a ser executado.....	31
Figura 2.21 - Imagem durante execução da inserção de armaduras e fixação das barras longitudinais e transversais por adesivo epóxi estrutural conforme projeto do reforço.....	31
Figura 2.22 - Concretagem da área aumentada por reforço, com concreto de alto desempenho com adição de graute e plastificante durante a execução do traço.....	32
Figura 2.23 - Reforço de viga de concreto por meio de chapas metálicas e fixado por conectores.....	32
Figura 2.24 - Problemas causados em vigas de concreto por descolamento do elemento	

metálico de reforço.....	33
Figura 2.25 - Reforços por elementos metálicos.....	34
Figura 4.1 - Colapso da Ponte Juscelino Kubitschek entre os estados brasileiros do Maranhão e Tocantins.....	39
Figura 4.2 - Imagem das pistas de pouso feitas improvisadamente para aviões do exército. Fonte: Alves de Castro (24 de janeiro de 1959). “Cassacos rasgam na selva a Rodovia Belém-Brasília”. Mundo Ilustrado, ano II, edição 57, página 8-9.....	39
Figura 4.3 - Trecho do jornal do correio Braziliense Fonte: Alves de Castro (24 de janeiro de 1959). “Cassacos rasgam na selva a Rodovia Belém-Brasília”. Mundo Ilustrado, ano II, edição 57, página 8-9.....	40
Figura 4.4- Trecho do jornal do correio Braziliense Fonte: “Maior ponte do mundo: Guamá”. Correio Braziliense, edição 192, página 6. 8 de dezembro de 1960.....	41
Figura 4.5 - Exposição dos cabos de protensão no pavimento de concreto da ponte.....	42
Figura 4.6 - Execução de reforço estrutural na parte externa da superestrutura da ponte.....	42
Figura 4.7 - Localização da ponte.....	43
Figura 4.8 -Esquema dos trechos executados em balanços sucessivos da ponte, com destaque em vermelho para o maior vão de 140m e em amarelo os menores vãos com 53m cada.....	44
Figura 4.9 - Ponte sobre o Rio do Peixe – Santa Catarina (Herval do Oeste) feita pelo Eng. Emílio Baumgart.....	45
Figura 4.10 - Execução de escoramento para concretagem por etapas de aduelas da Ponte Juscelino Kubitschek por meio de balanços sucessivos.....	46
Figura 4.11 - Execução de escoramento para concretagem por etapas de aduelas da Ponte Juscelino Kubitschek por meio de balanços sucessivos.....	46
Figura 4.12- Posicionamento dos cabos de protensão.....	48
Figura 4.13 - Posicionamento dos cabos de protensão no trecho P5/P6 lado tocantins.....	49
Figura 4.14 - Lançamento de cabos de protensão, ancoradas em peças metálicas.....	49
Figura 4.15 - Locação dos furos para fixação dos estribos na estrutura já existente.....	50
Figura 5.1 - Detalhe do vão central da ponte dos pilares P6 a P7.....	51
Figura 5.2 - Detalhe da seção da ponte JK, que trabalhava como viga caixão bicelular no projeto original com tabuleiro com 10 metros de largura.....	52
Figura 5.3 - Detalhe da seção da ponte JK, que trabalhava como viga caixão bicelular no projeto posterior com tabuleiro já ampliado para 12 metros de largura.....	53
Figura 5.4 - Detalhe do perfil da ponte JK, parte do sistema de tabuleiro apoiado em longarinas até o primeiro apoio do balanço sucessivo.....	53
Figura 5.5 -Detalhe do apoio utilizado na ponte tipo Freyssinet.....	54
Figura 5.6 -Detalhe da protensão prevista em projeto.....	55
Figura 5.7 -Foto da execução e locação dos cabos de protensão dentro da viga.....	55
Figura 5.8 -Projeto original com disposição dos cabos e apoios.....	56
Figura 6.1 -Equipamento topográfico utilizado no levantamento.....	57
Figura 6.2 -Equipamentos de aferição como paquímetro e trena.....	57
Figura 6.3 - Modelo de veículo de prova de carga e o veículo utilizado durante o teste.....	59
Figura 6.4 - À esquerda dispositivo de detecção à laser e à direita a aquisição de dados pelo computador.....	60

Figura 6.5 - Danos observados no bloco do P7, com significativa variação da geometria do bloco.....	61
Figura 6.6 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura com sinais de oxidação....	61
Figura 6.7 - Deslocamento da camada de cobertura de argamassa identificada no pilar do apoio P13 e inclinação observada a olho nú entre pilar octogonal e capitel.....	62
Figura 6.8 - Deslocamento da argamassa de cobrimento e exposição das armaduras longitudinais do pilar P7.....	62
Figura 6.9 - Exposição de armaduras no pavimento de concreto da ponte.....	63
Figura 6.10 - Sinais de umidade e corrosão da armadura nos apoios, uma presença de uma mancha provinda da oxidação do aço.....	64
Figura 7.1 - Foto retirada de um vídeo que mostrava a ponte, quando de repente ocorre o colapso da estrutura.....	65
Figura 7.2 - Foto retirada de um vídeo que era gravado mostrando a ponte, e de repente o desabamento do pavimento no momento da ruptura.....	66
Figura 7.3 - Municípios afetados pela queda dos veículos com agentes tóxicos no Rio Tocantins.....	67
Figura 7.4 - Imagem da ponte após sua ruptura, é possível ver os cabos de protensão sem indícios de ruptura por tração, com indício de perda de aderência dos cabos ao concreto.....	69
Figura 7.4 - Esquema de ruptura da estrutura da ponte e respectivos locais aproximados.....	70
Figura 8.1 - À esquerda a extração de testemunhos do concreto da ponte e à direita o rompimento dos testemunhos por compressão simples para determinação do módulo de elasticidade e resistência do concreto da ponte.....	71
Figura 8.2 - Vazio de concretagem identificado com extensão de 22cm X 4cm, P6-L.....	72
Figura 8.3 - Alteração da textura do concreto e do tipo de agregado no trecho do testemunho voltado para interior do elemento, P15-OC1.....	73
Tabela 8.4 - Resistência e módulo de elasticidade medidos nas amostras de concreto extraídas da Ponte sobre o Rio Tocantins, BR-226/BR-230.....	73
Tabela 8.5 - Deformada modais calculadas no modelo numérico do trecho em caixão da Ponte sobre o Rio Tocantins.....	75
Figura 8.6 - Deformada modais modelados computacionalmente do trecho em caixão da Ponte sobre o Rio Tocantins.....	76
Figura 8.7 - Deslocamento calculado por modelagem computacional da estrutura com zoom do resultado indicado como “U3 = - 0,6268” que indica a deformação calculada de 62,68cm... 77	77
Figura 9.1 - Detalhe do perfil longitudinal de recuperação da camada de concreto com argamassa tixotrópica recomendada em destaque vermelho.....	82
Figura 9.2 - Detalhe do perfil longitudinal ao entorno do P7 da ponte, onde mostra a disposição dos cabos de protensão interna com o engrossamento da laje mostrada em destaque vermelho e o reforço com concreto protendido interno em destaque azul.....	83
Figura 9.3 - Detalhe da seção transversal do bloco a ser reforçado com indicações das formas, volume concretado e armaduras instaladas.....	84
Figura 9.4 - Rachadura que apareceu na estrutura da Ponte dos Remédios - SP, à esquerda a perspectiva externa abaixo da rachadura e à direita uma perspectiva por cima da rachadura..	86
Figura 9.5 - Esquema longitudinal da protensão de Reforço na Ponte dos Remédios com indicação do cabos de protensão e as caixas de ancoragem.....	87

Tabela 10.1 - Cargas máximas permitidas e cargas constatadas na rodovia PE-090, entre Surubim e Toritama (ESRS= eixo simples de rodas simples; ESRD= eixo simples de rodas duplas; ETD= eixo tandem duplo; ETT= eixo tandem triplo).....	90
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.7 - Características genéricas das fibras de carbono.....	18
Tabela 7.3 - Municípios afetados pela queda dos veículos com agentes tóxicos no Rio Tocantins.....	66
Tabela 8.4 - Resistência e módulo de elasticidade medidos nas amostras de concreto extraídas da Ponte sobre o Rio Tocantins, BR-226/BR-230.....	72
Tabela 8.5 - Deformada modais calculadas no modelo numérico do trecho em caixão da Ponte sobre o Rio Tocantins.....	74
Tabela 10.1 - Cargas máximas permitidas e cargas constatadas na rodovia PE-090, entre Surubim e Toritama (ESRS= eixo simples de rodas simples; ESRD= eixo simples de rodas duplas; ETD= eixo tandem duplo; ETT= eixo tandem triplo).....	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	7
1.2 OBJETIVO GERAL.....	8
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.4 METODOLOGIA GERAL DO ESTUDO.....	8
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 CONCEITOS DE REFORÇO ESTRUTURAL, E REPARO.....	11
2.2 PATOLOGIAS ASSOCIADAS A ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO CAUSADORAS DE REABILITAÇÃO.....	12
2.3 MATERIAIS E TÉCNICAS UTILIZADAS EM REFORÇO ESTRUTURAL... 16	
2.3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS COM FOCO EM FIBRA DE CARBONO.. 16	
2.3.2 CONCRETO REFORÇADO COM AUMENTO DE SEÇÃO E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	24
2.3.3 ADIÇÃO DE METAIS E LIGAS ESTRUTURAIS.....	32
2.4 NORMAS TÉCNICAS E REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS.....	34
3. METODOLOGIA.....	37
4. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO.....	37
4.1 HISTÓRICO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE DE OLIVEIRA.....	41
4.2 CONCEPÇÃO E PROJETO ORIGINAL.....	43
4.3 PROCESSO CONSTRUTIVO.....	44
4.4 INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS REALIZADAS.....	47
5. DESCRIÇÃO ESTRUTURAL DA PONTE.....	50
5.2 SISTEMA DE PROTENSÃO E APOIOS.....	53
6. LEVANTAMENTO DE PATOLOGIAS E DANOS ESTRUTURAIS.....	56
6.2 PRINCIPAIS PATOLOGIAS OBSERVADAS.....	60
7. ACIDENTE E COLAPSO ESTRUTURAL DA PONTE (2024).....	64
7.1 RELATO DO EVENTO.....	64
7.2 IMPACTOS HUMANOS, AMBIENTAIS E LOGÍSTICOS.....	66
7.3 ANÁLISE DAS POSSÍVEIS CAUSAS TÉCNICAS.....	68
8. DIAGNÓSTICO TÉCNICO DA SITUAÇÃO PRÉ-COLAPSO.....	70
8.1 RESULTADOS DE ENSAIOS E MODELAGENS.....	70
8.3 RELEVÂNCIA DAS RECOMENDAÇÕES NÃO EXECUTADAS.....	78
9. POSSÍVEIS AÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL.....	81

9.1 TÉCNICAS PROPOSTAS NO ANTEPROJETO.....	81
9.2 ALTERNATIVAS BASEADAS EM CASOS SEMELHANTES.....	85
10. CONSIDERAÇÕES SOBRE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO EM INFRAESTRUTURA VIÁRIA NO BRASIL.....	88
10.1 CONTEXTO NACIONAL DAS OAES.....	88
10.2 LIÇÕES APRENDIDAS A PARTIR DO CASO.....	90
11. CONCLUSÕES FINAIS DO ESTUDO DE CASO.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reforço estrutural em edificações é frequentemente motivada por diversas situações, tais como: patologias estruturais decorrentes de sobrecarga, corrosão de armaduras, intervenções inadequadas como furos em lajes. Outros aspectos que exigem a necessidade de um projeto de reforço são mudanças de uso dos espaços, ou alterações arquitetônicas em estruturas já existentes, essas condições reforçam a importância de intervenções bem planejadas e executadas de reforços estruturais. Essa realidade é apresentada no trabalho de Barros (2004), que evidencia o crescente aumento da necessidade de reabilitar, reparar e reforçar estruturas, motivado pelas questões descritas e também por atualizações normativas.

Para a proposição de reforços estruturais, é imprescindível o embasamento técnico fornecido por normas reguladoras, com o intuito de orientar a forma de execução e dimensionamento da intervenção adequada. Ferreira (2014) destaca que devido a infinidade de situações que possam gerar a necessidade de reforço estrutural as normas mais utilizadas para orientação não são normas específicas de reforço estrutural, mas abordam condições para que as estruturas tenham desempenho seguro e confortável para o usuário. Dentre as normas a serem consultadas podem ser citadas:

- NBR 15575-2 – Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.
- NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento.
- NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.
- NBR 9062 - Projeto e execução de estruturas pré-moldadas de concreto.
- NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço.

Ao abordar estudos de caso envolvendo corrosão, sobrecarga, patologias estruturais e a ampliação da capacidade de carga reforçam a relevância do tema, a fim de demonstrar a necessidade de intervenções por meio de reforços estruturais adequados apresentando uma revisão dos métodos e tecnologias existentes para tal fim.

O estudo dos diferentes tipos de reforço estrutural empregados, passa pela descrição de ações executivas e uma criteriosa caracterização de propriedades físicas e mecânicas para analisar o desempenho dos materiais. Para tanto neste trabalho é apresentado uma revisão da

literatura apresentando diferentes pesquisas que abordam tanto materiais quanto situações que exigiram a necessidade do reforço, com ênfase na viabilidade técnica.

Com o intuito de limitar a análise optou-se por analisar diferentes materiais e métodos utilizados como reforço em estruturas de concreto armado. Complementando essa abordagem técnica, este estudo apresenta um estudo de caso aprofundado do colapso da Ponte Juscelino Kubitschek, localizada entre os estados do Maranhão e Tocantins, ocorrido em 2024.

Essa ponte histórica, construída na década de 1960, sofreu intervenções de reforço ao longo dos anos, mas teve sua estabilidade comprometida por falhas acumuladas de manutenção, execução e monitoramento. A análise do caso busca compreender as causas do colapso, avaliar os reforços aplicados e propor alternativas técnicas que poderiam ter evitado o sinistro.

Assim, o presente trabalho visa não apenas compilar os avanços tecnológicos disponíveis para o reforço de estruturas, mas também aplicá-los em um contexto real, contribuindo com reflexões importantes sobre a gestão, conservação e segurança de obras de arte especiais no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

As estruturas de concreto devem ser projetadas observando a durabilidade e garantindo a segurança em sua utilização, o conceito de vida útil é abordado na ABNT NBR 15575 (2021) e definido como 50 anos para estruturas. Tendo em vista que durante o decorrer deste tempo a estrutura pode apresentar diversas patologias referentes a problemas estruturais ou até mesmo alteração do tipo de uso, assim com a ausência de manutenções preventivas e corretivas estrutural de patologias ou mudanças de uso da edificação, podem trazer diversos danos a fatores que englobam a estrutura, sejam eles danos materiais, financeiros e consequentemente danos que podem gerar riscos à sua utilização.

Com isso, o presente trabalho tem a justificativa abordar estudos na literatura sobre técnicas e materiais de reforço estrutural, além de estudos de caso nos quais os foram empregados, ressaltando sua importância já que a negligência desses problemas estruturais podem ocasionar consequências gravíssimas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise técnica sobre as tecnologias e métodos de reforço estrutural aplicáveis em estruturas de concreto armado, por meio de revisão bibliográfica e estudo de caso do colapso da Ponte Juscelino Kubitschek, evidenciando as causas, intervenções e possíveis soluções estruturais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos da presente pesquisa tem-se:

- Apresentar os principais métodos e materiais empregados em reforço estrutural, com base em normas técnicas e estudos científicos;
- Analisar as principais patologias em estruturas de concreto armado que motivam intervenções;
- Investigar, por meio de estudo de caso, as causas e consequências do colapso da Ponte Juscelino Kubitschek;
- Avaliar as intervenções estruturais executadas e possíveis ações de reforço para recuperação da estrutura;
- Discutir as lições aprendidas e a importância da manutenção e monitoramento contínuo de obras de arte especiais (OAE).

1.4 METODOLOGIA GERAL DO ESTUDO

A metodologia adotada neste estudo tem como ponto de partida a seleção criteriosa de artigos científicos, dissertações, teses, livros técnicos e normas relacionadas ao reforço estrutural de elementos em concreto armado, compreendendo publicações desde a década de 1990 até o período de elaboração deste trabalho. O critério de seleção considerou a relevância dos documentos para o tema, com ênfase em pesquisas que discutem tecnologias de reforço, desempenho estrutural e durabilidade em obras de arte especiais.

O referencial bibliográfico contempla ainda ensaios experimentais e estudos de caso extraídos de trabalhos de mestrado e doutorado, os quais enriquecem a pesquisa ao oferecerem resultados aplicáveis à prática profissional. Essa base científica possibilita compreender, de forma comparativa, os diferentes materiais e técnicas de reforço, ressaltando

suas propriedades físicas, mecânicas e comportamentais, fundamentais para a análise e discussão no contexto deste trabalho.

Em sequência à revisão bibliográfica, a pesquisa adota como estratégia central de investigação o estudo de caso da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, que colapsou em 2024. Essa abordagem permite integrar conceitos teóricos às evidências práticas, proporcionando uma análise técnica robusta sobre o evento, suas causas e consequências. Além disso, o estudo de caso viabiliza a avaliação crítica das intervenções estruturais realizadas ao longo da vida útil da ponte, bem como das ações que poderiam ter sido implementadas para evitar o colapso.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo tem como objetivo, no Capítulo 2, desenvolver uma revisão bibliográfica com base em artigos científicos e documentos técnicos que discutem diferentes técnicas de reforço estrutural em elementos de concreto. Entre os métodos levantados, destacam-se o uso de concreto autoadensável, a preparação de superfícies para garantir aderência entre concreto antigo e novo, a aplicação de compósitos em fibra de carbono, o aumento de seções estruturais e a utilização de metais e ligas especiais. Cada técnica é analisada sob a ótica do desempenho, da durabilidade, da viabilidade econômica e da praticidade executiva, fatores fundamentais para subsidiar a escolha de materiais e métodos de reforço.

Ainda nesse capítulo, são apresentados os parâmetros normativos que orientam a execução de reforços estruturais, contemplando normas nacionais e internacionais. A abordagem busca evidenciar a relevância das diretrizes da ABNT NBR 6118:2023 e de outras regulamentações correlatas, justificando sua aplicação prática como suporte para projetos e intervenções de reabilitação estrutural.

Ainda no capítulo 2 é abordado sobre as normativas referentes a execução de reforço estrutural com suas respectivas justificativas, que são parâmetros a serem considerados durante a concepção do projeto e execução, apresentando também normas internacionais e nacionais a respeito do tema.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia utilizada para condução da pesquisa, contemplando o levantamento de referências, a análise documental e os critérios técnicos adotados para validação acadêmica do estudo.

O Capítulo 4 traz a introdução ao estudo de caso, com enfoque no histórico da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, contemplando seu processo de concepção, projeto original, execução construtiva e intervenções estruturais ao longo do tempo.

No Capítulo 5, é realizada a descrição estrutural da ponte, abordando aspectos geométricos, configuração estrutural, sistema de protensão e dispositivos de apoio.

O Capítulo 6 é destinado ao levantamento de patologias e danos estruturais, incluindo a metodologia de inspeção e a apresentação das principais manifestações observadas.

Em sequência, o Capítulo 7 trata do acidente e colapso estrutural ocorrido em 2024, relatando o evento, seus impactos humanos, ambientais e logísticos, bem como a análise técnica das possíveis causas do sinistro.

No Capítulo 8, apresenta-se o diagnóstico técnico da situação pré-colapso, com base nos resultados de ensaios e modelagens, na avaliação do greide e deformações estruturais e na discussão sobre a relevância de recomendações técnicas não executadas.

O Capítulo 9 aborda as possíveis ações de reforço estrutural, incluindo técnicas propostas em anteprojeto e alternativas baseadas em casos semelhantes, possibilitando uma análise comparativa de soluções aplicáveis.

No Capítulo 10, discutem-se políticas de manutenção em infraestrutura viária no Brasil, trazendo o contexto nacional das Obras de Arte Especiais (OAEs) e lições aprendidas a partir do caso da Ponte JK.

O Capítulo 11 apresenta as conclusões finais do estudo de caso, consolidando os principais achados da pesquisa e indicando recomendações para futuras intervenções e estudos acadêmicos.

Por fim, são elencadas as referências bibliográficas utilizadas, reunindo uma base consistente de autores e documentos que fornecem suporte técnico e científico à pesquisa, além de contribuir como material de consulta para futuros trabalhos relacionados ao tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS DE REFORÇO ESTRUTURAL, E REPARO.

Ao analisar elementos estruturais na construção é necessário compreender aspectos relacionados a determinados conceitos, como: desempenho e vida útil. A compreensão desses conceitos é fundamental para a análise e manutenção de estruturas de concreto.

Souza e Ripper (1998) definem que vida útil de um material é o período durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados. Com isso a vida útil é um fator intrínseco ao se planejar a realização de manutenções nas edificações, já que essa intervenção é feita com base nos materiais utilizados durante a execução da estrutura como por exemplo, qualidade do concreto, espessura do cobrimento de concreto, tipo de armadura utilizada, fatores externos como intempéries, entre outros que são importantes ao se avaliar a vida útil.

Além disso, os autores definem desempenho como o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil, e a sua medida relativa espelhará, sempre, o resultado do trabalho desenvolvido nas etapas de projeto, construção e manutenção (SOUZA E RIPPER (1998).

Dessa maneira, pode-se afirmar que o desempenho está relacionado ao que foi feito durante as fases de execução e também durante a fase de utilização da estrutura, tendo em vista que erros de execução, como, redução de espessura de cobrimento de concreto, e redução de seção, podem trazer desempenhos baixos por não atenderem classificações de projeto. Já o uso inadequado da estrutura, com presença de materiais abrasivos, sobrecarga, ou até mesmo a ausência de manutenções preventivas da estrutura podem inviabilizar sua utilização.

De acordo com Reis (1998) a não observância dos aspectos relacionados a vida útil e desempenho das estruturas acarretam problemas de durabilidade, surgindo a necessidade de reabilitação ou intervenção, ações estas que abrangem as situações em geral, envolvendo tanto o reparo simples como a recuperação e o reforço. Dessa forma, a reabilitação ou intervenção pode ser definida como sendo toda a ação necessária para habilitar a estrutura a cumprir novamente suas funções originais ou habilitar a estrutura a suportar às novas condições de uso.

Takeuti (1999) explana em seus estudos que os processos relacionados ao reforço, muitas vezes são necessários para prolongar a vida útil das estruturas, que dependem de uma avaliação criteriosa do desempenho dos materiais utilizados, e de sua capacidade de atender às exigências funcionais normativas mesmo após tais intervenções. Assim, o entendimento integrado entre fatores como, vida útil, desempenho e técnicas de recuperação, contribuem para poder ter a garantia da segurança estrutural, assim como a eficiência em obras de manutenção e reabilitação da estrutura avaliada.

De acordo com Beber (2003) as intervenções relacionadas à reabilitação de estruturas de concreto, podem ser classificadas em diferentes categorias, a depender do objetivo da intervenção. O reparo estrutural refere-se justamente à correção de deficiências funcionais ou estruturais, sem necessariamente restaurar a resistência e a durabilidade projetadas originalmente do elemento estrutural, procurando poder apenas reduzir a taxa de deterioração do elemento, em muitos casos, sem promover melhorias significativas na sua funcionalidade.

Enquanto o reforço estrutural, segundo o mesmo autor, tem como finalidade aumentar a resistência e/ou rigidez da estrutura, garantindo um melhor desempenho frente às novas solicitações atuantes. Já o conceito de retrofitting, que também está associado à reabilitação de estruturas, consiste na modernização ou adequação de uma estrutura existente, proporcionando melhorias estruturais e funcionais, aumentando sua vida útil e segurança.

Reis (1998) afirma que, o conhecimento aprofundado desses conceitos podem auxiliar ainda na previsão de custos, tendo em vista que um possível colapso resultante das patologias estruturais não tratadas trazem custos ainda maiores e inesperados, mas também sendo essencial para decisões técnicas, relacionadas ao reforço, e reparo de estruturas de concreto armado.

2.2 PATOLOGIAS ASSOCIADAS A ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO CAUSADORAS DE REABILITAÇÃO.

Desde os primórdios da civilização da humanidade, a construção de estruturas de diversos propósitos com tecnologias disponíveis como alvenaria, uso de blocos de rocha, calcário, com se tornou-se uma necessidade para a construção de espaços, sejam elas, estruturas para aquedutos, templos, moradias, etc. Assim com a difusão e o aumento da industrialização, foi sendo necessário adaptar novas tecnologias e novos materiais para a construção de diversas estruturas. (Beber, 2003).

Tendo em vista a finalidade da execução de estruturas, que é justamente a utilização das mesmas independente da finalidade, esse uso com o tempo e a vida útil, são apresentadas patologias relacionadas, que podem causar desconfortos, manutenções corretivas excessivas, e a diminuição da resistência da estrutura.

A explicação das patologias em estruturas envolve basicamente o estudo das causas, das maneiras como se manifestam, dos efeitos resultantes e dos processos que levam ao surgimento de falhas em relação à degradação e falhas de execução dos sistemas estruturais. Esse estudo permite compreender como e também o por que dos problemas ocorrerem, além de fornecer estudos para prevenção e reparos adequados de tais sistemas estruturais.

Em relação ao concreto armado podem ser citadas, a seguinte patologia apresentadas nas figuras abaixo:

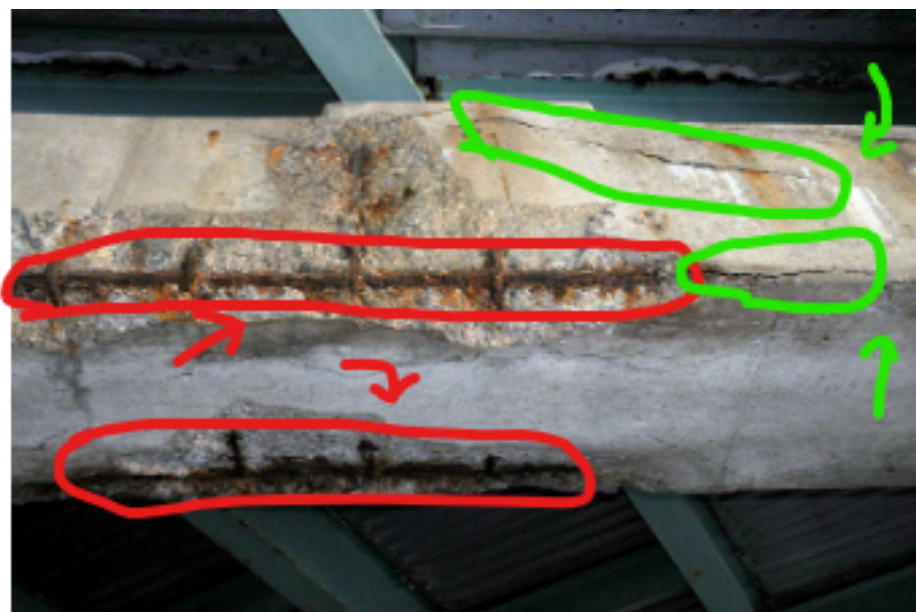


Figura 2.1 - Corrosão de armadura longitudinal por íons de cloreto apresentado por destaque vermelho e fissuras de deslocamento com destaque verde.

Fonte: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2012/08/ataque_concreto.jpg



Figura 2.2 - Corrosão de armadura longitudinal por íons de cloreto.

Fonte: www.mapadaobra.com.br/negocios/veja-a-recuperacao-de-estruturas-de-concreto-armado/



Figura 2.3 - Flechas acentuadas em vigas de concreto.

Fonte: Engenharia Ativa



Figura 2.4 - Nicho de concretagem em viga com a presença de vazios na peça de concreto.

Fonte: Arquivo do Autor



Figura 2.5 - Nicho de concretagem em pilar e viga com a presença de vazios na peça de concreto.

Fonte: Arquivo do autor

Tais patologias citadas apresentam riscos gravíssimos ao sistema estrutural que não tratados ou com reforços executados de maneira insatisfatória podem causar até o colapso da estrutura.

2.3 MATERIAIS E TÉCNICAS UTILIZADAS EM REFORÇO ESTRUTURAL

2.3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS COM FOCO EM FIBRA DE CARBONO.

Compreende-se que o uso de materiais compósitos no reforço estrutural têm se tornado recentemente uma ferramenta essencial para a tecnologia de reforços de estruturas, o estudo da eficiência estrutural de materiais compósitos juntamente com o desenvolvimento para fabricação desses materiais, como por exemplo, resinas epóxi, fibras de carbono, fibras de vidro, etc.. c, trouxeram uma versatilidade na execução de reforços, e por consequência o uso mais difundido na realidade das obras brasileiras. (Beber, 2003)

Esses materiais, são definidos como combinações macroscópicas de dois ou mais componentes distintos, como matrizes, partículas e fibras, e oferecem propriedades mecânicas superiores e adaptabilidade a diversas demandas no contexto do reforço estrutural (Beber, 2003). Essa capacidade de integrar tais características destes materiais que os compõem, resulta em soluções estruturais mais leves, duráveis e por consequência de alto desempenho por conta de suas propriedades.

A priori, ao abordar sobre os materiais compósitos utilizados é importante ressaltar a concepção de fibras e matriz, e suas funções durante a execução de reforços em estruturas. De acordo com Barros (2004), a concepção de fibras são basicamente filamentos de diâmetro consideravelmente pequeno, que possuem elevadas resistências aos esforços de tração e consequentemente um módulo de elasticidade elevado, também possuindo uma baixa densidade, com um uso considerável sem possuir um peso elevado.

Já a matriz, de acordo com Barros (2004), é um dos principais componentes dos materiais compósitos utilizados no reforço estrutural, pois desempenha um papel em sua forma essencial na proteção e na eficiência do sistema de reforço como um todo. A matriz possui como papel garantir a coesão das fibras, assim permitindo que trabalhem em conjunto como um material compósito, além de funcionar como uma proteção contra, intempéries, umidade, possíveis danos mecânicos e instabilidades estruturais.

Dentre os tipos de matrizes disponíveis, em especial a base de epóxi, esse determinado tipo de resina termoendurecível é preferencial a sua escolha devido à sua elevada capacidade de aderência a diferentes substratos, possuindo resistência mecânica e durabilidade em ambientes agressivos, além da baixa absorção de umidade (BARROS, 2004).

Essas características tornam as resinas epóxi a escolha preferencial para sistemas de reforço estrutural com polímeros reforçados com fibras (FRP), garantindo a eficiência do material ao longo do tempo e contribuindo para a melhoria do desempenho global da estrutura.

Segue abaixo na figura 2.7, uma comparação de resistência à tração, com a fibra de material de carbono possuindo a maior tensão resistente por extensão.

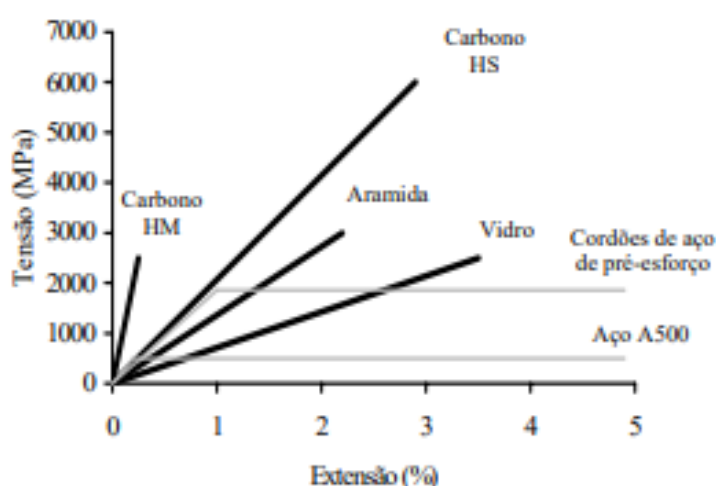


Figura 2.6 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cabos de aço de pré-tensionadas.

Fonte : ACI 440R-96, 1996

Com isso é plausível destacar o compósito de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono ou CFRP's (Carbon Fiber Reinforced Polymers), juntamente com sua técnica executiva, estes propõem um material de alto desempenho amplamente utilizado no reforço estrutural devido às suas propriedades mecânicas superiores.

Os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono, possuem características muito vantajosas para projeto do reforço estrutural, justamente por sua elevada resistência mecânica e rigidez, com um satisfatório comportamento em relação à fadiga e cargas cíclicas, e possuindo alta resistência química e à corrosão, além de sua estabilidade térmica e extrema leveza. Devido ao seu peso específico ser relativamente baixo, que varia entre cerca de 1,6 g/cm³ e 1,9 g/cm³, assim os reforços estruturais feitos com tais compósitos, em determinados casos, podem ser desconsiderados o seu peso próprio durante a análise estrutural (MACHADO, 2002).

Tipo da Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (MPa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220 - 235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220 - 235	3.790 – 4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220 - 235	4.825 – 6.200	> 1,5
Alto módulo	345 - 515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 - 690	>2.410	>0,2

Tabela 2.7 - Características genéricas das fibras de carbono.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

Como apresentado na figura 2.8, o módulo de elasticidade das fibras de carbono de uso geral pode variar de 100 GPa a 300 GPa, enquanto as fibras ultra alto módulo, produzidas em temperaturas mais elevadas, podem atingir até 650 GPa. (MACHADO, 2002).

Essas fibras podem ser aplicadas nos elementos estruturais para absorver os esforços de tração que são decorrentes dos momentos fletores positivos e negativos, além de poder

absorver também tensões decorridas dos esforços cortantes (MACHADO, 2002). Essas soluções por reforço estrutural por materiais compósitos proporcionam significativamente um aumento na capacidade resistente das estruturas, permitindo assim a sua adequação a novas exigências de carga e prolongando sua vida útil podendo ser elas o:

- Reforço de Vigas à Flexão e ao Cisalhamento:

O reforço de vigas à flexão com sistemas de fibra de carbono consiste basicamente na aplicação de lâminas de fibra na face inferior, que é a parte tracionada da viga, contribuindo assim na absorção dos esforços fletores e também na redução da fissuração da viga. De acordo com Machado (2002), para os esforços cortantes, as lâminas de fibras de carbono devem ser dispostas, a depender da necessidade estrutural, seja ela na direção vertical (90°), horizontal (0°) ou inclinadas. Essas disposições permitem uma melhor redistribuição das tensões cortantes, evitando falhas prematuras por cisalhamento.

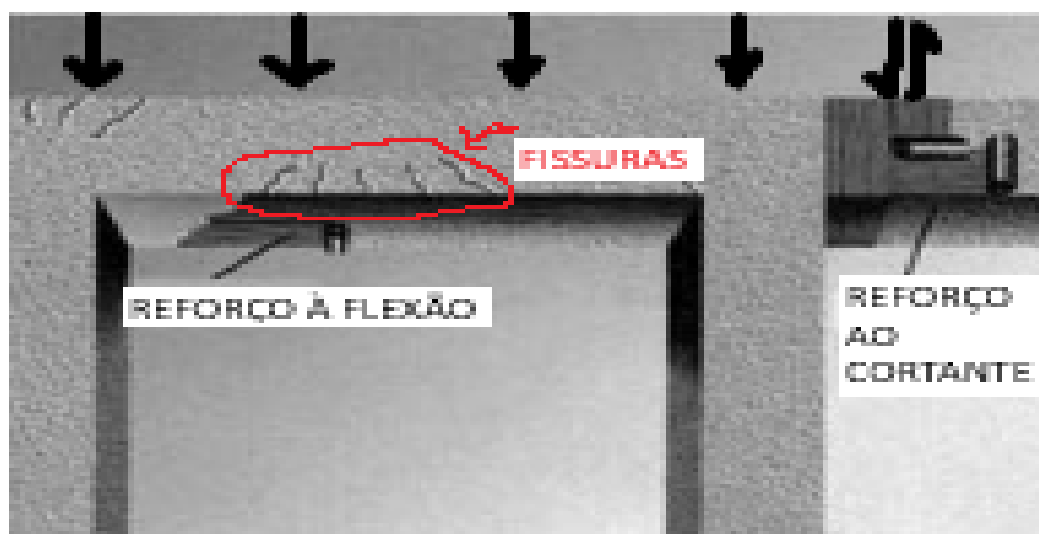


Figura 2.8 - Esquema de reforço de vigas à flexão e ao esforço cortante com combate à fissuração.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

Como apresentado na figura 2.8, é possível ver o esquema de como deve ser realizado o reforço em vigas para combate de esforços cortantes e fletores excessivos que podem causar

fissuras na peça. Tendo a seguir, a figura 2.9, que mostra o exemplo prático sendo realizado com a fixação da fibra de carbono em uma viga de concreto:



Figura 2.9 - Exemplo prático de reforço de vigas à flexão e ao esforço cortante com combate à fissuração.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

- Reforço de Lajes à Flexão

No reforço de lajes à flexão, assim como ocorre nas vigas, as lajes também podem ser reforçadas com lâminas de fibras de carbono dispostas nas duas direções principais, aumentando sua resistência à flexão e minimizando deslocamentos excessivos causados por momentos fletores positivos ou negativos. A aplicação das fibras pode ser realizada na parte inferior ou superior da laje, sendo necessária especificação em projeto, indicando qual esforço será combatido com o reforço. Também, algo que pode comprometer a capacidade resistente da laje são os furos realizados para passagem de tubulações.

Segue na figura 2.10, o esquema de como devem ser dispostas as fibras de carbono para reforço de lajes, já nas figuras 2.11 e 2.12 exemplos práticos de reforços executados com um sendo em uma laje maciça e outra em uma laje nervurada respectivamente.

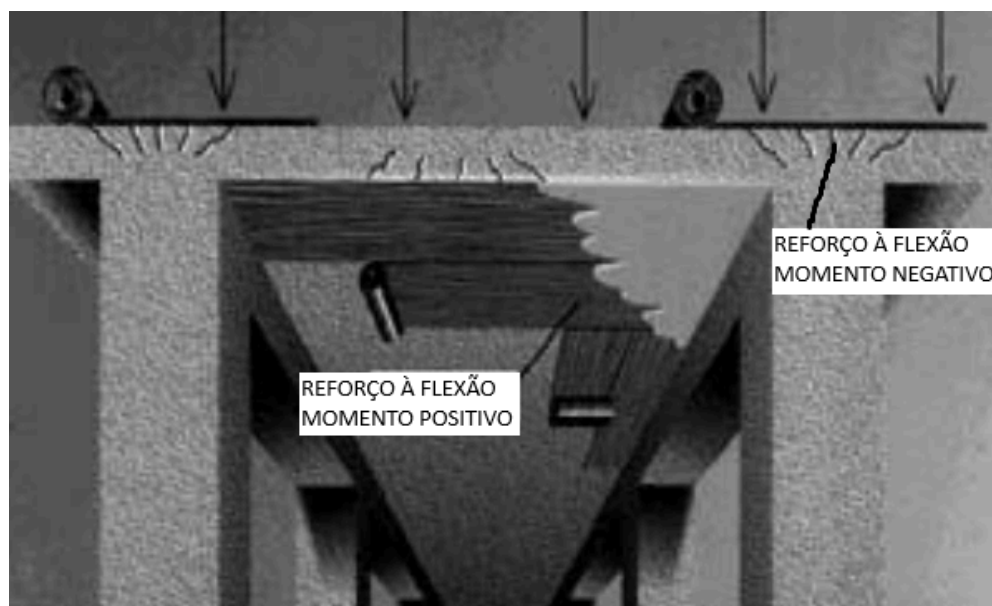


Figura 2.10 - Esquema de reforço de lajes à flexão com combate à fissuração.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

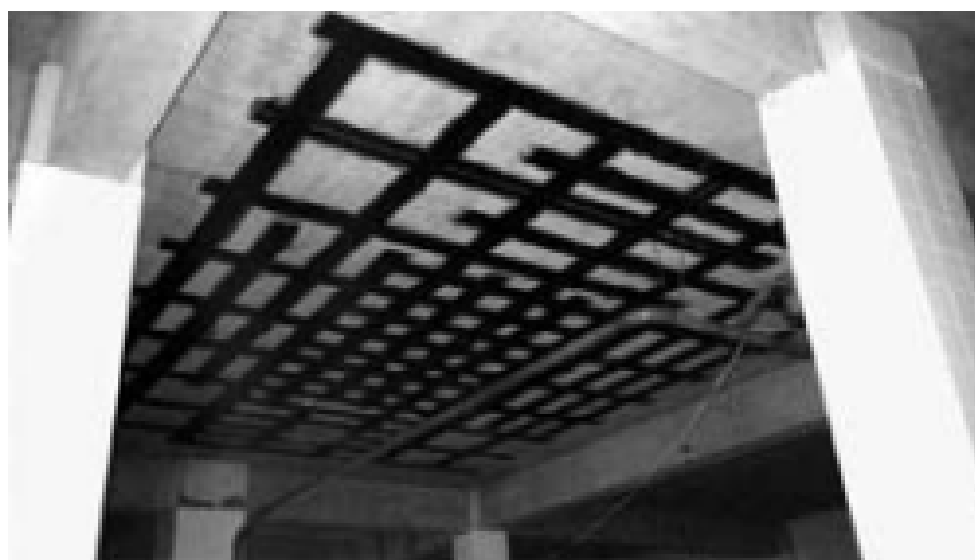


Figura 2.11 - Exemplo prático de reforço de laje maciça com combate a esforços de flexão.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

Também, o que pode comprometer a capacidade resistente da laje são os furos realizados para passagem de tubulações entre lajes. Reduzindo assim a área atuante do concreto e podendo ser feitos furos em locais que possuem armaduras indispensáveis para combate de esforços à flexão.



Figura 2.12- Exemplo prático de reforço de laje nervurada com combate a esforços de flexão.

Fonte : Arquivo do Autor

Reforço de Pilares

O reforço de pilares com fibras de carbono, pode ser realizado distintamente de duas maneiras, a priori com o aumento da resistência à flexão, com este sendo obtido pela aplicação de compósitos de fibras de carbono nas faces do pilar, a fim de que combata esforços de flexão dessas faces mais solicitadas. E secundamente com o aumento da resistência à compressão axial, sendo feito o reforço por confinamento já este é realizado por meio do envolvimento longitudinal por completo do pilar, com as mantas de fibra de carbono e as resinas epóxi, proporcionando assim um efeito de confinamento que reforça sua capacidade de carga e ductilidade (MACHADO, 2002), conforme figuras 2.13 e 2.14.

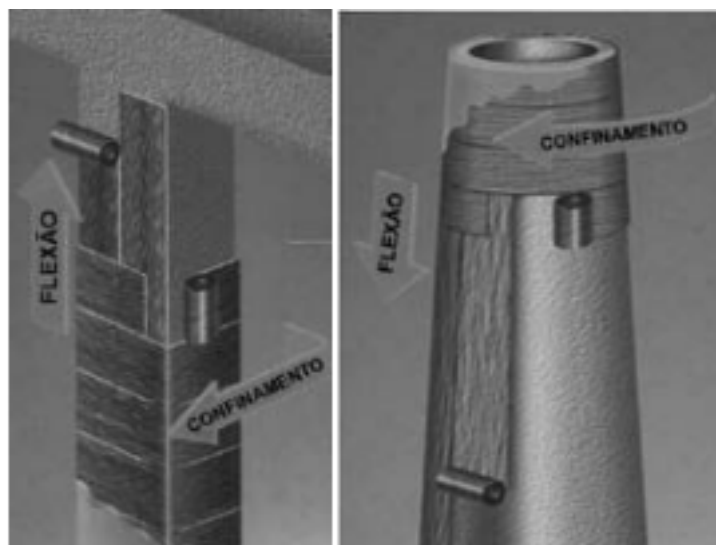


Figura 2.13- Esquema de reforço de pilar de concreto armado com combate a esforços de flexão e compressão por meio do confinamento.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.



Figura 2.14- Exemplo real de reforço de pilar de concreto armado com combate a esforços de compressão por meio do confinamento.

Fonte : MACHADO, ARI DE PAULA - 2002.

É importante ressaltar que, conforme indicado por Machado (2002), a sequência executiva do reforço em pilares deve seguir uma ordem específica: primeiro, realiza-se a aplicação do reforço à flexão, e em seguida pelo confinamento. Essa ordem garante a aderência entre o concreto e o sistema composto, em combate de esforços à flexão,

cisalhamento e compressão, assim essa se faz uma condição fundamental para o sucesso do reforço estrutural.

2.3.2 CONCRETO REFORÇADO COM AUMENTO DE SEÇÃO E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Nas intervenções para reforço de estruturas de concreto visando a correção de patologias ou erros de execução, é importante ressaltar o uso de concreto de alto desempenho pois se trata de um método tradicional e acessível na realidade atual com diversos materiais com essa finalidade sendo mais difundidos comercialmente.

A justificação do uso do método de aumento de seção combinado com concreto de alto desempenho, é pautada pela necessidade de aprimorar a resistência dos elementos estruturais comprometidos. Segundo Chastre (2000), o reforço por encamisamento é uma técnica amplamente empregada para poder fazer o aumento da seção transversal dos elementos de concreto armado, assim adicionando novas armaduras e também um concreto de melhor desempenho e qualidade.

Esse método é justamente indicado para quando há necessidade de elevar a resistência das zonas comprimidas de concreto, ou então de conferir maior rigidez aos elementos estruturais. Tal necessidade ocorre em casos onde as dimensões da seção de concreto são insuficientes ou quando a qualidade do material original não atende às exigências do projeto estrutural (Chastre, 2000).

Além disso, a escolha do material de reforço deve levar em consideração não apenas a compatibilidade mecânica com o concreto existente, mas também outros fatores, assim como a necessidade de um ganho de resistência de forma rápida, resistência a agentes químicos e também aspectos externos. De acordo com Reis (1998), e citando Warner e Clímaco (1990), a seleção do material de reparo deve priorizar aqueles que apresentam propriedades semelhantes às do substrato original.

Com isso a justificativa do reforço com utilização de concretos de alto desempenho combinadas ao aumento de seção, é plausível por serem materiais de certa formas semelhantes aos utilizados originalmente durante a construção da estrutura. Podem ser sugeridos o uso destes materiais e tecnologias executivas, nos casos da figura 2.15 e 2.16 .



Figura 2.15- Pilar de concreto com área insuficiente para recebimento de pilar metálico, sem ter ancoragem dos chumbadores no concreto.

Fonte : Arquivo do Autor.



Figura 2.16- Viga e pilar de concreto com falha de concretagem, ausência de concreto para resistir os esforços de compressão conforme projeto.

Fonte : Arquivo do Autor.

Na realidade atual, com o avanço da tecnologia de materiais de construção e a industrialização na construção civil, obteve-se uma maior difusão do concreto de alto desempenho (denominado por C.A.D.), possibilitando sua aplicação em reforços e reparos estruturais especialmente aqueles por aumento de seção ou preenchimento de vazios de concretagem.

Segundo Shah & Ahmad, e Bacin (1998) citado por Takeuti (1999), um C.A.D. pode ser caracterizado por sua alta resistência à compressão, atingindo valores superiores a 17,5 MPa em apenas quatro horas, 35 MPa em 24 horas e ultrapassando 70 MPa após 28 dias. O American Concrete Institute (ACI 363, 1991) também define o C.A.D. como aquele que possui resistência à compressão acima de 41 MPa, reforçando sua aplicabilidade em estruturas que exigem alto desempenho mecânico e longevidade.

Sendo utilizados em sua composição aditivos superplastificantes e materiais pozolânicos, como sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto-forno, tornaram viáveis a produção de concretos com elevada resistência à compressão (aqueles com resistência maior a 40 MPa), baixa permeabilidade e alta durabilidade. Desta forma, os concretos de alto desempenho apresentam maior resistência química, resistência à abrasão e à erosão, além de uma menor segregação, contribuindo assim para a integridade e longevidade das estruturas reforçadas (REIS, 1998).

Dentre as propriedades melhoradas do C.A.D., destaca-se a influência da sílica ativa na durabilidade do material, assim vindo a reduzir a exsudação no estado fresco e tornando o concreto endurecido mais impermeável a agentes agressivos. Devido a isso demonstra sua relevância em processos de recuperação estrutural, pois com a presença da sílica ativa há uma melhora significativa da aderência do novo material à peça de concreto existente.

Outras características vantajosas incluem, uma boa aderência ao aço e ao concreto, resistência elevada nos estágios iniciais de cura e uma notável resistência ao ataque de cloretos e sulfatos. Essas propriedades tornam o C.A.D., uma escolha plausível para reforços e reparos estruturais, garantindo maior desempenho e por fim durabilidade às estruturas submetidas a esforços consideravelmente altos (REIS, 1998).

Sobre o método de reforço por encamisamento e aumento de seção, é destacado por Takeuti (1999) e Reis (1998) o uso do Concreto de Alto Desempenho nestes casos de reforços, sendo feito um trabalho para garantir a aderência do concreto velho ao novo e

inserção de armaduras de aço nas seções das peças estruturais, sendo um método tradicional e trazendo resultados significativamente eficientes. Podendo ser aplicados nos casos a serem apresentados em reforços em vigas e em pilares a seguir:

-Reforço em vigas:

O reforço estrutural em vigas por meio do aumento da seção transversal, se apresenta sendo uma solução eficaz em casos onde há insuficiência de armadura na zona tracionada. Esse método consiste justamente na adição de novas armaduras longitudinais e transversais, e também na aplicação de concreto de alto desempenho, proporcionando assim um aumento da capacidade resistente da peça estrutural. Porém essa técnica pode resultar em seções finais significativamente maiores do que as apresentadas em projeto originalmente, o que é de certa forma um fator limitante em situações onde há restrições de espaço ou interferências arquitetônicas (REIS, 1998).

Para garantir a aderência entre o reforço e o substrato original, é necessário realizar o apicoamento da superfície da viga, removendo a camada superficial de argamassa e parte do concreto até a exposição dos estribos e armaduras existentes. Durante essa etapa, as novas armaduras transversais são fixadas de modo a suportar os esforços cortantes que podem causar cisalhamento entre os materiais velhos e novos. Além disso, a ancoragem das barras que chegam até os apoios deve ser cuidadosamente executada para garantir a eficácia do reforço. O que pode ser visto na Figura 2.17 e 2.18:

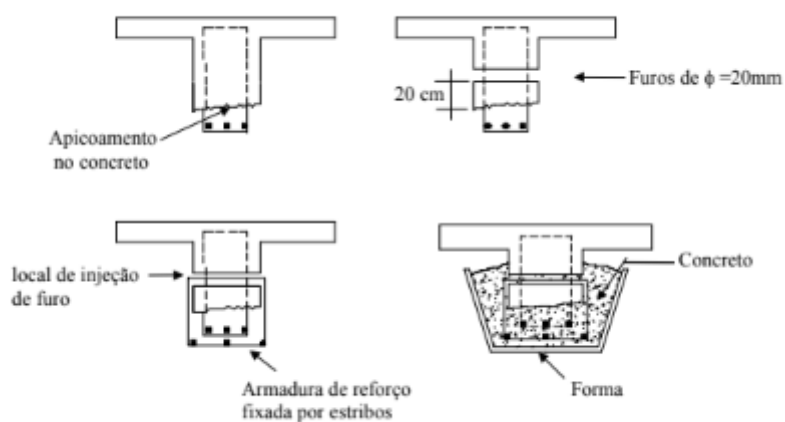


Figura 2.17- Reforço de viga por aumento de seção e novas armaduras longitudinais e transversais.

Fonte : (Reis,1998 p. 64. citado de Cánovas,1988)



Figura 2.18- Reforço de viga por aumento de seção e novas armaduras longitudinais e transversais.

Fonte: http://sercpintonline.blogspot.com.br/2011_03_01_archive.html.

Segundo conforme apresentado por Reis (1998) que mencionam, Petrucci, e Cánovas (1988), essa ancoragem das barras até os apoios podem ser realizadas através da perfuração do concreto existente, seguida da introdução das barras longitudinais e do preenchimento dos vazios com argamassa epóxi ou injeções de adesivos estruturais, assegurando assim a fixação adequada das novas armaduras. Durante o dimensionamento estrutural, deve-se considerar que as armaduras adicionais e as originais podem estar posicionadas em planos distintos, o que influencia na distribuição dos esforços e pode resultar em tensões diferenciadas entre as armaduras existentes e as recém-adicionadas (REIS, 1998).

Reforço em Pilares:

O reforço de pilares por aumento de seção é uma técnica amplamente utilizada para melhorar a capacidade de carga e a resistência estrutural de edificações, principalmente em situações onde as dimensões originais são insuficientes para suportar os esforços solicitantes. Esse método consiste na adição de concreto de alta resistência e novas armaduras longitudinais e transversais, podendo ser aplicado em todo o contorno do pilar ou apenas em

algumas de suas faces, dependendo das condições estruturais e das limitações de espaço (TAKEUTI, 1999). Como pode ser visto na Figura 2.19, sendo aumentos de seções totais ou parciais:

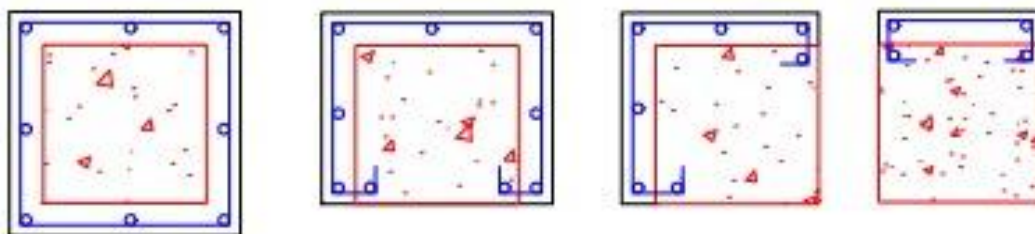


Figura 2.19- Configuração de reforço de pilares por aumento de seção total ou parcial e novas armaduras longitudinais e transversais, com a área vermelha sendo o pilar antigo e a indicado em azul as novas armaduras da nova área a ser implementada no reforço.

Fonte : (Takeuti,1999 p. 13. modificada de VALLE,1983)

A escolha da espessura da camada de concreto a ser adicionada deve levar em consideração a facilidade de aplicação durante o reforço estrutural e o tamanho dos agregados utilizados. De acordo com Cánovas (1988), recomenda-se que essa espessura não seja inferior a 10 cm, a menos que se utilizem concretos projetados ou com aditivos superplastificantes, garantindo assim um desempenho adequado e uma boa aderência entre o concreto antigo e o novo. Sendo assim plausível a utilização de grautes de alta resistência, ou concretos de alto desempenho que atendam a resistência pedida com o tamanho dos agregados limitados por projeto já que se engloba em um reforço estrutural.

Para poder melhorar a interação entre o pilar original e o material de reforço, são adotadas técnicas que aumentam a aderência entre os dois concretos. Após a escarificação da superfície do pilar, pode-se aplicar pontes de aderência, como resina epóxi, para assegurar a união eficaz entre os materiais (CÁNOVAS, 1988). Além disso pode ser feita a criação de dentes ao longo da altura do pilar, removendo trechos de concreto com cerca de 3 cm de profundidade em intervalos regulares, contribui significativamente para a absorção dos esforços cortantes existentes na interface entre o pilar e o reforço.

Outra medida recomendada é o uso de estribos fechados em todo o contorno do pilar, conforme sugerido pela FIP e Prado (1998) e citado por Takeuti (1999), pois esse procedimento aumenta justamente a ductilidade do elemento estrutural e com isso melhora sua capacidade de absorver as cargas verticais. Também é indicado arredondar as quinas do pilar original para reduzir a concentração de tensões e minimizar o risco de fissuração devido à retração do concreto novo. Dessa forma, ao seguir essas diretrizes e utilizar concretos com resistência superior ao do substrato original, é possível garantir um reforço eficiente e duradouro, melhorando significativamente o desempenho estrutural dos pilares reforçados (TAKEUTI, 1999).

Segue nas figuras 2.20, 2.21, e 2.22 a seguir, a execução de um reforço estrutural feito por aumento de seção parcial com concreto de alto desempenho e adição de estribos e barras longitudinais, o traço de concreto foi feito com, adição de plastificante e graute ensacado conforme traço requisitado por projeto de reforço:



Figura 2.20- Escarificação do pilar para aderência entre o concreto velho e o novo a ser executado.

Fonte : Arquivo do autor



Figura 2.21 - Imagem durante execução da inserção de armaduras e fixação das barras longitudinais e transversais por adesivo epóxi estrutural conforme projeto do reforço.

Fonte : Arquivo do autor



Figura 2.22 - Concretagem da área aumentada por reforço, com concreto de alto desempenho com adição de graute e plastificante durante a execução do traço.

Fonte : Arquivo do autor

2.3.3 ADIÇÃO DE METAIS E LIGAS ESTRUTURAIS

Dentre as diversas técnicas de reforço estrutural, a utilização de elementos metálicos destaca-se pela praticidade e eficiência na recuperação e no aumento da capacidade resistente das estruturas justamente por serem elementos industrializados. De acordo com Souza e Ripper (1998) e abordado por Ferreira (2014), a colagem ou fixação de chapas e perfis metálicos é amplamente empregada no Brasil devido a sua rápida execução, e à possibilidade de reforço sem grandes interferências na geometria original da peça, assim sendo recomendado essa técnica para situações emergenciais ou em estruturas que não podem sofrer modificações significativas. Como exemplo executado na figura 2.23:



Figura 2.23 - Reforço de viga de concreto por meio de chapas metálicas e fixado por conectores.

Fonte : www.stap.pt/

Para garantir a eficácia desse método, é fundamental assegurar que a superfície do concreto tenha resistência suficiente para transmitir os esforços de cisalhamento atuantes na ligação. Além disso, a chapa de aço não deve ser explorada em sua totalidade para evitar falhas prematuras. Para mitigar problemas relacionados ao descolamento na região de ancoragem, recomenda-se a utilização de chumbadores metálicos ou a extensão da chapa até áreas onde sua presença não seja essencial, CAMPAGNOLO (1993) mencionado por REIS, 1998).

O uso de resinas epóxi nesse processo oferece diversas vantagens, como a rapidez na execução, a ausência de materiais úmidos e a minimização de ruídos e vibrações durante a aplicação. Como a armadura suplementar é introduzida na forma de chapas de aço por colagem no concreto, essa técnica apresenta algumas limitações, como a dificuldade de inspeção de fissuras e corrosão sob a chapa colada, a baixa resistência a temperaturas elevadas e o risco de descolamento das extremidades da chapa devido a concentrações de tensão nessas regiões (REIS, 1998).

Conforme indicado na Figura 2.24, pode-se ver os problemas causados por descolamento da chapa de aço de reforço:

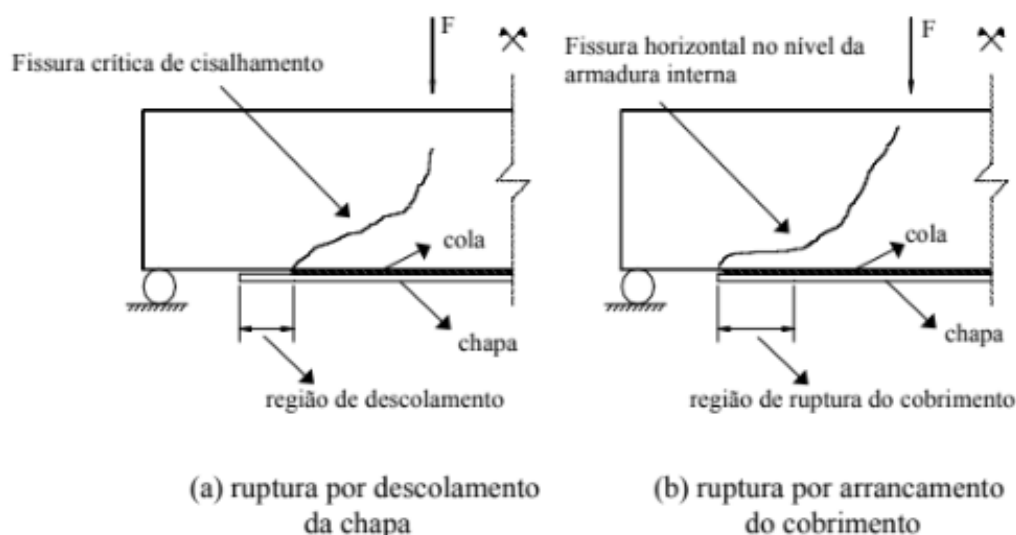


Figura 2.24 - Problemas causados em vigas de concreto por descolamento do elemento metálico de reforço.

Fonte : (REIS, 1998)

A resistência da ligação depende da qualidade do adesivo, do estado das superfícies e das propriedades dos materiais envolvidos. No caso de reforço de vigas, pilares ou lajes com chapas de aço coladas por resina epóxi, é essencial estabelecer um valor mínimo de adesividade tangencial, prevenindo falhas no plano da ligação causadas por esforços tangenciais advindos do carregamento (REIS, 1998). Pode-se ver também o esquemático de reforço em pilares por meio de adição de chapas de aço, por resinas epóxi e conectores nas figura 2.25:

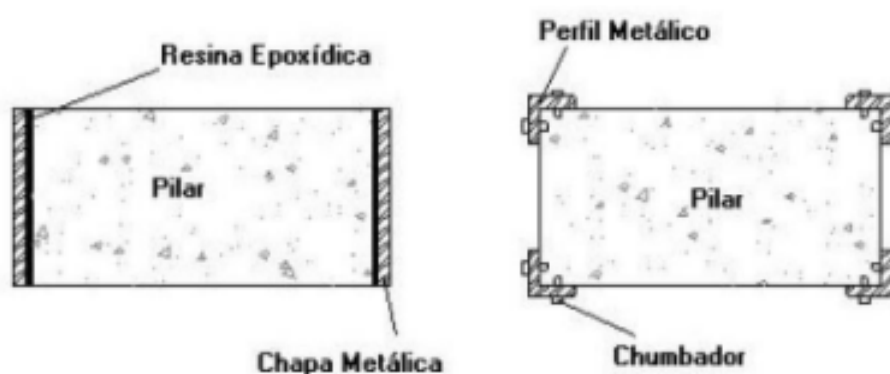


Figura 2.25 - Reforços por elementos metálicos

Fonte : FERREIRA, 2014 - Retirado de (RIGAZZO, 2003)

Com isso o ideal para execução deste tipo de reforço é a combinação de colagem por resina epóxi com devida resistência e conectores e chumbadores dos elementos metálicos a fim de evitar o descolamento e o cisalhamento entre os elementos heterogêneos que são justamente a chapa de aço e o elemento de concreto.

2.4 NORMAS TÉCNICAS E REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS

No contexto de estruturas de concreto armado, é fundamental considerar os estados-limite último e de serviço, com foco em questões como fissuração e outras patologias. Tais problemas podem comprometer a segurança e o bem-estar dos usuários, destacando a importância da necessidade de intervenção estrutural quando a estrutura apresentar. (NBR 6118,2023).

Uma normativa que deve ser abordada ao falar de reforço estrutural é justamente a NBR 15575-2, a norma de desempenho de edificações habitacionais. De acordo com a NBR

15575 -2 (ABNT, 2013), é essencial que as estruturas atendam aos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS), a fim de que evite a ruína parcial ou total da edificação, bem como deformações excessivas que possam comprometer sua funcionalidade. Assim, a realização de reforços estruturais deve considerar não apenas a recuperação da capacidade resistente, mas também para adequação aos requisitos normativos de segurança e desempenho.

A norma ABNT NBR 15575 (2021) estabelece que a estrutura deve atender, durante sua vida útil, a critérios rigorosos, como não ruir ou perder estabilidade em nenhuma de suas partes, não causar sensação de insegurança aos usuários devido a deformações excessivas e atender às interações com o solo e o entorno da edificação, tendo mencionamento conforme disposto das normativas da ABNT, como NBR 5629, NBR 11682 e NBR 6122.

Assim o reforço estrutural durante proposição após diagnósticos de patologias e de projeto devem ser executados de forma a cumprir esses requisitos, garantindo que a edificação mantenha seus níveis adequados de desempenho estrutural e funcionalidade ao decorrer do tempo, isso vale também para intervenções de espaços que modifiquem o tipo de uso como aumento da carga de uso, entre outras que podem vir a intervir na fundação também.

Ferreira (2014) destaca que, devido à diversidade de situações que podem demandar reforço estrutural, as normas mais utilizadas para orientação não são específicas para esse fim. No entanto, podem ser utilizadas normas já existentes voltadas para o projeto e execução de estruturas convencionais para adequações estruturais, como a NBR 15575 (ABNT, 2013), que faz referência a diversas normativas fundamentais, incluindo por exemplo as normas: NBR 8681, NBR 6123, NBR 6118, NBR 14931, NBR 9062, NBR 8800, entre outras.

O controle da fissuração é um ponto central quando se fala em durabilidade de estruturas de concreto armado. A ABNT NBR 6118:2023, item 7.6, estabelece que a corrosão das armaduras está diretamente ligada à qualidade e espessura do cobrimento, bem como à abertura das fissuras. Em estruturas de grande porte, como pontes estaiadas, a negligência nesse controle compromete a proteção do aço, acelerando o processo de deterioração. No caso da Ponte JK, fissuras visíveis poderiam ter servido como alerta para a necessidade de monitoramento e reforço antes do colapso.

A norma ainda reforça que as armaduras ativas, por estarem sob tensão, exigem controle ainda mais rigoroso de fissuras (item 7.6.2). Isso demonstra que, em obras que utilizam protensão, como foi o caso da Ponte JK e de estruturas semelhantes, a manutenção preventiva não é apenas recomendável, mas mandatória. A ausência desse acompanhamento pode resultar em perda de desempenho estrutural a curto prazo.

Do ponto de vista da segurança estrutural, a NBR determina que os projetos e verificações considerem os Estados-Limite Últimos (ELU) (item 10.3). Entre eles, destacam-se o risco de perda de equilíbrio, esgotamento da capacidade resistente, efeitos de segunda ordem e colapso progressivo. O que ocorreu na Ponte JK sobre o Rio Tocantins pode ser relacionado diretamente à falta de monitoramento adequado desses estados-limite, uma vez que sinais de esgotamento da capacidade resistente não foram tratados em tempo hábil.

Nos ensaios de carga dinâmica realizados em pontes brasileiras, incluindo a própria Ponte JK em momentos de avaliação, foram observados deslocamentos excessivos. A norma, em seu item 13.3, define deslocamentos-limite justamente para evitar vibrações indesejáveis, impactos em elementos não estruturais e comprometimento da estabilidade global. Esses deslocamentos, se não tratados, geram desconforto aos usuários e indicam risco de instabilidade progressiva, como foi observado antes do colapso.

Outro aspecto de relevância normativa é a necessidade de garantir a segurança em relação aos ELU e aos Estados-Limite de Serviço (ELS), conforme itens 16.2.3 e 16.2.4. Nos ELU, a norma destaca a importância da ductilidade, ou seja, que a estrutura apresente sinais visíveis antes da ruína, permitindo ações de evacuação e reforço. Já nos ELS, exige-se a verificação de flechas, fissuras e vibrações, garantindo que a estrutura atenda não apenas à segurança, mas também ao conforto e funcionalidade em serviço.

Por fim, a norma ressalta a durabilidade (item 16.4) como fator indispensável para a vida útil da estrutura. Isso significa que, além da segurança imediata, a estrutura deve ser projetada e mantida para resistir às condições ambientais ao longo do tempo. O colapso da Ponte JK evidencia como a ausência de manutenção preventiva e o não atendimento às exigências normativas podem resultar em falhas graves, afetando não só a integridade da obra, mas também vidas humanas.

Além disso, normas internacionais são amplamente empregadas, e que podem ser citadas algumas, por exemplo na execução de reforço estrutural com fibra de carbono, que destacam-se o ACI 440R-96 (1996) e o ACI Committee 440 (2002), que fornecem diretrizes técnicas para o uso de FRP (Fiber Reinforced Polymer) em estruturas de concreto.

Por fim, no contexto europeu e americano, outras normativas também são amplamente referenciadas para reforço estrutural. O CEB (1983), por meio dos boletins 161 e 162, apresenta diretrizes para avaliação e requalificação de estruturas de concreto, abordando a resposta de regiões críticas a ações de grande amplitude e os procedimentos para reabilitação estrutural.

Já nos Estados Unidos, o ACI 318/1992 estabelece requisitos gerais para projetos em concreto armado, enquanto o ACI Committee 544 (1987) trata das propriedades do concreto reforçado com fibras, trazendo parâmetros técnicos essenciais para projeto e execução, de reforço e reabilitação estrutural.

3. METODOLOGIA

O trabalho em questão seguirá apresentando uma revisão da bibliografia com foco em estudos de caso de reforço estrutural em estruturas de concreto armado. A revisão posterior terá como objetivo selecionar, trabalhos que apresentaram diferentes soluções para situações em que foi necessário intervenções do tipo reforço e/ou recuperação estrutural.

Os trabalhos a serem apresentados serão divididos em elementos estruturais que sofreram intervenção, se lajes, vigas ou pilares, e qual a técnica empregada: aumento da seção concreto, uso de materiais compósitos ou uso de elementos metálicos.

Com as informações obtidas espera-se apresentar os motivos que levaram a necessidade das intervenções, o aumento da capacidade de carga caso estejam disponíveis e as dificuldades enfrentadas na concepção e execução do reforço.

Após a análise técnica das principais técnicas e materiais empregados em reforço estrutural, este trabalho avança para um estudo de caso prático, no qual essas técnicas serão contextualizadas à luz de um episódio real de colapso estrutural. O objeto de estudo é a Ponte Juscelino Kubitschek, uma importante obra de arte especial que, mesmo após intervenções, colapsou em dezembro de 2024. A análise técnica do caso permitirá refletir sobre as falhas ocorridas e confrontá-las com as práticas recomendadas na literatura.

4. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

Nas últimas décadas, diversos sinistros envolvendo colapsos estruturais, bem como casos de fissuração e ruptura de elementos construtivos têm sido objeto de análise tanto no meio acadêmico quanto no profissional da engenharia civil. O estudo aprofundado desses eventos, aliado à implementação de ações preventivas e corretivas é fundamental para evitar a recorrência de tais ocorrências nas edificações.

A área de estudo de patologias têm ganhado força nos últimos anos justamente devido a muitas edificações projetadas e executadas nas décadas de 70 e 80 até mesmo 90, que ao chegarem perto do final de sua vida útil concebidas nos projetos estruturais iniciais, apresentam patologias que podem ser alarmantes agora mencionadas pela norma de desempenho.

Assim tais patologias devem ser corrigidas a fim de recuperar ou reabilitar a estrutura para que o uso da mesma não seja inviabilizado ou ocorra algum sinistro relacionado ao colapso. Sendo o objetivo do presente trabalho justamente abordar algumas das técnicas mais utilizadas a fim de despertar na comunidade acadêmica o interesse na área de reforço estrutural.

Tendo em vista que nas próximas décadas mais edificações chegarão ao final de sua vida útil, sendo necessárias medidas cabíveis para que tais estruturas não tenham seu uso inviabilizado, ou até mesmo ocorrência de um colapso estrutural.

Na tarde de 22 de dezembro de 2024, um domingo, ocorreu o colapso do vão central da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, situada na BR-226, entre Aguiarnópolis (TO) e Estreito (MA). A ponte que foi construída no início da década de 1960, tinha cerca de 500 metros de extensão total, sendo que o trecho central com 140 metros feito em concreto protendido desabou totalmente sobre o rio Tocantins.

Um estudo de caso a ser abordado a seguir é do rompimento da ponte entre o Maranhão e Tocantins, uma ponte importante do ponto de vista econômico e cultural, que conforme laudos técnicos mesmo após reforços estruturais executados, a negligência de uma ação preventiva, levou ao colapso em dezembro de 2024, como pode ser visto na figura 4.1:



Figura 4.1 - Colapso da Ponte Juscelino Kubitschek entre os estados brasileiros do Maranhão e Tocantins.

Fonte: \noticias/202412/governo-anuncia-reconstrucao-de-ponte-entre-maranhao-tocantins-e-s-indicancia-para-apurar-responsaveis

A construção da ponte não apenas ligou fisicamente os estados do Maranhão e Goiás, mas também viabilizou o fluxo de pessoas, bens e serviços, contribuindo para o desenvolvimento regional. O local de implantação, conhecido como Estreito, ganhou destaque nacional com a realização da obra, tendo sua população ampliada de aproximadamente 900 habitantes no início das obras para cerca de 5 mil pessoas em 1960. Além disso, o campo de pouso da localidade foi asfaltado e passou a comportar aeronaves maiores, refletindo os impactos positivos da ponte na modernização regional (CORREIO BRAZILIENSE, 1960).

Como é possível ver nas Figuras 4.2 e 4.3 a situação encontrada na época:



Figura 4.2 - Imagem das pistas de pouso feitas improvisadamente para aviões do exército.

Fonte: Alves de Castro (24 de janeiro de 1959). “Cassacos rasgam na selva a Rodovia Belém-Brasília”. Mundo Ilustrado, ano II, edição 57, página 8-9.

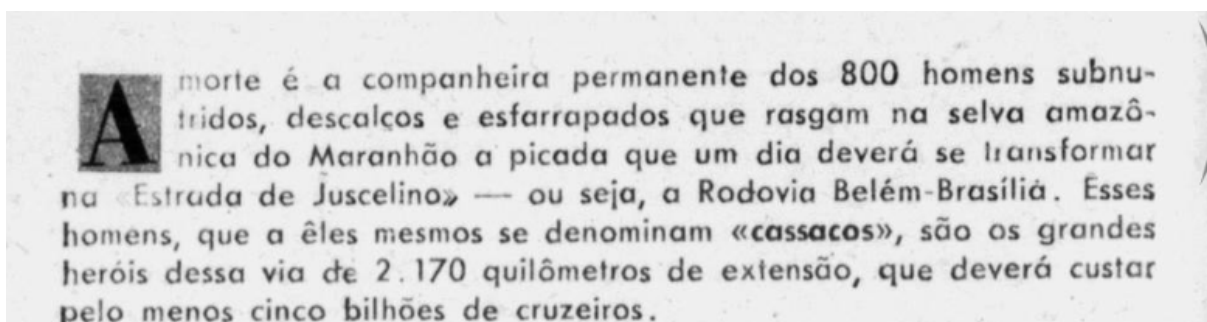


Figura 4.3 - Trecho do jornal do correio Braziliense

Fonte: Alves de Castro (24 de janeiro de 1959). “Cassacos rasgam na selva a Rodovia Belém-Brasília”. Mundo Ilustrado, ano II, edição 57, página 8-9.

Considerada de primeira classe, seu vão central foi na época, um dos maiores do mundo em sua categoria (CORREIO BRAZILIENSE, 1960). Considerada uma importante conquista da engenharia, esta ponte simbolizou um avanço no quesito social e econômico para a região de Estreito - MA, que passou de um pequeno povoado a um núcleo urbano em desenvolvimento, com novas construções, melhorias na infraestrutura, no comércio e na mobilidade local. Sendo evidenciada nos jornais da época, com um trecho na figura 4.4:



Figura 4.4- Trecho do jornal do correio Braziliense

Fonte: “Maior ponte do mundo: Guamá”. Correio Braziliense, edição 192, página 6. 8 de dezembro de 1960.

4.1 HISTÓRICO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKEK DE OLIVEIRA

A Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, localizada sobre o rio Tocantins, entre os estados do Maranhão e Goiás (Atualmente na região que corresponde ao Tocantins) , representou um marco de certa forma significativo na engenharia civil brasileira e na integração territorial promovida pelo projeto de desenvolvimento durante o governo de Juscelino Kubitschek. Concebida como parte da implantação da rodovia Belém-Brasília, essa OAE (Obra de Arte Especial), teve um papel fundamental na consolidação da malha rodoviária nacional e no fortalecimento da coesão entre as regiões Norte e Centro-Oeste do país. (CORREIO BRASILIENSE, 1960).

Um contexto agravante para o histórico da ponte, foram os problemas relatados no relatório técnico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) elaborado na década de 1990 pela empresa ENGESPRO ENGENHARIA LTDA, segundo o mesmo, a partir de inspeções de campo em 1995, foi evidenciado a necessidade de execução de reforço estrutural na ponte. Foram indicados o comprometimento, de aproximadamente 30% do pavimento de concreto existente sobre a estrutura

Podendo supor que desde sua inauguração o intenso uso rodoviário e envelhecimento dos materiais, juntamente com a ausência de correções corretivas levaram a execução de um reforço estrutural devido ao excesso de patologias, sendo os mesmos apresentado nas figuras 4.5 e 4.6:



Figura 4.5 - Exposição dos cabos de protensão no pavimento de concreto da ponte.

Fonte: ENGESPRO Engenharia Ltda – Ponte sobre o Rio Tocantins, BR/226-TO, Obra de Recuperação - Definição da Sobre-laje de Envolvimento dos Cabos Originais no Tabuleiro e Pavimentação – Relatório de Visita Técnica para o DNER - Junho de 2.000



Figura 4.6 - Execução de reforço estrutural na parte externa da superestrutura da ponte.

Fonte: ENGESPRO Engenharia Ltda – Ponte sobre o Rio Tocantins, BR/226-TO, Obra de Recuperação - Definição da Sobre-laje de Envolvimento dos Cabos Originais no Tabuleiro e Pavimentação – Relatório de Visita Técnica para o DNER - Junho de 2.000

Por fim, no relatório para o DNIT do “Anteprojeto de Recuperação, Reforço e Reabilitação de OAE sobre o Rio Tocantins, nas Rodovias BR-226/TO e BR-230/TO”, elaborado em 2019, feito pela empresa GEOSERV Serviços de Geotecnia e Construção LTDA, demonstrou deformações excessivas no greide da ponte com cerca de 70cm de deformação no meio do vão central da ponte que possui 140 metros de extensão em vigas protendidas.

Em maio de 2024, de acordo com a Academia Nacional de Engenharia, foi feito um edital de licitação, destinada a contratar uma empresa para realizar as obras de intervenção estrutural para reforço da ponte JK, porém sem andamentos em relação à licitação, que por fim levou a sua trágica ruptura, em dezembro de 2024.

4.2 CONCEPÇÃO E PROJETO ORIGINAL

A concepção da ponte nasceu na década de 1950, durante o governo do presidente da época Juscelino Kubitschek como uma iniciativa de integração e desenvolvimento das regiões Centro Oeste e Norte, algo que nos governos anteriores o eixo desenvolvido era a Região sudoeste, tanto que houve alteração e migração da capital federal que antes era o Rio de Janeiro - RJ e passou para a recém inaugurada capital planejada em 1960, com o desenvolvimento de estradas da chamada “Belém - Brasília”, que planejava ligar a Capital em construção à região norte.

Com isso houve a necessidade durante esse trecho de uma construção de uma nova ponte, a fim de atravessar o Rio Tocantins com uma largura a ser superada de 130 metros. conforme a figura 4.7. O projeto da ponte foi impulsionado pela urgência da conclusão da Belém-Brasília, coordenada pela Rodobrás, que estabeleceu prazos rigorosos para a entrega de suas obras até o fim de 1960.

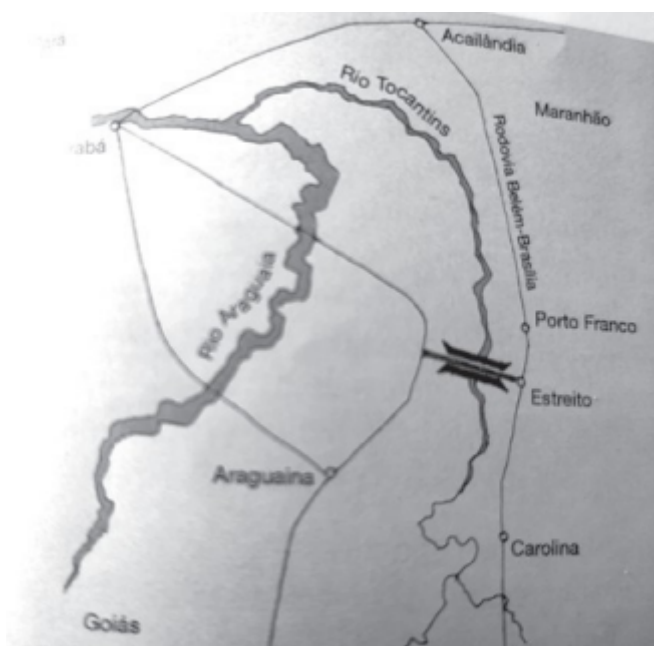


Figura 4.7 - Localização da ponte.

Fonte: VASCONCELOS, 2012. Citado em CARVALHO, Roberto Chust. “Análise sobre a queda da ponte JK”. Revista Estrutura, maio de 2025, p. 44.

Os trabalhos preliminares tiveram início em 1958, com a execução efetiva da construção iniciada em maio de 1959. Para superar os desafios técnicos impostos pelo vão central do rio Tocantins, foi convocado o engenheiro Sérgio Marques de Souza, referência

nacional em soluções estruturais da época, que propôs solução para o balanço sucessivo proposto em concreto protendido como solução ideal baseada na solução de Emílio Baumgart usada na ponte Herval em 1930. Essa escolha técnica permitiu manter o cronograma da obra, que garantiria sua entrega até dezembro do mesmo ano. (CORREIO BRAZILIENSE, 1960).

Com 532,70 metros de extensão e 10 metros de largura, a ponte Juscelino Kubitschek se destacou pela grandiosidade de sua estrutura e pela utilização de materiais expressivos, como 550 toneladas de aço CA-37, 147 toneladas de aço duro de 7 mm, 50 mil sacos de cimento, além de grande volume de areia e brita, além da tecnologia necessária de cura do concreto em 24h. Considerada de primeira classe, seu vão central de 140 metros em balanço sucessivo foi, na época, considerado um dos maiores do mundo em sua categoria (CORREIO BRAZILIENSE, 1960).

Com isso o esquema longitudinal da ponte foi projetado com a seguinte concepção na figura 4.8:

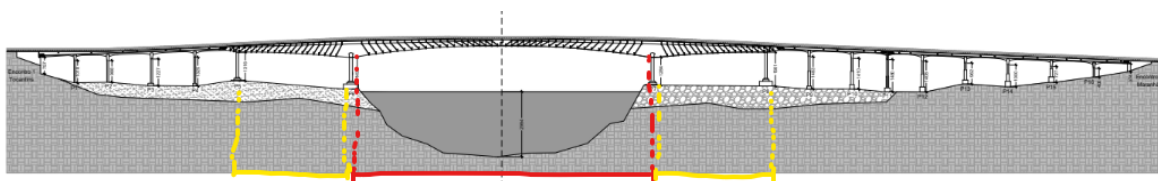


Figura 4.8 -Esquema dos trechos executados em balanços sucessivos da ponte, com destaque em vermelho para o maior vão de 140m e em amarelo os menores vãos com 53m cada.

Fonte: GEOSERV. Anteprojeto de recuperação, reforço e reabilitação de OAE sobre o Rio Tocantins, nas rodovias BR-226/TO e BR-230/TO. Brasília: DNIT, 2020.

4.3 PROCESSO CONSTRUTIVO

Ao abordar os processos construtivos da ponte, é necessário analisar a escolha do tipo de ponte que foi definida no início do projeto, que no caso é a ponte executada por balanços sucessivos, segundo jornais da época a idealização e a escolha desse método foi baseada na ponte Herval executada em 1930, sendo uma das pioneiras a difundir esse método na construção de pontes (THOMAZ, 2010), como visto na figura 4.9.



Figura 4.9 - Ponte sobre o Rio do Peixe – Santa Catarina (Herval do Oeste) feita pelo Eng. Emílio Baumgart.

Fonte: THOMAZ, 2010.

O método de balanços sucessivos é considerada em construções que possuem grandes vão a serem vencidos e consequentemente sem a possibilidade de escoramento tradicional partindo do chão, assim como realizado na Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, esse método consiste na execução segmentada da estrutura, vindo dos pilares centrais e avançando simetricamente por meio da concretagem sucessiva dos blocos chamados de aduelas, os quais se apoiam nos segmentos já concluídos. Após a cura do concreto de cada trecho, a fôrma autoportante é reposicionada para o próximo estágio, que dispensa o uso de andaimes ou estruturas provisórias no vão principal (FONSECA, 2015; GRIZOTTI,2020).

Cada aduela lançada era conectada à anterior por meio de protensão dos cabos longitudinais, garantindo a estabilidade da estrutura durante as etapas de montagem. Para viabilizar essa execução, houve o uso de uma plataforma de trabalho equipada com treliças e contrapeso, permitindo assim no local a montagem das formas e armação da super-estrutura da ponte para concretagem e execução da protensão que fazia parte do projeto inicial. Esse método executado na Ponte JK pode ser visto nas figuras 4.10 e 4.11, onde foram necessárias para vencer o vão principal de 140m.



Figura 4.10 - Execução de escoramento para concretagem por etapas de aduelas da Ponte Juscelino Kubitschek por meio de balanços sucessivos.

Fonte: ESTREITO INFORMA, 2020.



Figura 4.11 - Execução de escoramento para concretagem por etapas de aduelas da Ponte Juscelino Kubitschek por meio de balanços sucessivos.

Fonte: ESTREITO INFORMA, 2020.

Dado aos desafios impostos na época da construção, conclui-se que a construção da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira em Estreito - MA, por meio de balanços sucessivos foi um marco histórico na engenharia brasileira, mesmo com a escassez de equipamentos que atualmente são acessíveis para a execução de pontes de grandes vãos, os engenheiros e profissionais técnicos da época mostraram-se criativos e inovadores, em questão de resolução

dos desafios impostos. É indiscutível o marco de inovação tecnológica que esta ponte representou para o Brasil e também para o mundo a fora.

4.4 INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS REALIZADAS

As primeiras intervenções estruturais realizadas na Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, foram motivadas após um relatório técnico feito pela empresa ENGESPRO na época observada dos anos de 1995 e 1998. Na data da elaboração do relatório, a Ponte JK já completava cerca de 35 anos após sua inauguração em 1961, uma idade considerável em relação aos termos de vida útil de projeto, atualmente definidas na NBR 6118 em 50 anos de vida útil.

No contexto das intervenções estruturais, pode-se destacar a realização de avaliações técnicas da estrutura em diferentes fases da vida útil da Ponte JK, uma avaliação feita primeiramente no início dos anos 2000, e outra 20 anos depois, no ano de 2020, onde sua vida útil estrutural atingia incríveis 60 anos.

Conforme registrado pela Engespro (2000), as primeiras inspeções ocorreram ainda na fase de projeto, em dezembro de 1995. Posteriormente, novas verificações foram conduzidas durante a implantação dos serviços de recuperação e reforço estrutural, nos meses de julho de 1997 e maio de 1998. Por fim, uma nova inspeção foi realizada em novembro de 1998, motivada por eventos que reforçaram a necessidade de reavaliação da integridade estrutural.

Uma das intervenções a serem destacadas, realizadas em 1997, foi um reforço estrutural por meio da aplicação de esforços externos de compressão através da protensão com cordoalhas de aço de alta resistência, conforme mencionado no relatório técnico (ENGESPRO, 2000). Com isso, foram utilizadas peças metálicas fixadas externamente à estrutura, que atuavam como dispositivos desviadores e de ancoragem dos cabos, porém sem função estrutural (ao contrário de como é o reforço por meio de adição de chapas e ligas metálicas).

Esta intervenção possibilita a redistribuição dos esforços internos e melhora o desempenho da estrutura, sem a necessidade de alterações significativas em sua geometria original, uma técnica semelhante ao concreto reforçado com aumento de seção e concreto de alto desempenho, com um diferencial de uso de armadura ativa de protensão ao invés de uma armadura passiva com vergalhão de aço.

No entanto, a durabilidade desse sistema depende de medidas eficazes de proteção contra a corrosão. Embora apenas os elementos desviadores apresentem resistência à corrosão

atmosférica, os cabos de protensão exigem proteção rigorosa, pois sua exposição pode comprometer seriamente sua integridade conforme NBR 6118. Por essa razão, o projeto previu o completo envolvimento dessas peças em concreto armado, o que além de integrar os novos elementos à estrutura existente, proporciona uma barreira física contra agentes agressivos, garantindo a longevidade e a segurança da solução implantada.

Tais intervenções estruturais, realizadas em 1997, podem ser evidenciadas nas figuras 4.12, 4.13, 4.14.



Figura 4.12- Posicionamento dos cabos de protensão.

Fonte: ENGESPRO, DNER - Junho de 2.000.



Figura 4.13 - Posicionamento dos cabos de protensão no trecho P5/P6 lado tocantins.

Fonte: ENGESPRO, DNER - Junho de 2.000.



Figura 4.14 - Lançamento de cabos de protensão, ancoradas em peças metálicas.

Fonte: ENGESPRO, DNER - Junho de 2.000.



Figura 4.15 - Locação dos furos para fixação dos estribos na estrutura já existente..

Fonte: ENGESPRO, DNER - Junho de 2.000.

5. DESCRIÇÃO ESTRUTURAL DA PONTE

Com base em relatos da época da construção da ponte e por meio da Revista Estrutura, a Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, contava com uma construção de balanços sucessivos por meio de protensão, em sua construção original antes da execução do primeiro reforço estrutural. Com um concreto de f_{ck} 45 MPa, considerado de certa forma elevado para a época, justamente pelas limitações logísticas e distâncias elevadas em relação a centros de distribuição, foi possível garantir a resistência requerida para a aplicação da técnica de protensão, sendo realizada logo após 24 horas da concretagem de cada aduela, momento em que o concreto já atingia um f_{ckj} de 20 MPa.

Estruturalmente, a ponte apresenta um esquema típico de balanço sucessivo com aduelas segmentadas em concreto protendido. A execução do tramo central foi realizada em apenas 40 dias, com uma média de cinco dias por aduela, demonstrando a eficiência da técnica empregada.

5.1 GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL

A Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira apresenta uma configuração estrutural mista, com trechos em seção tipo caixão celular e trechos com lajes apoiadas sobre vigas, totalizando 532,7 metros de extensão. Essa extensão está distribuída em 17 vãos, delimitados por dois encontros (E1 e E2) e 16 apoios intermediários, identificados de P1 a P16, no sentido crescente do Tocantins para o Maranhão. A largura do tabuleiro sendo constante, com cerca de 12 metros ao longo de toda a ponte. (DNIT, 2020).

O trecho principal da ponte, responsável pela travessia sobre o Rio Tocantins, é composto por um vão central de 140 metros e dois vãos adjacentes de 53 metros, sustentados pelos pilares P5 a P8, sendo a estrutura deste vão central que acabou ruindo em dezembro de 2024. A superestrutura da ponte é formada por uma seção bicelular em concreto protendido, com largura inferior de 6,60 metros. A altura da seção varia ao longo do vão: sendo de 7,5 metros nos apoios centrais (P6 e P7), onde os esforços negativos são mais intensos, e com uma redução na altura para 2,85 metros no meio do vão central, otimizando o uso de materiais (DNIT, 2020). As figuras 5.2 e 5.3 demonstram onde ficam localizados os pilares de apoio da ponte com destaque para os vãos P6 a P7.



Figura 5.1 - Detalhe do vão central da ponte dos pilares P6 a P7.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

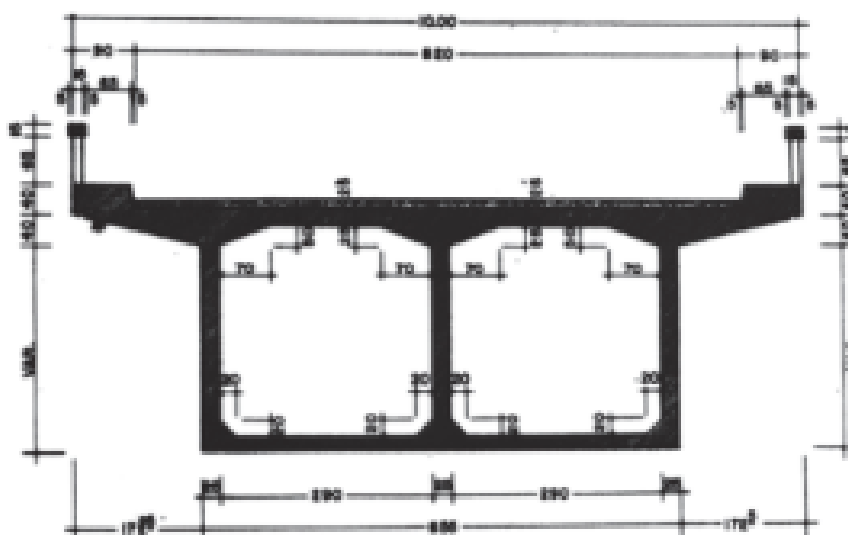


Figura 5.2 - Detalhe da seção da ponte JK, que trabalhava como viga caixão bicelular no projeto original com tabuleiro com 10 metros de largura.

Fonte: CARVALHO, Roberto Chust. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025.

Originalmente quando construída a ponte havia cerca de 10 metros de largura do tabuleiro, sendo posteriormente alargada em tempo não informado, para 12 metros possibilitando o fluxo de pedestres como pode ser visto na figura 5.3:

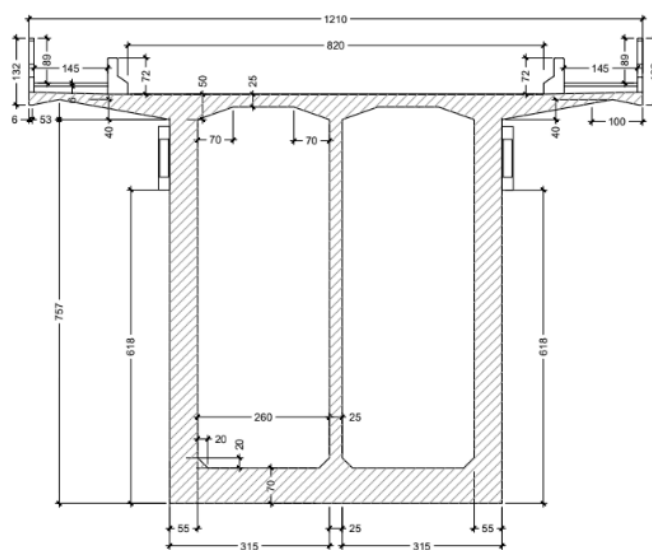


Figura 5.3 - Detalhe da seção da ponte JK, que trabalhava como viga caixão bicelular no projeto posterior com tabuleiro já ampliado para 12 metros de largura.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

A ponte Juscelino Kubitschek contava com dois sistemas estruturais, um composto por longarinas até o primeiro apoio Fressynet, que transicionava para o sistema estrutural de balanços sucessivos, onde pode ser visto no perfil montante da ponte que começa na parte do Tocantins, o sistema estrutural do tabuleiro sobre longarinas compunha do apoio P1 até o apoio P4 conforme indicado na figura

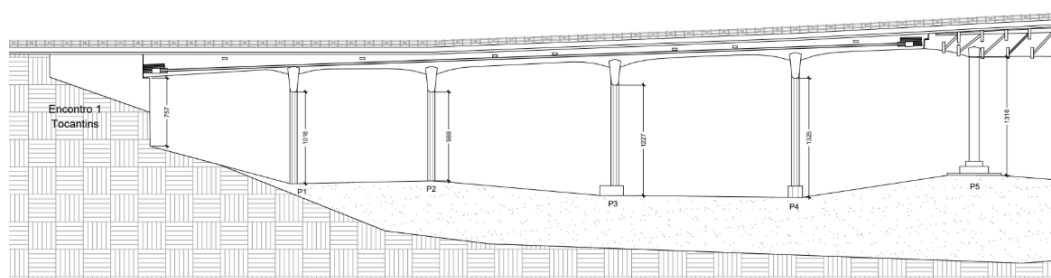


Figura 5.4 - Detalhe do perfil da ponte JK, parte do sistema de tabuleiro apoiado em longarinas até o primeiro apoio do balanço sucessivo.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

5.2 SISTEMA DE PROTENSÃO E APOIOS

A ligação entre o pilar e a viga principal foi concebida com o uso de apoio do tipo Freyssinet, garantindo maior mobilidade e adaptação aos esforços dinâmicos e deformações da estrutura. Este tipo de apoio, combinado à protensão das aduelas, contribuiu para a estabilidade do conjunto, onde pode ser visto na figura 5.1 o tipo de apoio utilizado.

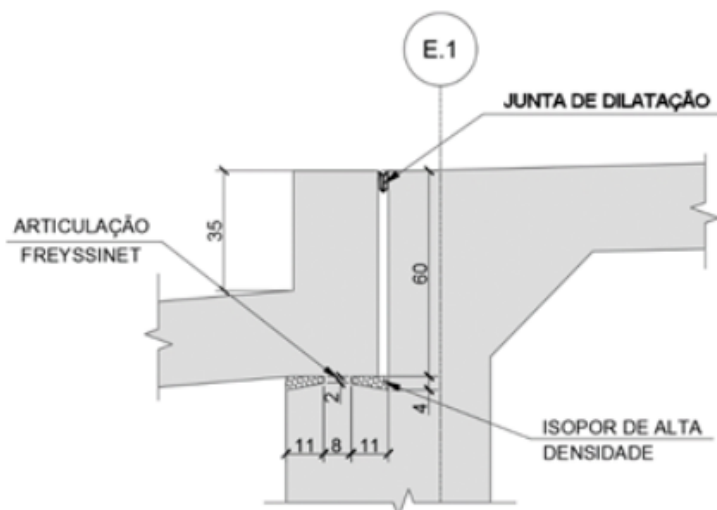


Figura 5.5 -Detalhe do apoio utilizado na ponte tipo Freyssinet.

Fonte: BRAGA, Walter de Almeida. São Paulo: Edgard Blucher, 1986. 106 p.

O sistema de protensão da ponte contava com os cabos apoiados na parte superior da seção transversal da ponte de acordo com Carvalho (2025), no projeto da ponte Juscelino Kubitschek, foram adotadas soluções específicas para suportar os esforços de flexão e cisalhamento. Para isso, utilizaram-se 276 cabos formados por doze fios de 7 mm, com capacidade de carga de até 400 kN cada. A estrutura foi projetada originalmente para resistir a um momento fletor máximo de 652.000 kN·m. A seção transversal da viga possuía forma celular, composta por três almas e altura variável, que variava entre 3,4 metros até 8 metros, com transição em forma parabólica. A mesa inferior da seção apresentava uma espessura de 70 centímetros nas extremidades de apoio e diminuía para 15 centímetros no centro do vão.

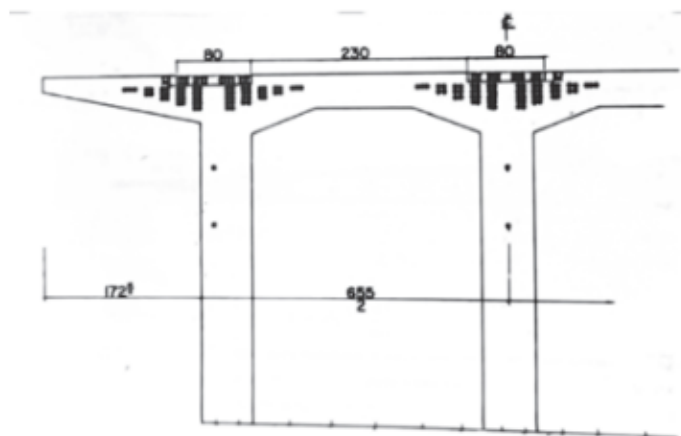


Figura 5.6 -Detalhe da protensão prevista em projeto.

Fonte: CARVALHO, Roberto Chust. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025.

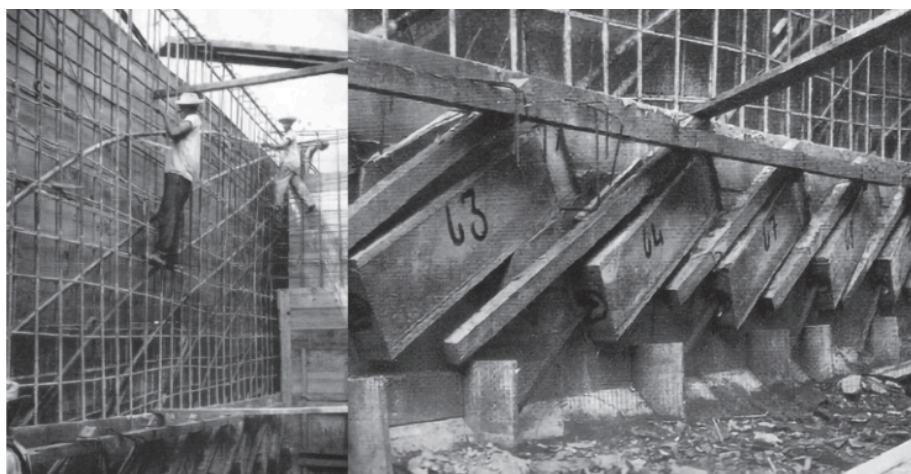


Figura 5.7 -Foto da execução e locação dos cabos de protensão dentro da viga.

Fonte: CARVALHO, Roberto Chust. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025.

Além disso, o posicionamento dos cabos de protensão, que era localizado na parte superior da seção nas regiões de apoio, exigia cuidados de certa forma específicos quanto à manutenção da estrutura. Como ressalta, Carvalho (2025), a superfície superior da ponte, especialmente nas áreas próximas aos apoios, demandava inspeções frequentes para assegurar o bom estado do pavimento, a impermeabilização adequada e a proteção eficiente das armaduras, o que em sua falta contribuiu para uma intervenção estrutural realizada em 1998 por conta da exposição dos cabos de protensão.

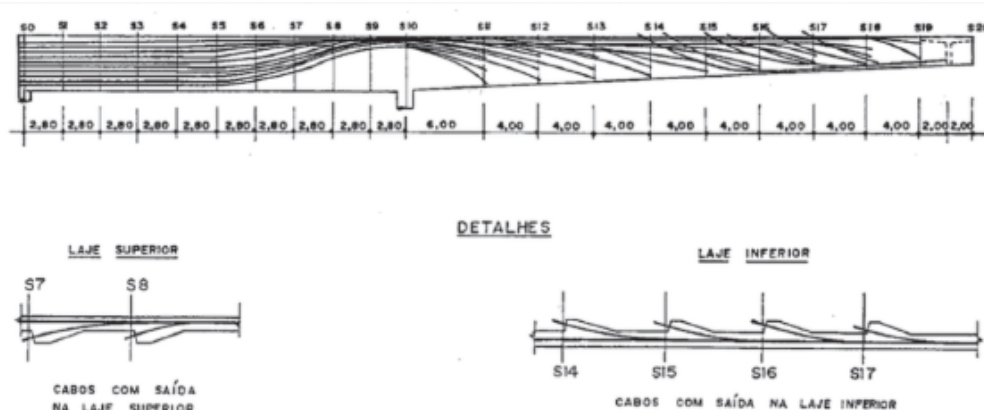


Figura 5.8 -Projeto original com disposição dos cabos e apoios.

Fonte: CARVALHO, Roberto Chust. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025..

6. LEVANTAMENTO DE PATOLOGIAS E DANOS ESTRUTURAIS

O levantamento de patologias e danos estruturais, é do relatório mais recente que se obteve da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, elaborado pela empresa GEOSERV em 2020 cerca de 4 anos antes da sua ruptura, em dezembro de 2024, nesse período já havia cerca de 25 anos passados após sua primeira intervenção estrutural em 1997/1998.

6.1 METODOLOGIA DE INSPEÇÃO

A metodologia de inspeção adotada para a avaliação da estrutura da ponte Juscelino Kubitschek sobre o Rio Tocantins, situada nas rodovias BR-226/TO e BR-230/TO, baseou-se em questões técnicas tendo que ser adaptados a realidade do local e por questões de limitações documentais, por conta de ser uma obra da década de 1960. Dessa forma, os trabalhos foram fundamentados principalmente em inspeções visuais, medições em campo e levantamentos geométricos que permitissem a elaboração de um projeto “as built” da ponte (GEOSERV, 2020).

Inicialmente, foram realizados serviços preparatórios, com destaque para a remoção da vegetação e a limpeza das superfícies dos elementos estruturais para garantir visibilidade e acesso às regiões críticas da ponte, nos apoios localizados na margem do Maranhão. Podendo assim iniciar o levantamento geométrico da estrutura existente que o objetivo primordial foi a verificação da regularidade dos elementos estruturais, incluindo o alinhamento e desaprumo

dos pilares, a fim de identificar deformações ou deslocamentos, que pudessem comprometer a integridade da ponte.

A inspeção visual foi realizada em paralelo com o levantamento geométrico, servindo para observar manifestações patológicas aparentes, como fissuras, manchas, corrosão de armaduras e degradação do concreto. Em regiões onde a armadura estava exposta, foi possível avaliar a configuração da ferragem utilizando paquímetro para aferição do diâmetro e trena para o espaçamento entre barras, permitindo uma análise preliminar das condições de corrosão e integridade do sistema estrutural.

Os dados foram coletados com o uso de estação total, trenas manuais, trenas a laser e paquímetros, conforme a complexidade e as condições de cada ponto de medição conforme as figuras 6.1, 6.2 e 6.3.



Figura 6.1 -Equipamento topográfico utilizado no levantamento.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.10



Figura 6.2 -Equipamentos de aferição como paquímetro e trena.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14

Para a demarcação do greide da ponte, os pontos foram estabelecidos na pista de rolamento, a uma distância de 25 cm dos guarda-rodas. As seções foram posicionadas com espaçamento regular (aproximadamente 5 metros no trecho de acesso e 7 metros no trecho em viga caixão bicelular) incluindo elementos como juntas, e apoios no meio do vão. Em cada seção transversal, foi realizado o levantamento de dois pontos: um no lado montante e outro no lado jusante. Ao todo, foram registrados 201 pontos para composição do levantamento do tabuleiro (GEOSERV, 2020).

Outra parte fundamental do diagnóstico estrutural da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, foram realizados ensaios dinâmicos com o objetivo de compreender o comportamento real da estrutura frente a diferentes condições de carregamento. As informações obtidas por meio dos ensaios foram utilizadas para a calibração de modelos numéricos que representam a configuração atual da estrutura. Essa calibração garantiu maior precisão às simulações, permitindo que os modelos refletissem o comportamento real da estrutura.

Para a realização dos ensaios dinâmicos, utilizou-se um veículo especialmente instrumentado, com sensores em todos os seus eixos, o qual percorreu a ponte em diferentes velocidades controladas. Durante as passagens, sensores servoacelerômetros instalados na estrutura e no próprio veículo registraram simultaneamente as respostas dinâmicas da ponte e as forças aplicadas, sendo realizado com um sistema de sincronização entre os dados. Como pode ser visto na figura 8.1.

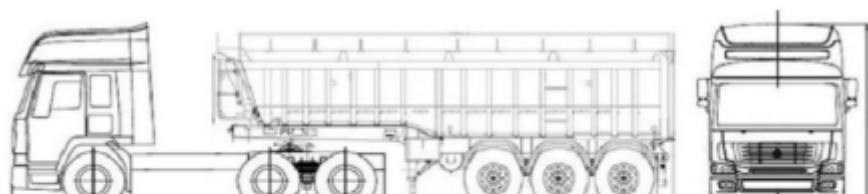




Figura 6.3 - Modelo de veículo de prova de carga e o veículo utilizado durante o teste.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.99.

Para permitir a caracterização do comportamento dinâmico da estrutura, a ponte foi instrumentada com sensores específicos posicionados ao longo de sua extensão. Foram utilizados servo acelerômetros instalados na parte superior do tabuleiro, próximos aos guarda-rodas, com o objetivo de captar as respostas vibratórias induzidas durante os testes. A disposição dos sensores foram nos principais pontos da superestrutura, incluindo vãos críticos e regiões próximas aos apoios.

Os dados foram adquiridos por meio de sistemas modulares da fabricante HBM, modelos Quantum MX1615 e MX1601, sendo um responsável pela leitura dos sensores na ponte e outro pelas leituras no veículo de ensaio. Ambos os sistemas foram sincronizados via rede TCP-IP, assegurando a simultaneidade das medições entre o veículo e a estrutura (GEOSERV, 2020).

Podem ser vistos nas figuras 6.4 e 6.5, os dispositivos para sincronização da aquisição dos dados em campo.



Figura 6.4 - À esquerda dispositivo de detecção à laser e à direita a aquisição de dados pelo computador.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.99.

6.2 PRINCIPAIS PATOLOGIAS OBSERVADAS

Dentre as diversas patologias apresentadas no relatório, é notável a relevância das patologias observadas no relatório técnico do DNIT (2020), diversas fissuras foram registradas no cobrimento de concreto das cordoalhas de protensão externa, localizadas tanto no vão central da estrutura quanto na região de apoio, como observado nas figuras . Tais fissuras atuaram como vias preferenciais para o ingresso de agentes agressivos, como umidade e dióxido de carbono, acelerando o processo de corrosão das armaduras.

Entre outras patologias identificadas antes da estrutura colapsar, estavam o deslocamento da argamassa de revestimento das paredes de travamento entre pilares e rachaduras no topo dos pilares octogonais, revelava falhas de aderência e redistribuição indevida de esforços. Também era possível observar a inclinação visível a olho nu entre elementos de reforço e os pilares originais, indicando interferência na geometria estrutural dos apoios, já os blocos de fundação apresentavam fissuras e rachaduras em larga escala, além de falhas de concretagem e armaduras expostas e oxidadas.



Figura 6.5 - Danos observados no bloco do P7, com significativa variação da geometria do bloco.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.



Figura 6.6 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura com sinais de oxidação.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.



Figura 6.7 - Deslocamento da camada de cobertura de argamassa identificada no pilar do apoio P13 e inclinação observada a olho nú entre pilar octogonal e capitel.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.



Figura 6.8 - Deslocamento da argamassa de cobrimento e exposição das armaduras longitudinais do pilar P7.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.

A presença de armaduras expostas e oxidadas em múltiplos apoios e trechos do tabuleiro evidenciava processo avançado de corrosão que comprometia a capacidade resistente da estrutura. O tabuleiro apresentava fissuras longitudinais e transversais nos balanços, além de danos no balanço lateral do caixão, indicando problemas na continuidade

estrutural e comprometimento da distribuição das cargas. O pavimento asfáltico apresentava irregularidades e fissuras em diversos trechos, já as juntas de dilatação se encontravam de certa forma danificadas em múltiplos lugares, permitindo infiltração de água e acelerando o processo de deterioração da estrutura da ponte.



Figura 6.9 - Exposição de armaduras no pavimento de concreto da ponte.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.



Figura 6.2 - Sinais de corrosão nos apoios centrais, do meio do balanço sucessivo ponto mais crítico da estrutura.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.



Figura 6.10 -Sinais de umidade e corrosão da armadura nos apoios, uma presença de uma mancha provinda da oxidação do aço.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020. p.13-14.

O conjunto de manifestações patológicas que foram identificadas configurava um estado crítico de deterioração que comprometia a segurança estrutural da ponte, ainda mais com a vida útil que já estava com cerca de 60 anos datadas a sua construção.

A extensão e severidade das patologias, distribuídas por praticamente todos os elementos estruturais, indicavam que a OAE encontrava-se em estágio avançado de degradação, demandando intervenções imediatas e abrangentes. A simultaneidade de patologias em elementos críticos como sistema de protensão, pilares, fundações e tabuleiro sugeria um comprometimento estrutural que poderia evoluir para situações de risco iminente de colapso caso não fossem adotadas medidas corretivas urgentes, cenário que se confirmou com o colapso da estrutura em dezembro de 2024 (GEOSERV, 2020).

7. ACIDENTE E COLAPSO ESTRUTURAL DA PONTE (2024)

7.1 RELATO DO EVENTO

No dia 22 de dezembro de 2024, às 15h de domingo, ocorreu o colapso catastrófico da ponte Juscelino Kubitschek, localizada na divisa entre os estados do Maranhão e Tocantins. O desabamento do vão central da estrutura representou uma das mais graves tragédias envolvendo OAE's no Brasil, confirmando os alertas técnicos que vinham sendo emitidos há anos sobre o estado crítico de conservação da ponte. O evento foi documentado através de

fotografias e vídeos divulgados em plataformas digitais de forma ampla, proporcionando material valioso para análise técnica do processo de ruptura.

A ocorrência do colapso foi agravada justamente pela presença de veículos no momento do desabamento, uma tragédia de vidas humanas. Registros fotográficos mostram a existência de dois caminhões e um automóvel de passeio em um dos tramos da ponte no momento da ruptura, evidenciando que o colapso ocorreu durante o período de tráfego normal. Esta circunstância amplifica a gravidade do evento, pois demonstra que a estrutura estava em pleno funcionamento quando falhou, contrariando qualquer expectativa de que sinais prévios pudessem ter alertado os usuários sobre a iminência do colapso como pode ser visto nas figuras 7.1 e 7.2.



Figura 7.1 - Foto retirada de um vídeo que mostrava a ponte, quando de repente ocorre o colapso da estrutura.

Fonte: <https://portalcorrente.com.br/noticia/13574/ponte-entre-maranhao-e-tocantins-desaba-sobre-rio-e-deixa-uma-pessoa-morta> . Acesso em julho/2025



Figura 7.2 - Foto retirada de um vídeo que era gravado mostrando a ponte, e de repente o desabamento do pavimento no momento da ruptura.

Fonte: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/norte/to/video-mostra-momento-em-que-ponte-desaba-entre-tocantins-e-maranhao/> . Acesso em julho/2025

O colapso que ocorreu de forma brusca, forneceu importantes evidências sobre o mecanismo de falha da estrutura, com vários registros fotográficos e filmagens realizadas com dispositivos móveis captaram o momento exato da ruptura, revelando que o processo ocorreu de forma súbita e violenta, característica justamente de falhas por ruptura do concreto. Esta observação é fundamental, para compreender, que o colapso não foi resultado de um processo gradual de deformação, mas sim de uma ruptura frágil que se propagou rapidamente através da seção crítica da estrutura (CARVALHO, 2025).

7.2 IMPACTOS HUMANOS, AMBIENTAIS E LOGÍSTICOS

Os impactos causados pelo desabamento da ponte foram inúmeros, com impactos de vidas humanas, econômicos, ambientais e consequentemente logísticos. O colapso da ponte Juscelino Kubitschek resultou em uma tragédia humana de proporções devastadoras.

No momento do desabamento, trafegavam sobre a estrutura três caminhões, um automóvel e três motocicletas, resultando no falecimento de 14 pessoas, sendo 12 adultos e duas crianças. Além das vítimas fatais confirmadas, há registro de vários desaparecidos, embora exista divergência sobre o número exato de pessoas ainda não localizadas. Esta dimensão humana do desastre evidencia como falhas estruturais em obras de arte especiais podem ter consequências catastróficas para a sociedade, transformando uma infraestrutura essencial em cenário de tragédia.

A gravidade da situação foi amplificada pelo tipo de carga transportada pelos veículos comerciais. Três caminhões que transitavam pela ponte, transportavam cerca de 22 mil litros de defensivos agrícolas (agrotóxicos) e 76 toneladas de ácido sulfúrico (H₂SO₄), substâncias classificadas como produtos quimicamente perigosos. A queda desses veículos no Rio Tocantins criou uma situação de emergência ambiental, com sérios riscos relacionados ao uso da água do rio para abastecimento da população, atividades pesqueiras e irrigação.

Em decorrência dos riscos de contaminação, houve recomendação oficial para suspensão temporária da captação de água para abastecimento da população em uma extensa

faixa do rio. Os impactos desses danos e ameaças alcançaram diretamente a população de 19 municípios distribuídos em ambos os estados afetados: 10 no Tocantins e 9 no Maranhão como pode ser visto na figura 7.3 que indica os municípios a jusante do rio. Estes municípios, situados a jusante do local da ponte até a confluência com o Rio Araguaia, abrigam uma população superior a 480.000 habitantes, demonstrando a magnitude do impacto social decorrente do colapso estrutural da ponte (PINA, 2025).

ESTADO	MUNICÍPIO	POPULAÇÃO (habitantes)
TOCANTINS	Aguiarnópolis	4.497
	Carrasco Bonito	3.318
	Esperantina	7.530
	Itaquatins	5.172
	Maurilândia do Tocantins	3.095
	Praia Norte	9.044
	Sampaio	4.215
	São Miguel do Tocantins	13.241
	São Sebastião do Tocantins	4.100
	Tocantinópolis	22.615
	SOMA 1 (TO)	76.827
MARANHÃO	Campestre do Maranhão	12.301
	Cidelândia	12.878
	Estreito	33.294
	Governador Edison Lobão (*)	18.411
	Imperatriz	273.110
	Porto Franco	23.903
	Ribamar Fiquene	7.420
	São Pedro da Água Branca	14.338
	Vila Nova dos Martírios	10.362
	SOMA 2 (MA)	406.017
SOMA 1 + SOMA 2 (TO + MA)		482.844

Tabela 7.3 - Municípios afetados pela queda dos veículos com agentes tóxicos no Rio Tocantins.

Fonte: PINA, Mauricio. ANE, 2025.

A logística regional também sofreu um impacto negativo severo, com caminhões impossibilitados de seguir viagem pela rota original sendo forçados a realizar longos percursos alternativos para alcançar seus destinos. O DNIT divulgou rotas alternativas para travessia do Rio Tocantins em Imperatriz/MA, localizada cerca de aproximadamente 125 km ao norte de Estreito - MA, onde existe uma ponte que conecta os estados do Maranhão e Tocantins. Consequentemente, o que antes era uma simples travessia de uma margem à outra do Rio Tocantins agora exige um percurso de aproximadamente 250 km, representando um

aumento significativo nos custos operacionais, tempo de viagem e consumo de combustível para o transporte de cargas na região (PINA, 2025).

O impacto econômico do colapso se manifestou de forma imediata e abrangente na região assim em estabelecimentos comerciais como hotéis, restaurantes, lanchonetes e postos de combustíveis estão enfrentando prejuízos significativos com uma drástica redução do movimento. A interrupção do fluxo de veículos, especialmente caminhões que utilizavam a BR-226 como rota principal, criou um efeito dominó na economia local, afetando desde pequenos comerciantes até grandes empresas de transporte de cargas, sendo necessárias agora a utilização de balsas para baldeamento de cargas e pessoas entre as duas cidades.

7.3 ANÁLISE DAS POSSÍVEIS CAUSAS TÉCNICAS

A análise das causas técnicas do desabamento da ponte JK requer uma abordagem multifatorial, considerando que estruturas com mais de seis décadas de funcionamento adequado dificilmente apresentam falhas graves de projeto ou execução inicial. Conforme observado por Carvalho (2025), "uma ponte que funcionou durante quase 64 anos, não deveria possuir erro grave de projeto ou execução". Porém, considerando as intervenções realizadas ao longo do tempo, mostrou-se que a estrutura já havia demonstrado falhas estruturais com patologias e deformações excessivas, como demonstrava o Relatório Técnico do DNIT, em 2020.

O aumento significativo das cargas de tráfego representa um dos fatores mais críticos na análise do desabamento. As normas de ação móvel estabeleceram em 1960 um veículo tipo com carga de 300 kN, posteriormente elevado para 450 kN. Entretanto, atualmente circulam rodotrens com 74 tf e bitrens com 54 tf, gerando solicitações muito superiores às previstas originalmente (CARVALHO, 2025). Além disso, não há garantia alguma de que estes veículos não estarão presentes simultaneamente na ponte, agravando as solicitações estruturais.

A deterioração dos sistemas de protensão constituiu outro fator fundamental na ruptura. As evidências fotográficas como da figura 7.4 revelam que "grande parte da armadura de protensão não se rompeu (na seção), mas perdeu aderência ao concreto" (CARVALHO, 2025). A perda de aderência compromete significativamente a capacidade resistente da estrutura, especialmente em seções sujeitas a momentos fletores elevados no caso da ponte possuir um vão livre de 140m sem quaisquer pilares, o que aumenta o momento fletor a ser resistido. O sistema de reforço implementado em 1997 apresentava limitações críticas para resistir a determinados tipos de esforços, segundo Carvalho (2025), "na parte

superior, o reforço resiste aos momentos negativos; nas partes inclinadas, resiste ao cortante de flexão, mas para o cisalhamento de torção o reforço não é eficaz". Estas deficiências mostraram-se particularmente relevantes no mecanismo de falha observado.



Figura 7.4 - Imagem da ponte após sua ruptura, é possível ver os cabos de protensão sem indícios de ruptura por tração, com indício de perda de aderência dos cabos ao concreto.

Fonte: <https://www.linkedin.com/pulse/por-que-caiu-daniel-ferraz-130zf> .Acesso em julho/2025.

A análise das seções rompidas evidencia a predominância do cisalhamento por torção no colapso. Carvalho (2025) observa diferenças características entre as seções, onde "aparentemente a parte da esquerda há uma 'linha de ruptura' inclinada ao eixo longitudinal, enquanto na da direita a seção é quase normal ao eixo", confirmando que "o cisalhamento, principalmente, o devido à torção se fez presente" conforme proposto na figura 7.5.

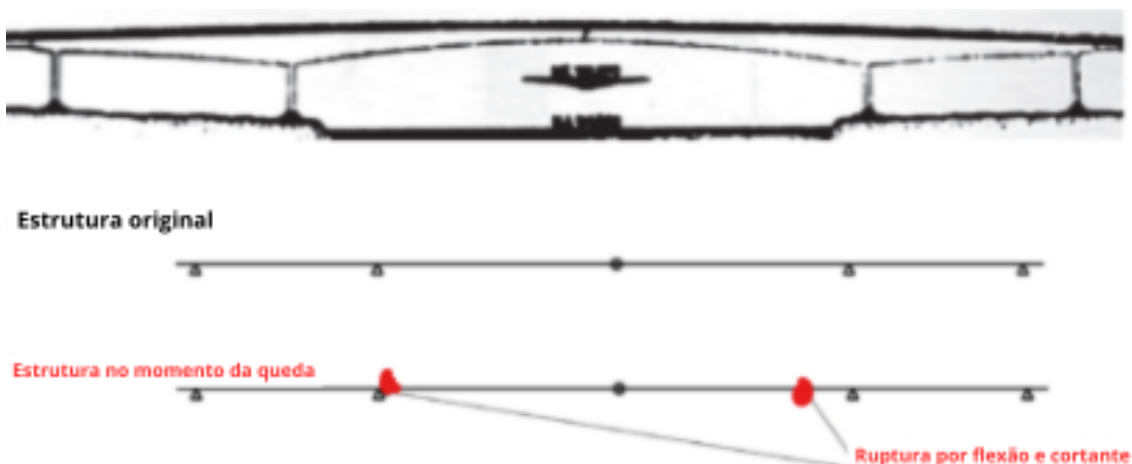


Figura 7.4 - Esquema de ruptura da estrutura da ponte e respectivos locais aproximados.

Fonte: CARVALHO, Roberto Chust. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025.

A inadequada manutenção da estrutura emergiu como fator contribuinte significativo tendo em vista que patologias associadas à corrosão e exposição de armadura longitudinal, e de protensão eram evidentes no relatório técnico, em DNIT, 2020. Estes fatores comprometeram seriamente a integridade estrutural ao longo do tempo. E tendo em vista alterações geométricas da ponte, incluindo como a "ampliação da seção", e alargamento das faixas de passeio, representaram outro elemento na análise da ruptura, justamente por conta que uma vez que modificações estruturais podem alterar significativamente o comportamento da estrutura em termos de redistribuição de esforços, podendo aliviar certos esforços e agravar outros a depender da disposição geométrica da estrutura (CARVALHO, 2025).

8. DIAGNÓSTICO TÉCNICO DA SITUAÇÃO PRÉ-COLAPSO

8.1 RESULTADOS DE ENSAIOS E MODELAGENS

Durante a elaboração do relatório para Anteprojeto de reforço da Ponte JK, foram feitos diversos ensaios, com funções específicas para determinação do comportamento estrutural que a ponte desenvolvia de acordo com ressonância de frequência de cargas, deformações e flambagem dos apoios e do tabuleiro. Sendo possível destacar que na época da elaboração do primeiro relatório técnico pelo DNIT, ainda não haviam tecnologias possíveis

de realizar modelação estrutural, sendo o primeiro a representar de forma assertiva as deformações da ponte em modelos computacionais feito apenas em 2020.

Com o objetivo de compreender o comportamento estrutural da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira e subsidiar a definição das intervenções de reforço, foram desenvolvidos dois modelos numéricos tridimensionais baseados no método dos elementos finitos, por meio do software CSiBridge v.15.2.0. O primeiro modelo abrangeu o trecho executado por balanços sucessivos, compreendido entre os pilares P5 e P8, enquanto o segundo correspondeu a parte do trecho de acesso, entre o encontro E1 e o pilar P4. Para ambos os modelos, os apoios foram considerados engastados ao nível dos blocos de fundação, e o módulo de elasticidade do concreto foi estimado com base em ensaios realizados in loco: 38,2 GPa para o segmento em balanço sucessivo e 27,1 GPa para o trecho em grelha (GEOSERV, 2020).

Nas figuras 8.1 e 8.2 podem ser vistos as extrações de testemunho para rompimento e determinação da resistência do concreto da ponte e a foto das amostras coletadas.



Figura 8.1 - À esquerda a extração de testemunhos do concreto da ponte e à direita o rompimento dos testemunhos por compressão simples para determinação do módulo de elasticidade e resistência do concreto da ponte.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.



Figura 8.2 - Vazio de concretagem identificado com extensão de 22cm X 4cm, P6-L.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

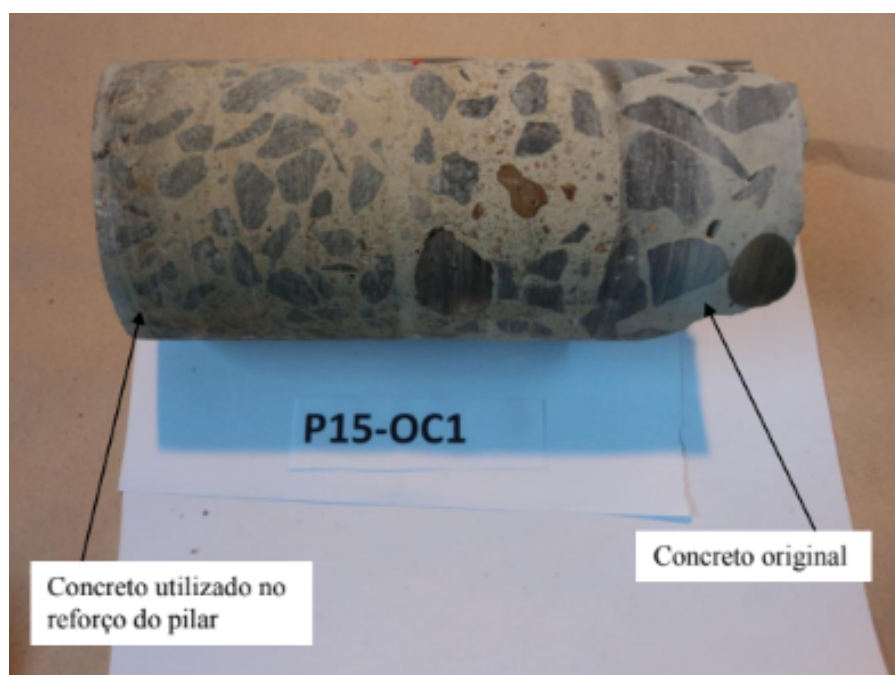


Figura 8.3 - Alteração da textura do concreto e do tipo de agregado no trecho do testemunho voltado para interior do elemento, P15-OC1.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

É perceptível pelas imagens dos corpos de provas retirados que a estrutura apresentava diversas patologias que afetavam negativamente a resistência da estrutura da ponte JK sobre o Rio Tocantins, como por exemplo a presença de vazios de concretagem dos pilares dos apoios que interferem nas distribuições internas dos esforços. Outro detalhe interessante a ser observado na figura 8.3 é a alteração da textura do concreto por conta do reforço realizado no pilar com aumento de seção, confirmando que houve uma necessidade de intervenção estrutural anteriormente, e mesmo com reforço estrutural executado a ponte ruuiu.

Região da ponte	CP	Módulo de elasticidade do concreto E_c (GPa)	Ruptura à compressão do concreto f_c (MPa)
P6	P6-B1	-	40,4
	P6-B2	46,1	53,7
P7	P7-L	47,4	52,8
	P7-B1	41,8	47,4
P8	P8-L	38,2	48,8
P15	P15-OC1	27,1	30,7
	P15-OC2	27,1	31,0
	P15-L	34,6	51,7
	P15-BL1M	31,8	31,7
	P15-BL1J	37,1	52,9
P16	P16-OC1	27,1	39,3
Tab E1-P1	L1-1	37,8	48,2
Tab P16-E2	L16-1	52,5	57,6

Tabela 8.4 - Resistência e módulo de elasticidade medidos nas amostras de concreto extraídas da Ponte sobre o Rio Tocantins, BR-226/BR-230.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

A resistência à compressão do concreto extraída da Ponte JK, mesmo após cerca de 50 anos de uso, apresentou valores expressivos, variando entre 30,7 MPa e 57,6 MPa, com médias elevadas nos elementos analisados, como 50,7 MPa nos pilares-lâmina e 52,9 MPa nos tabuleiros do trecho de acesso (GEOSERV, 2020). Esses dados indicam que o concreto em si mantinha boa qualidade, o que afasta a hipótese de que a ruptura da ponte tenha ocorrido por falha direta do material. No entanto, apesar da resistência ainda satisfatória, o colapso da estrutura foi resultado de um conjunto de fatores associados à degradação progressiva e às solicitações superiores às previstas no projeto original.

A análise dos resultados de resistência à compressão e dos módulos de elasticidade do concreto na Ponte JK revela significativa variação entre os trechos avaliados, evidenciando

ausência de uniformidade no desempenho estrutural do material. Os valores do módulo de elasticidade, por exemplo, oscilaram entre 27,1 GPa e 52,5 GPa, indicando que diferentes segmentos da estrutura apresentavam comportamentos mecânicos bastante distintos, possivelmente influenciados por fatores como envelhecimento desigual, intervenções parciais ao longo do tempo e condições ambientais específicas.

Esta dispersão de resultados de módulos de elasticidade diferentes visíveis na tabela 8.4, compromete a resposta global da estrutura frente às solicitações, especialmente em um sistema hiperestático e de grande vão, como o caso do trecho central da ponte com 140 metros. A não uniformidade na rigidez do concreto contribui para o surgimento de zonas de concentração de esforços, fissuras localizadas e perda gradual da capacidade resistente, agravando o risco de colapso, principalmente diante de sobrecargas e deteriorações acumuladas nos sistemas de protensão. Esses fatores reforçam que, embora o concreto ainda apresentasse em muitos pontos resistências elevadas, a falta de homogeneidade estrutural foi um elemento crítico no processo de falha progressiva da ponte.

Além das variações nos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade observadas ao longo da estrutura, que já indicam um comportamento não uniforme do concreto, a avaliação dinâmica da ponte ofereceu subsídios adicionais para compreender as reais condições de rigidez e desempenho estrutural. A comparação entre os resultados experimentais obtidos em campo e os dados gerados pelos modelos numéricos permite uma análise mais aprofundada do estado atual da estrutura, especialmente quanto às suas frequências naturais e deformadas modais. Essas informações são essenciais para validar o modelo computacional, identificar pontos frágeis e orientar medidas corretivas adequadas.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos revelou diferenças significativas nas frequências naturais da estrutura. Observou-se que, nos modos de vibração, os valores obtidos em campo foram inferiores aos calculados, indicando que a rigidez real da estrutura é menor do que a estimada inicialmente conforme resultado apresentado na figura 8.5. e o modelo calculado.

Modos de vibração	Frequência Natural (Hz)		Deformada modal
	Númérico	Experimental	
1	0,94	0,88	Flexão do tabuleiro no plano horizontal
2	0,97	0,98	Flexão do tabuleiro no plano longitudinal-vertical
3	1,89	1,76	Flexão dos pilares P5 e P6 no plano longitudinal-vertical
4	2,22	2,54	Flexão dos pilares P8 e P7 no plano longitudinal-vertical

Tabela 8.5 - Deformada modais calculadas no modelo numérico do trecho em caixão da Ponte sobre o Rio Tocantins.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

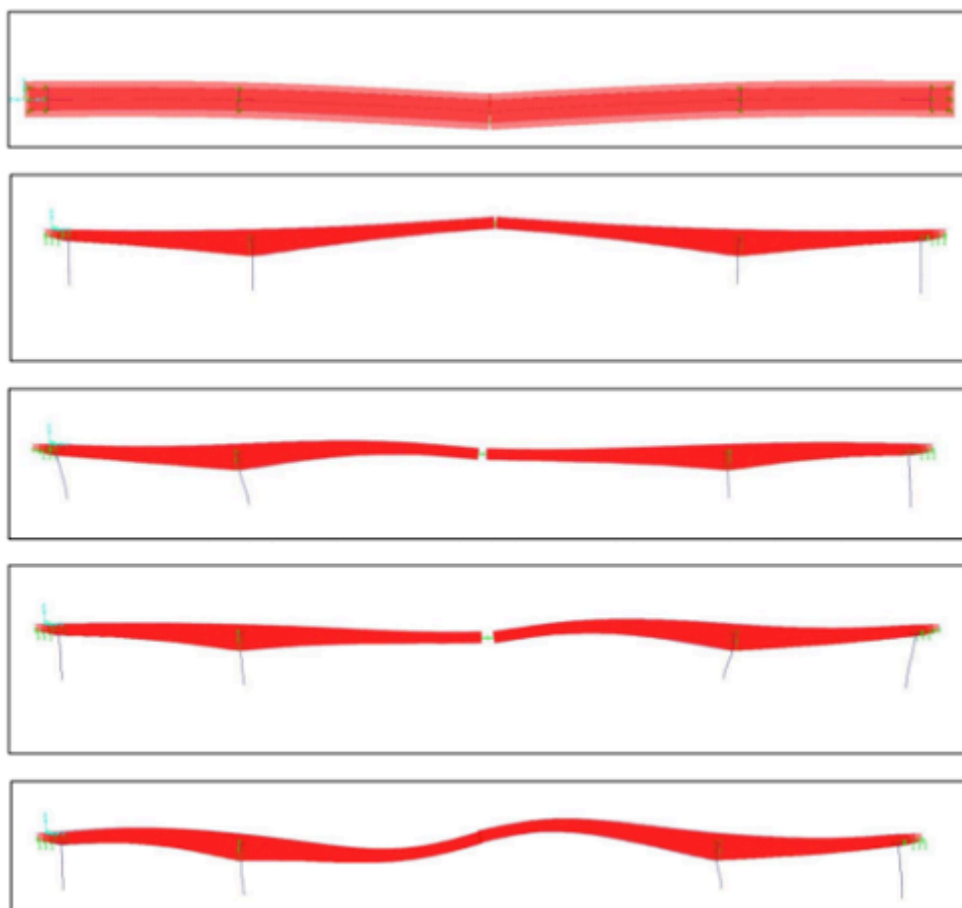


Figura 8.6 - Deformada modais modelados computacionalmente do trecho em caixão da Ponte sobre o Rio Tocantins.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Essa redução de rigidez é particularmente acentuada nos modos que envolvem flexão dos pilares P5 e P6, cujos danos visíveis, como fissuras, perda de cobrimento e presença de vazios internos, justificam tal comportamento. Nos modos 2 e 4, as frequências experimentais superaram levemente as calculadas, apontando menor discrepância nesses casos. Assim, recomendou-se a recuperação dos elementos danificados por meio de injeção de fissuras, preenchimento de vazios e reconstituição do cobrimento das armaduras, a fim de restaurar a rigidez e prolongar a vida útil da ponte (GEOSERV, 2020).

As deformadas modais calculadas também foram avaliadas e comparadas com as formas observadas experimentalmente, apresentando coerência geral com o comportamento vibratório medido. Ainda que próximas, as frequências obtidas para o trecho em vigas também se mostraram sistematicamente menores do que as previstas nos modelos, reforçando a necessidade de intervenções corretivas nos componentes estruturais, com foco na durabilidade e no desempenho estrutural global da obra.

8.2 AVALIAÇÃO DO GREIDE E DEFORMAÇÕES

A avaliação do greide da ponte revelou deformações significativas em relação ao traçado previsto em projeto, especialmente no vão central de 140 metros. As medições realizadas em campo por meio de levantamento topográfico indicaram que o greide encontrava-se rebaixado em até 70,6 cm em comparação ao valor projetado, com maior deslocamento registrado no meio do vão.

Além disso, foi observada uma assimetria marcante entre os apoios P6 e P7, com diferença de aproximadamente 28 cm nas cotas mais elevadas entre o dente central e esses apoios. Tal assimetria aponta para uma possível perda de eficiência estrutural e comportamento não uniforme ao longo do tabuleiro.

A modelagem numérica da estrutura, inicialmente sem considerar a atuação das protensões interna e externa, indicou uma flecha de 42,1 cm, inferior à observada em campo. Isso sugere que os cabos internos apresentam elevada perda por relaxação, já que foram produzidos com aço de relaxação normal uma categoria comum na época da construção.

Ao incluir no modelo as cargas permanentes, como o peso do pavimento de concreto de 40 cm e o da protensão externa, o deslocamento teórico subiu para 62,8 cm, ainda inferior ao deslocamento real estimado (GEOSERV, 2020). Tais discrepâncias reforçam a hipótese de perda também nos cabos externos, embora não existam registros das cargas aplicadas nesse reforço. Adicionalmente, identificaram-se irregularidades ao longo do tabuleiro, como reparos no revestimento asfáltico e variações na espessura das camadas que variavam de 5 a 16 cm, o que contribuiu para alterações no perfil longitudinal e impactou a durabilidade e funcionalidade da estrutura (GEOSERV, 2020).

Essa condição evidencia de certa forma uma flecha excessiva e um comportamento estrutural comprometido como pode ser visto na modelagem da figura 8.7 retirada do relatório técnico.

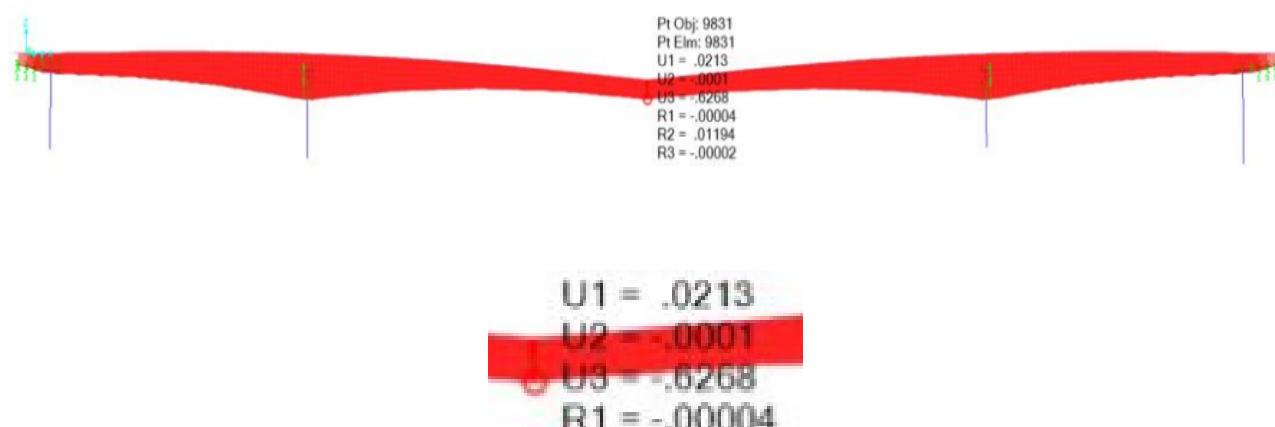


Figura 8.7 - Deslocamento calculado por modelagem computacional da estrutura com zoom do resultado indicado como “U3 = - 0,6268” que indica a deformação calculada de 62,68cm.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Como uma medida de recuperação estrutural foi implantado em 1999 na ponte sobre o Rio Tocantins, um sistema de reforço externo por protensão com cordoalhas ancoradas externamente ao tabuleiro da ponte. O objetivo dessa intervenção era compensar a perda de desempenho dos cabos de protensão originalmente embutidos no concreto, cuja eficiência foi severamente comprometida ao longo do tempo, que foi possível ver no relatório técnico de 1999 a exposição dos cabos de protensão originais da ponte, sem quaisquer avaliações registradas, da efetividade da resistência dos cabos de protensão e a gravidade da situação.

Em uma análise posterior, no entanto, indicou que esse reforço não se mostrou plenamente eficaz. A ausência de registros técnicos das tensões aplicadas nos novos cabos, somada à constatação de relaxação significativa tanto nos sistemas internos quanto externos, comprometeu a funcionalidade do conjunto estrutural.

A utilização de aço de relaxação normal (RN), à época da construção, contribuiu para a expressiva perda de tensão dos cabos embutidos, culminando em uma redução drástica da capacidade de carga da ponte (GEOSERV, 2020). A provável falha por perda de aderência dos cabos originais evidencia que a transferência de esforços ao concreto não ocorreu de forma adequada pode ter desencadeado o colapso progressivo da estrutura, fator que foi abordado por Roberto Chust Carvalho na revista Estrutura (2025).

Esse cenário revela a necessidade de inspeções periódicas e de intervenções baseadas em dados confiáveis de projeto, além da adoção de materiais mais duráveis e de protocolos de monitoramento pós-reforço.

8.3 RELEVÂNCIA DAS RECOMENDAÇÕES NÃO EXECUTADAS

Com base nas inspeções visuais detalhadas, nos levantamentos geométricos e nos resultados dos ensaios realizados na ponte BR-226/TO, identificaram-se diversas patologias estruturais que comprometem o desempenho e a segurança da obra. As manifestações patológicas observadas incluem fissuras, deslocamentos de cobrimento, armaduras expostas, degradação por corrosão, rupturas em elementos estruturais e anomalias no pavimento. Diante desse panorama, foram elaboradas recomendações técnicas específicas visando mitigar os danos identificados, restaurar a integridade estrutural e garantir a durabilidade da ponte.

Durante as inspeções visuais realizadas no vão principal da ponte e nos apoios P6 e P7, foram identificadas fissuras no cobrimento da protensão externa. Essas fissuras se concentraram no tirante de ancoragem do dente e nas bordas inferior e superior da seção do caixão. Tais manifestações patológicas indicam que a protensão externa executada no ano 2000 sofreu deformações nas regiões mais solicitadas, resultando na perda parcial da protensão. Notou-se ainda uma assimetria na elevação do greide entre os apoios P6 e P7, com um rebaixamento mais acentuado no trecho entre o meio do vão e o P6. Considerando a inviabilidade de reprotender o sistema externo atual, foi recomendada a introdução de uma nova protensão interna ao caixão, com a finalidade de restabelecer o equilíbrio de esforços nas seções críticas da ponte.

Outra recomendação relevante, diz respeito à ruptura do dente no vão principal da ponte onde foi constatado o fechamento das juntas na face superior e abertura na face inferior do dente, indicando rotação da seção transversal. Essa deformação está relacionada às flechas apontadas no levantamento do greide e decorre, em parte, da fadiga dos tirantes e de processos corrosivos nos cabos e armaduras verticais(GEOSERV, 2020). A inspeção visual também identificou danos significativos no dente, em especial na região de suspensão dos cabos, responsável pela absorção de cargas acidentais e parte da carga permanente. Diante disso, foi recomendado para a ponte a execução de ancoragens de protensão externa na parte inferior do caixão, no vão de 140 m, com o objetivo de restaurar a integridade da conexão inferior do dente e evitar sobrecargas adicionais na zona comprimida já comprometida (GEOSERV, 2020).

Outra avaliação do pavimento, revelou uma alta irregularidade e afloramento de armaduras em alguns trechos, comprometendo o conforto e a segurança dos usuários. Desde a substituição do pavimento de concreto por asfalto em 1998, a superfície passou a apresentar problemas recorrentes, conforme relatos locais.

Os ensaios dinâmicos realizados com veículo de prova instrumentado detectaram coeficientes de impacto elevados (coeficiente calculado para majoração de esforços de cargas móveis, que considera a movimentação e suspensão), atingia valores de 2,5 e 2,27 para velocidades de 60 km/h e 75 km/h (GEOSERV, 2020). Esses valores acentuados evidenciam os impactos oriundos das irregularidades no tabuleiro. Como solução, os redatores do relatório técnico recomendaram a remoção da camada asfáltica existente, que varia entre 5 cm e 15 cm de espessura, até a superfície do concreto, e a aplicação de uma nova camada de CBUQ com 7 cm.

Foram identificadas fissuras e rachaduras nos pilares de acesso e nos blocos de fundação, inclusive em áreas previamente reforçadas. Essas fissuras comprometem a durabilidade da estrutura, tornando necessário o tratamento imediato. A técnica recomendada consistia na injeção de resina epoxídica para selar as fissuras e restabelecer a integridade estrutural. O processo envolve a fixação de tubos plásticos ao longo das fissuras a cada 15 cm, verificação da comunicação entre os tubos com ar comprimido, injeção da resina de baixo para cima, e posterior limpeza e vedação da área.

Diversas áreas da ponte apresentaram deslocamento do cobrimento de concreto, com armaduras expostas e oxidadas, especialmente nos pilares-lâminas. A origem dessa patologia está associada ao cobrimento insuficiente de concreto e à ação de agentes agressivos, agravada pela inexistência dos projetos originais, o que dificulta a avaliação da perda de seção efetiva. Foi identificado, inclusive, que durante a extração de testemunhos, a água utilizada percolava pela estrutura, evidenciando vazios internos. Para recuperar essas regiões, é necessário remover todo o concreto solto ou deteriorado até alcançar material íntegro, limpar e tratar as armaduras com escovação mecânica e hidrojateamento, e aplicar uma camada de 15 mm de argamassa tixotrópica, restaurando a proteção das armaduras conforme indicação na figura 8.8.

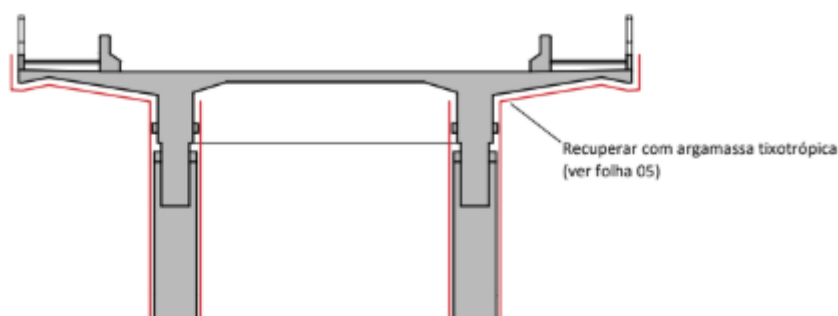


Figura 8.8 - Indicação em vermelho da aplicação de argamassa tixotrópica para recuperação dos cobrimentos de concreto da ponte sobre o Rio Tocantins.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Embora as recomendações técnicas aqui apresentadas fossem suficientes para mitigar os danos observados e prolongar a vida útil da estrutura, a ausência de intervenções efetivas em tempo hábil contribuiu para o colapso da ponte em dezembro de 2024. Esse desfecho trágico reforça a importância da adoção imediata de medidas corretivas quando manifestações patológicas são identificadas, além da necessidade de monitoramento contínuo e rigoroso. A ruína da ponte evidencia o impacto crítico da negligência na manutenção de obras de arte especiais e serve como alerta para que casos semelhantes sejam tratados com a devida urgência e responsabilidade técnica.

9. POSSÍVEIS AÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL

9.1 TÉCNICAS PROPOSTAS NO ANTEPROJETO

Diante do avançado estado de degradação da ponte sobre o Rio Tocantins, localizada nas rodovias BR-226/TO e BR-230/TO, foram propostas, no ano de 2020, intervenções específicas voltadas à reabilitação estrutural da obra. As soluções apresentadas no anteprojeto de recuperação buscavam recuperar a integridade e a funcionalidade da estrutura por meio da introdução de novos sistemas de protensão interna, devidamente planejados a partir de ensaios técnicos especializados.

A principal técnica de reforço recomendada consistia na implantação de novos cabos de protensão dentro do caixão da estrutura. A definição das forças a serem aplicadas nesses cabos dependeria da realização de ensaios de trepanação em pontos estratégicos do concreto, permitindo aferir as propriedades mecânicas residuais do material. Com base nesses dados,

seria elaborado um plano de faseamento para a aplicação da protensão, contendo a sequência das etapas construtivas, os valores das forças a serem aplicadas, além da previsão de deformações no tabuleiro (greide), nas armaduras e no concreto em cada fase.

Um dos principais desafios do reforço proposto estava relacionado à assimetria estrutural existente. A intervenção anterior, realizada em 1999, contemplou apenas a protensão externa aplicada nas paredes laterais do caixão. Isso resultou em distribuição desigual de esforços, especialmente em relação à parede central da seção bicelular. Para mitigar esse desequilíbrio e permitir uma redistribuição mais eficiente dos esforços, a nova proposta previa a introdução de protensão também no interior do caixão, buscando uma integralização mais eficaz da seção transversal.

Considerando a magnitude dos danos e o histórico de perda de protensão na estrutura, o plano de reforço previa a monitoração contínua durante cada fase da aplicação das forças. Tal controle seria fundamental para garantir a segurança durante o processo de recuperação e para validar, em tempo real, as hipóteses de projeto quanto às deformações e redistribuições internas de tensões.

O anteprojeto de recuperação e reforço da ponte sobre o Rio Tocantins, elaborado em 2020, estabeleceu uma metodologia executiva minuciosa, voltada à recuperação estrutural de pilares, tabuleiro e ao reforço por protensão externa complementar. Inicialmente, o plano previa a instalação de andaimes e plataformas de acesso às estruturas marginais, incluindo os encontros E1 e E2 e os pilares P1 a P4 e P9 a P16. Nesses pontos, seriam realizados os serviços de reforço e recuperação do concreto, conforme especificações projetuais. A face inferior do tabuleiro e dos balanços laterais seria igualmente tratada com técnicas específicas de recomposição e proteção superficial com argamassa tixotrópica conforme indicado na figura 9.1 (GEOSERV, 2020).

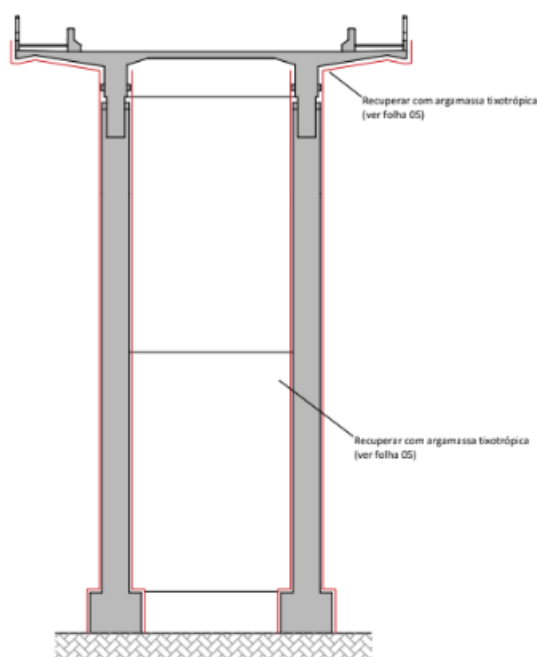


Figura 9.1 - Detalhe do perfil longitudinal de recuperação da camada de concreto com argamassa tixotrópica recomendada em destaque vermelho.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Além das intervenções locais, o reforço estrutural previa a implantação de protensão externa adicional, executada no interior do caixão da ponte. Para isso, seriam instalados 24 blocos de ancoragem e 52 blocos desviadores, permitindo o lançamento e ancoragem das cordoalhas. Caso necessário, seriam realizados furos nas transversinas internas para viabilizar a passagem dos cabos. Ainda dentro do caixão, estava também prevista a execução do engrossamento da laje inferior em 10 cm, com o objetivo de aumentar a rigidez da seção transversal e redistribuir os esforços atuantes (GEOSERV, 2020).

Na região do vão central da ponte, seria executado um reforço adicional por meio da instalação de dois blocos desviadores e cordoalhas na face inferior do caixão, na área do dente. Tais medidas buscavam complementar os esforços aplicados anteriormente nas paredes laterais em 1999, promovendo a integralização dos esforços nas células do tabuleiro e compensando as assimetrias estruturais observadas sendo possível ver o detalhe da disposição dos cabos e a indicação do engrossamento da laje na figura 9.2 (GEOSERV, 2020).

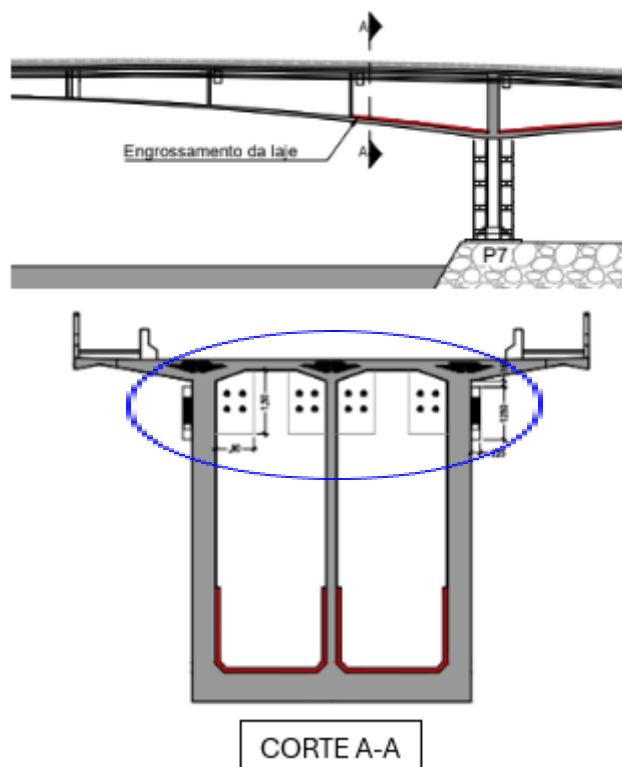


Figura 9.2 - Detalhe do perfil longitudinal ao entorno do P7 da ponte, onde mostra a disposição dos cabos de protensão interna com o engrossamento da laje mostrada em destaque vermelho e o reforço com concreto protendido interno em destaque azul.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Com a infraestrutura para o reforço montada, o projeto previa a determinação experimental das tensões atuantes nas armaduras da protensão externa existente, etapa essencial para garantir a compatibilidade com os novos esforços a serem aplicados. Com base nesses dados, seria elaborado um plano de faseamento da nova protensão, contemplando os deslocamentos do greide, forças esperadas nas armaduras e deformações do concreto. Também seria implementado um plano de instrumentação para monitorar o comportamento da estrutura durante e após a execução dos reforços, especialmente nas regiões críticas próximas ao vão central (GEOSERV, 2020).

Ao final das etapas, previa-se a execução de reparos nos acabamentos, substituição das juntas de dilatação, aplicação de nova camada de pavimento e a realização de ensaios dinâmicos para validação da estrutura reforçada. Esses ensaios tinham como finalidade homologar o desempenho da ponte pós-reforço, conferindo segurança e confiabilidade ao sistema estrutural restaurado (GEOSERV, 2020).

Com base no anteprojeto de recuperação elaborado pela GEOSERV (2020), foram adotadas diversas técnicas de reforço e reparo na infraestrutura da ponte, especialmente nos blocos de fundação com danos evidentes. As ações incluíram desde a limpeza das superfícies com hidrojateamento em alta pressão até a recomposição das armaduras danificadas, utilizando resina epoxídica para fixação das ferragens em furos previamente executados no concreto.

Após a montagem das formas, procedeu-se à concretagem dos trechos comprometidos, restabelecendo a integridade estrutural dos blocos com arestas degradadas conforme indicado nas figuras 9.3 de como deveria ser realizado o reforço e reparo dos blocos da ponte.

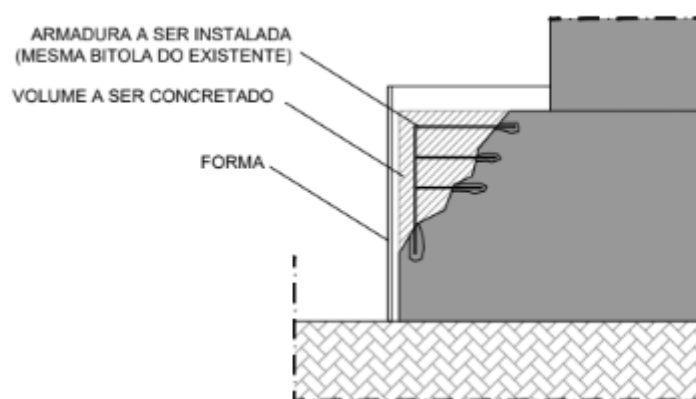


Figura 9.3 - Detalhe da seção transversal do bloco a ser reforçado com indicações das formas, volume concretado e armaduras instaladas.

Fonte: GEOSERV. DNIT, 2020.

Nos casos de blocos com armadura exposta ou degradação superficial, o tratamento consistia no apicoamento da superfície danificada, seguido de nova limpeza e aplicação de argamassa tixotrópica (como o Sika Top 122 ou similar), com espessura de aproximadamente 1,5 cm. Já para o tratamento de fissuras, o procedimento envolvia desde a abertura em forma de “V” ao longo das trincas até a selagem com resina epóxi injetada por bicos específicos, garantindo o preenchimento adequado das discontinuidades internas e a proteção contra o avanço de agentes agressivos.

Essas medidas buscavam conter o processo de degradação já avançado em diversos pontos da infraestrutura da ponte. No entanto, apesar dos estudos para técnicas de reforço e reparo estrutural da ponte, a ponte sobre o Rio Tocantins colapsou em dezembro de 2024,

evidenciando a gravidade dos danos acumulados e a necessidade de estratégias mais eficazes e contínuas de manutenção preventiva em obras de arte especiais (GEOSERV, 2020).

9.2 ALTERNATIVAS BASEADAS EM CASOS SEMELHANTES

Com base no caso da Ponte dos Remédios, localizada na cidade de São Paulo, é possível identificar alternativas relevantes e aplicáveis a obras com características semelhantes às da ponte que ruiu em dezembro de 2024. A estrutura paulista, também executada em balanços sucessivos com trechos em vigas e caixões protendidos, passou por um episódio crítico em junho de 1997, quando apresentou uma rachadura de 15 cm em um dos apoios (SANTOS et al., 2001).

A Ponte dos Remédios foi executada pelo Departamento de Estradas de Rodagem da CEA (DER-CEA) entre os anos de 1967 e 1968. A travessia apresenta esconsidade em relação ao rio Tietê, estendendo-se também sobre as vias marginais situadas em ambas as margens. A configuração estrutural é composta por duas obras independentes denominadas Ponte Norte e Ponte Sul separadas por um canteiro central, resultando em uma largura total de aproximadamente 24 metros (SANTOS et al., 2001).

Cada ponte apresenta as seguintes características estruturais principais: no trecho de acesso do lado de Osasco, há três vãos isostáticos de 30 metros cada, compostos por estrutura em grelha formada por quatro vigas protendidas, com altura estrutural de 2,50 metros. O trecho principal é formado por dois caixões celulares fechados de seção variável, com protensão longitudinal, dimensionados para vencer três vãos contínuos, sendo dois laterais de 73 metros e um central de 96 metros, assim apresentando uma altura da viga caixão que varia de 2,50 metros nas extremidades e no meio do vão central sobre o rio até 6,00 metros nos apoios intermediários (SANTOS et al., 2001).

Na data de 3 de junho de 1997, uma grande deformação na Ponte dos Remedios, foi observada por um funcionário da prefeitura que, por seguinte contatou os órgãos responsáveis, assim iniciando sua intervenção com a interdição da ponte, os mecanismos de ruptura haviam iniciados na estrutura, sendo percebidos 3 rótulas plásticas, uma no apoio intermediário antes do vão central que possuía uma abertura de 15cm e outras duas nos terços dos vãos a jusante deste apoio sendo possível ver na figura 9.4 e 9.5. (SANTOS et al., 2001).

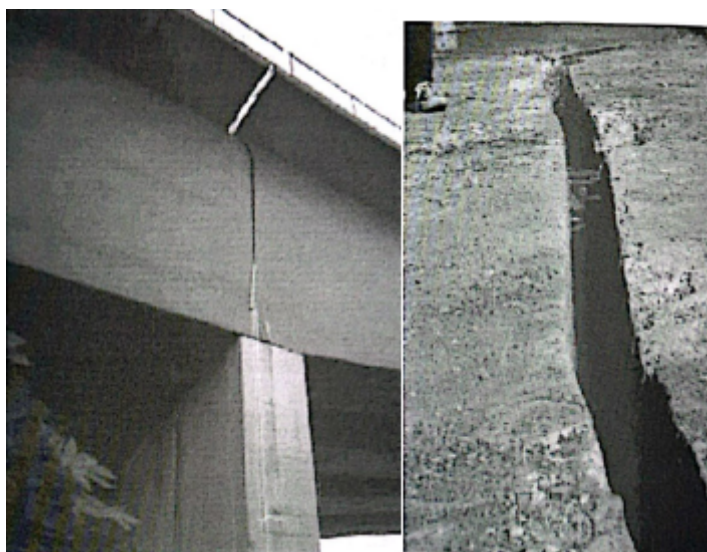


Figura 9.4 - Rachadura que apareceu na estrutura da Ponte dos Remédios - SP, à esquerda a perspectiva externa abaixo da rachadura e à direita uma perspectiva por cima da rachadura.

Fonte: CUNHA, Albino Joaquim Pimenta da; LIMA, Nelson Araújo; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. 2001.

As análises preliminares apontaram como causas principais a degradação dos cabos de protensão, a corrosão acelerada por infiltrações de água, o relaxamento das cordoalhas e a sobrecarga proveniente de alterações no uso e tráfego da ponte.

A limitada durabilidade observada em diversas obras de concreto protendido executadas na mesma época da construção da Ponte dos Remédios está diretamente associada às restrições tecnológicas vigentes no período. Atualmente, é amplamente reconhecido que o aço de protensão empregado na obra que é classificado como aço duro CP 140/160, não passava por um processo de alívio de tensões, apresentando, portanto, perdas por relaxação significativamente superiores às previstas nos cálculos de projeto(SANTOS et al., 2001).

Além disso, as bainhas confeccionadas em folha de flandres não asseguravam vedação adequada durante a concretagem, favorecendo a entrada de umidade e aumentando o atrito interno, o que reduzia a eficiência da protensão. Soma-se a isso o fato de que as injeções de nata de cimento, que eram realizadas por bombeamento manual, não garantiam aderência satisfatória das armaduras nem proporcionavam proteção efetiva contra corrosão, fatores que, em conjunto, comprometeram o desempenho e a vida útil da estrutura.

A situação exigiu fechamento imediato para evitar a evolução das falhas e proteger os usuários, uma ação fundamental para impedir um desastre de grandes proporções, que também deveria ser realizado na Ponte JK, sobre o Rio Tocantins.

Seguindo com a intervenção, após a estabilização emergencial da estrutura, obtida por meio do escoramento dos vãos localizados sobre as vias marginais e da execução da primeira etapa de protensão na laje, foi possível restabelecer o tráfego nas pistas marginais e proceder a uma vistoria minuciosa para registro de todas as anomalias decorrentes do processo de degradação. Com base nessa inspeção, realizaram-se análises detalhadas comparando os esforços solicitantes finais e a capacidade resistente residual da estrutura.

Constatada a viabilidade técnica de restabelecer integralmente os parâmetros de segurança e funcionalidade, definiu-se um plano de intervenção estrutural que incluiu: grauteamento e injeção das trincas identificadas; a aplicação de uma segunda protensão nos cabos situados no apoio Ap-6; e também execução de reforço estrutural mediante instalação de cabos complementares de protensão ao longo de todo o tabuleiro do trecho principal. Assim visando recompor as perdas acumuladas na estrutura ao longo de aproximadamente três décadas de serviço como pode ser visto no esquema apresentado na figura 9.5 o esquema do reforço realizado.

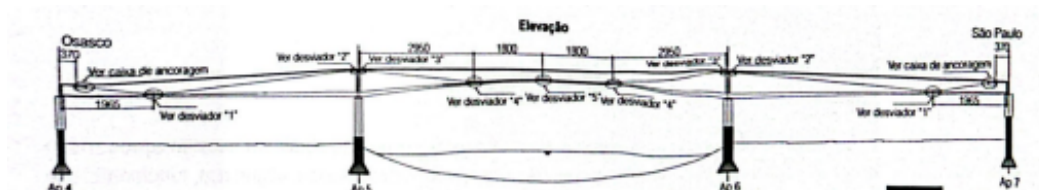


Figura 9.5 - Esquema longitudinal da protensão de Reforço na Ponte dos Remédios com indicação do cabos de protensão e as caixas de ancoragem.

Fonte: CUNHA, Albino Joaquim Pimenta da; LIMA, Nelson Araújo; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. 2001.

Esses cabos, constituídos por 10 cordoalhas de aço CP-190RB-15,2 mm, foram instalados internamente aos caixões celulares, com execução de ancoragens e desviadores conforme os detalhes e especificações técnicas definidos em projeto, garantindo o atendimento aos requisitos de desempenho e durabilidade (SANTOS et al., 2001).

Por fim, as intervenções complementares incluíram a restauração das vigas do vão de 30 metros localizado no lado de Osasco, que apresentavam ruptura por compressão, bem

como a correção de anomalias pontuais, tais como armaduras expostas no interior dos caixões, ajuste ou substituição dos aparelhos de apoio nos vãos de acesso e reinjeção dos cabos de protensão originais. Foi também executado um pavimento alteado em concreto estrutural de alto desempenho, com adição de microsilica, incorporado à laje do tabuleiro por meio de colmeias de concreto celular, solução que proporcionou aumento da durabilidade e melhoria da capacidade resistente da superfície de rolamento (SANTOS et al., 2001).

Dada a gravidade das patologias identificadas e o risco iminente de colapso que a estrutura havia enfrentado, considerou-se imprescindível comprovar de forma objetiva e transparente a eficácia do programa de recuperação. Para isso, foram realizados ensaios de carga versus deformação, conduzidos até o limite máximo de carregamento móvel para o qual a ponte havia sido originalmente projetada. Com o objetivo de reproduzir as solicitações mais críticas previstas em projeto, foram efetuados seis carregamentos sequenciais no tabuleiro do trecho principal, considerado a porção mais sensível da estrutura, possibilitando a verificação in loco do desempenho após a reabilitação (SANTOS et al., 2001).

10. CONSIDERAÇÕES SOBRE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO EM INFRAESTRUTURA VIÁRIA NO BRASIL

10.1 CONTEXTO NACIONAL DAS OAES

Nas últimas décadas, o cenário da manutenção de Obras de Arte Especiais (OAEs) no Brasil tem evidenciado um déficit estrutural significativo, marcado por falhas recorrentes em fiscalização, ausência de programas sistemáticos de manutenção preventiva e insuficiência de recursos destinados à conservação. O caso da Ponte JK ilustra de forma contundente esse quadro, revelando como a combinação de sobrecarga não fiscalizada, degradação progressiva e ausência de inspeções periódicas pode acelerar o processo de deterioração estrutural, aumentando o risco de falhas graves.

O modelo logístico brasileiro, que depende muito do modal rodoviário, resulta em uma sobrecarga tanto no peso das cargas transportadas quanto na intensidade do tráfego nas rodovias. Porém a rede ferroviária nacional, que possui uma extensão aproximada de 30 mil quilômetros, é insuficiente para atender às demandas de transporte de cargas de grande volume ou peso e de longas distâncias, que, tecnicamente, seriam mais adequadas a esse modal. Como consequência, tais cargas acabam sendo deslocadas por rodovias, intensificando o desgaste da infraestrutura viária.

Segundo dados levantados do Banco de Dados das Pontes Brasileiras (BDPB) indicam que o país possui aproximadamente 113.168 pontes e em sua maioria, a idade média da estruturas dessas OAE's são elevadas, com cerca de 70% das pontes em rodovias brasileiras possuindo mais de 30 anos, conforme apontado pela ANE, que cita Mendes (2009 apud DRUN; SOUZA, 2018).

Esse fator, quando associado à ausência de políticas consistentes de manutenção preventiva e a inexistência de um sistema nacional sistemático de pesagem de eixos de veículos, sendo presente apenas de forma pontual em rodovias concessionadas uma realidade que se repete em grande parte da malha rodoviária nacional. Com isso contribui para o surgimento e agravamento de patologias estruturais, manifestadas por fissuração devido a esforços de flexão, esmagamento, cisalhamento, torção e tração por conta de sobrecarga das Obras de Artes Especiais, espalhadas pelo Brasil (MASCARENHAS et al., 2019).

Outro aspecto crítico é a defasagem entre os parâmetros de projeto originais e as solicitações impostas pelo tráfego atual. Mendes (2009) identificou, em análise de 5.620 pontes em rodovias brasileiras, que aproximadamente 90% foram dimensionadas para trens-tipo de 240 kN e 360 kN, enquanto menos de 10% consideraram o trem-tipo de 450 kN. Tal discrepância é incompatível com a circulação de veículos pesados, especialmente aqueles utilizados no transporte de grãos, cuja carga excede em muito as capacidades previstas nas concepções estruturais originais, sendo evidenciado na tabela 10.1 as diferenças do peso permitido e o peso real medido em uma pesquisa realizada na rodovia PE-090 por Lapenda (2020).

TIPO DE EIXO	CARGA MÁXIMA PERMITIDA (t)	CARGA CONSTATADA (t)
ESRS	6,0	18,8
ESRD	10,0	22,5
ETD	17,0	29,9
ETT	25,5	41,8

Tabela 10.1 - Cargas máximas permitidas e cargas constatadas na rodovia PE-090, entre Surubim e Toritama (ESRS= eixo simples de rodas simples; ESRD= eixo simples de rodas duplas; ETD= eixo tandem duplo; ETT= eixo tandem triplo).

Fonte: PINA, Mauricio. ANE, 2025

10.2 LIÇÕES APRENDIDAS A PARTIR DO CASO

O colapso e as intervenções emergenciais observadas no caso da Ponte JK oferecem um conjunto de lições estratégicas para a engenharia nacional. Primeiramente, evidencia-se a necessidade de planos de manutenção preventiva e corretiva baseados em inspeções técnicas regulares, com critérios objetivos de priorização de obras críticas.

Em segundo lugar, reforça-se a importância de uma governança eficiente, com definição clara de responsabilidades institucionais e disponibilidade orçamentária para intervenções tempestivas. Por fim, destaca-se que a gestão adequada das OAEs exige não apenas a aplicação de tecnologias de monitoramento e reforço estrutural, mas também uma política pública de longo prazo voltada à preservação da infraestrutura e à mitigação de riscos associados ao envelhecimento das estruturas.

O cenário nacional evidencia que a ausência de um planejamento robusto de manutenção compromete diretamente a vida útil das OAEs. No caso da Ponte JK, a inexistência de um programa contínuo de inspeção e intervenção preventiva resultou na progressão das patologias, que poderiam ter sido contidas com ações antecipadas. Esse quadro revela não apenas uma deficiência técnica, mas também a descontinuidade administrativa e a falta de integração entre órgãos responsáveis, sendo fatores que comprometem a efetividade das políticas públicas.

Outro ponto crítico é a fragilidade na fiscalização de cargas, que sobrecarrega as estruturas muito além de seus parâmetros originais de projeto. Embora a legislação brasileira preveja limites e mecanismos de controle, como o uso de balanças rodoviárias, a baixa aplicação prática e a falta de manutenção desses equipamentos anulam a eficácia da norma. Esse descompasso entre o que está previsto e o que é efetivamente executado agrava o desgaste prematuro das pontes e viadutos.

A lição deixada pelo colapso da Ponte JK vai além da recuperação física de uma obra de arte especial. Trata-se de um alerta para que a engenharia nacional adote uma postura mais proativa, ancorada em diagnósticos precisos, inspeções regulares e estratégias de reforço oportunas, como ocorreu em casos bem-sucedidos, a exemplo da Ponte dos Remédios. A experiência mostra que o custo da prevenção é significativamente menor do que o da reconstrução após uma tragédia, tanto em termos econômicos quanto humanos.

11. CONCLUSÕES FINAIS DO ESTUDO DE CASO

Diante do material exposto e apresentado no presente trabalho, pode-se iniciar a conclusão, abordando questões normativas e de projeto, tendo em vista que a necessidade de reforço estrutural em edificações é motivada por múltiplos fatores, tendo como bases diretrizes técnicas de estados limites de serviço e estados limites últimos estabelecidas por normas como a ABNT NBR 15575-2, NBR 8681, NBR 6118, NBR 9062 e NBR 8800, que se apresentam como instrumentos essenciais para orientar a concepção e execução de reforços estruturais.

E tendo como concepção do reforço estrutural em concreto armado, o estudo e a percepção de patologias estruturais oriundas sejam elas de sobrecarga, corrosão de armaduras, falta de manutenção preventiva, falhas construtivas e intervenções inadequadas impõem novas demandas estruturais a sistemas originalmente concebidos para condições distintas durante cálculo de projeto. Tal cenário reforça a importância de que as intervenções de reforço sejam concebidas com base em diagnóstico preciso, projeto detalhado e execução conforme as recomendações normativas, garantindo segurança, durabilidade e desempenho funcional da estrutura.

Ferreira (2014) destaca que, embora inexistam normas específicas exclusivas para reforço, tais documentos oferecem parâmetros fundamentais para assegurar o desempenho estrutural seguro e confortável. O alinhamento entre diagnóstico técnico, parâmetros normativos e estudo de materiais e técnicas de reforço estrutural em concreto armado é determinante para a eficácia das soluções aplicadas, especialmente diante da diversidade de patologias e exigências de adaptação que surgem ao longo da vida útil das edificações.

Levando em conta que abordando questões normativas e de projeto, tendo em vista que as intervenções estruturais exigem compreensão aprofundada de conceitos como vida útil e desempenho das edificações. A preservação dessa vida útil depende diretamente da qualidade dos materiais empregados, do controle de execução e de fatores externos, como a ação das intempéries, reforçando a importância de especificações adequadas e monitoramento contínuo.

Considerando o desempenho das estruturas, erros construtivos como a redução da espessura de cobrimento ou da seção dos elementos estruturais, podem comprometer e reduzir a capacidade de atendimento às exigências normativas. Além disso, usos inadequados da edificação, sobrecargas não previstas e ausência de manutenção preventiva aceleram a degradação, demandando intervenções de maior complexidade.

Assim, a seriedade das intervenções estruturais reside não apenas na sua execução técnica, mas também na sua função estratégica de preservação da integridade e funcionalidade das construções. A correta compreensão e aplicação dos conceitos abordados neste trabalho são essenciais para fundamentar projetos de reforço, garantindo que as soluções adotadas sejam tecnicamente adequadas, e alinhadas com as exigências de segurança e durabilidade previstas nas normas vigentes.

As soluções analisadas neste trabalho como uso de materiais compósitos, aumento de seção com concreto de alto desempenho e aplicação de elementos metálicos representam abordagens consolidadas e tecnicamente viáveis para recuperação e incremento de capacidade resistente em estruturas de concreto armado.

O emprego de materiais compósitos, como fibras de carbono, fibras de vidro e resinas epóxi, conforme discutido por Beber (2003) e Barros (2004), trouxe significativa versatilidade às intervenções.

No contexto do estudo de caso da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, tais materiais poderiam ter sido utilizados para conter processos de fissuração, aumentar a rigidez local e retardar a progressão de danos estruturais, especialmente em áreas de difícil acesso ou com restrição de cargas adicionais.

O aumento de seção com concreto de alto desempenho, aliado à técnica de encamisamento, é uma solução robusta para elementos comprimidos ou com deficiência de rigidez. A aplicação dessa técnica, com adição de novas armaduras e concreto de melhor desempenho, teria sido uma alternativa eficaz para recuperação das zonas críticas da ponte, apesar de já ter sido utilizado durante sua primeira intervenção estrutural, seu uso poderia ter sido feito novamente nos pilares e seções deterioradas pela ação combinada de corrosão e sobrecarga.

A aplicação de elementos metálicos, colados ou fixados mecanicamente, poderia, no caso da Ponte JK, ter sido empregada como reforço preventivo nas vigas longitudinais e nas transversinas, funcionando como medida provisória até a execução de intervenções estruturais mais abrangentes.

A integração dessas técnicas evidencia que intervenções estruturais não devem ser pensadas de forma isolada, mas como um conjunto de estratégias complementares. O estudo de caso reforça que, diante de sinais claros de degradação, a aplicação combinada de métodos como por exemplo, o uso de compósitos para regiões específicas, encamisamento em elementos comprimidos e reforço metálico em pontos críticos, poderia ter prolongado a vida útil da ponte, evitado o colapso e reduzido riscos à segurança pública.

Essa abordagem integrada, associada a um programa de inspeções periódicas e manutenção preventiva, constitui o caminho mais eficiente para preservar a integridade e o desempenho de estruturas de concreto armado no longo prazo.

O caso da Ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, desde a década de 1990, relatórios técnicos, como o elaborado pela ENGESPRO ENGENHARIA LTDA, já apontavam patologias significativas, incluindo o comprometimento de cerca de 30% do pavimento e danos em elementos estruturais, que exigiam reforço imediato.

As primeiras intervenções, realizadas entre 1995 e 1998, incluíram inspeções detalhadas e, em 1997, a aplicação de reforço estrutural por meio esforços externos de compressão por meio de protensão com cordoalhas de aço de alta resistência, ancoradas externamente ao tabuleiro.

Entretanto, inspeções posteriores evidenciaram que a solução não foi plenamente efetiva. Patologias como deslocamento de revestimento, fissuração nos topos de pilares octogonais, inclinações visíveis em elementos de reforço, fissuras extensas em blocos de fundação e exposição de armaduras comprometiam a segurança global da ponte.

O caso da Ponte dos Remédios, situada em São Paulo, serve como referência prática para a definição de estratégias de reforço e recuperação aplicáveis a obras com tipologia estrutural semelhante à ponte que colapsou em dezembro de 2024.

Frente ao risco iminente, optou-se pela interdição imediata da ponte, evitando-se a progressão das patologias e prevenindo um colapso de grandes proporções, sendo realizado um reforço com estudos técnicos sobre os esforços atuantes e as patologias consequentes do caminho dos esforços, e por fim a intervenção e estratégia adequada para reforço e reabilitação da estrutura da ponte. Essa ação preventiva e corretiva mostrou-se crucial e serve como exemplo do que deveria ter sido executado, em tempo hábil, na Ponte Juscelino Kubitschek, antes de seu trágico colapso.

A tragédia ocorrida na Ponte JK, é um retrato que pode se repetir em outras obras, caso não seja levado em conta as questões abordadas neste presente trabalho, apesar de não possuir estudos de metodologias de cálculo, ou de novos materiais, a abordagem técnica serve para o incentivo de estudos na área de reforço estrutural em concreto armado, e por fim a conscientização da comunidade acadêmica, assim trazendo um olhar técnico demonstrando a gravidade da negligência de manutenção, reparo e reforço para reabilitação de estruturas já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998.

JORNADAS DE ENGENHARIA CIVIL 2004 – NOVOS DESAFIOS, Guimarães, 2004 - “Jornadas de Engenharia Civil 2004 – Novos Desafios”. Guimarães. : Finalistas do curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 2004.

MACHADO, A. d. P. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. São Paulo: PINI, 2002.

REIS, A. P. A. Reforço de Vigas de Concreto Armado por meio de Barras de Aço Adicionais ou Chapas de Aço e Argamassa de Alto Desempenho. 1998. 239f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

TAKEUTI, A. R. Reforço de Pilares de Concreto Armado por meio de Encamisamento com Concreto de Alto Desempenho. 1999. 205f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CÁNOVAS, M.F.(1988). Patologia e Terapia do Concreto Armado. São Paulo, Pini.

FERREIRA, D. B.; GOMES, R. B.; CARVALHO, A. L. Análise experimental de pilares de concreto armado, reforçados com concreto auto adensável e conectores (DOI: 10.5216/reec.v8i2.27295). REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 8, n. 2, 2014. DOI: 10.5216/reec.v8i2.27295.

MACHADO, A. P. Fibras de Carbono: Manual Prático de Dimensionamento. BASF -- The Chemical Company Carbono, 2006.

BARROS, Joaquim AO. Materiais compósitos no reforço de estruturas. 2004.

CHASTRE, Carlos. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão-potencialidade e limitações. In: REHABEND 2014-Congresso Latinoamericano" Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio". Santander. 10p. 2014.

MOURA, Michael Martins de. Reforço estrutural em estruturas de concreto armado. 2013.

BACCIN, A. G. C. (1998). Fundamentos do concreto alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares. 176p., Dissertação de Mestrado, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Composite Materials, v. 04, n.1, p.73-85.

VALLE, E.G. (1983). Estruturas de hormigón armado: refuerzo mediante hormigón y estructura metálica. In: Curso de rehabilitación: 5. La Estructura. Madrid, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. p.173-179.

ZANATO, G. A. ; CAMPOS FILHO, A. ; CAMPAGNOLO, J. L. (1998). Pilares esbeltos de concreto armado reforçados: estudo teórico e experimental In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DANIFICADAS, 1., Rio de Janeiro. 1998. Anais (CD-ROM). Rio de Janeiro, UFF/UCL.

RIGAZZO, A. O. Reforço de pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas – SP, 2003.

VASCONCELOS A, C. Pontes brasileiras, viadutos e passarelas notáveis, 2ª edição(São Paulo 2012).

GRIZOTTI, Gustavo Henrique. Análise do método construtivo por balanços sucessivos aplicado à construção de pontes. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Facvest – Unifacvest, Lages, 2020.

CARVALHO, Roberto Chust. Análise sobre a queda da ponte JK. Revista Estrutura, p. 44-51, 2025.

PINA, Mauricio. Posicionamento sobre a necessidade da manutenção das obras de arte especiais nas rodovias brasileiras. Brasília: ANE, 2025.

MACIEL, R. et al. Banco de Dados das Pontes Brasileiras – Levantamento e Análise Inicial. São Paulo: IPT, 2021.

GEOSERV. Anteprojeto de recuperação, reforço e reabilitação de OAE sobre o Rio Tocantins, nas rodovias BR-226/TO e BR-230/TO. Brasília: DNIT, 2020.

MASCARENHAS, F. et al. Patologias em pontes de concreto: causas e mecanismos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 5, p. 890-907, 2019.

LAPENDA, R. et al. Estudo do excesso de peso no transporte rodoviário e seus impactos estruturais. Recife: UFPE, 2020.

EPL – Empresa de Planejamento e Logística. Relatório da Matriz de Transporte Brasileira. Brasília: EPL, 2018.

SANTOS, Lenivaldo Aguiar dos; SCHIROS, Luciano Mario; SILVA, Humberto Caminha da; FARINELLI, Walter. Recuperação e reforço da Ponte dos Remédios Este-Reestrutura Engenharia Ltda. e Tecpont Engenharia de Projetos S/C Ltda. In: CUNHA, Albino Joaquim

Pimenta da; LIMA, Nelson Araújo; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. Acidentes estruturais na construção civil. Volume 2. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187:2022 – Projeto de Pontes de Concreto Armado e Protendido – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452:2019 – Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 010/2004 – PRO: Procedimento para Inspeção de Pontes Rodoviárias de Concreto. Brasília: DNIT, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais. Brasília: DNIT, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Reabilitação de Obras de Arte Especiais. Brasília: DNIT, 2017.

BERTINI, A. A.(org.) et. al. Desempenho de edificações habitacionais : guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013, 300 p.

THOMAZ, E. C. S. Notas de aula. Pontes em balanço sucessivo – Ponte em balanços sucessivos – Eng. Emílio Baumgart. IME – Instituto Militar de Engenharia. 2010.

ACI 440R-96, 1996 - State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures, reported by ACI Committee 440, Manual prático de betão, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 68 p.

ACI Committee 440, 2002 - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, ACI Committee 440, 118 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 363:1991 – Report on High-Strength Concrete. Detroit, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1994). ACI 318/1992 - Building Code Requirements for Reinforced Concrete (revised 1992). Detroit, ACI.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 544, (1987). Measurements of properties of fiber reinforced concrete - ACI Manual of Concrete Practice, v.5, Detroit, (ACI 544.2R-86).

COMMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB (1983), Assessment of concrete structures and design procedures for upgrading (redesign), Bulletin d'Information no. 162.

COMMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB(1983), Response of critical regions under large amplitude reserved action. Bulletin d'Information no 161.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas pré-moldadas de concreto. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5629: Projeto e execução de tirantes ancorados no terreno – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.