Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR RP – 029

ESTUDO PARA DEFINIÇÃO DAS TIPOLOGIAS E CARACTERÍSTICAS DAS PONTES A SEREM CONSIDERADAS NO CATÁLOGO

BRASÍLIA/DF
OUTUBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA-GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA

INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 029

ESTUDO PARA DEFINIÇÃO DAS TIPOLOGIAS E CARACTERÍSTICAS DAS PONTES A SEREM CONSIDERADAS NO CATÁLOGO

Elaboração: Universidade Federal de Viçosa

Contrato: TED nº 703/2020

Processo: SEI n° 50600.017752/2026-66

DOI: 10.70859/IPR-RP-029/2026

Brasília/DF

Outubro/2026

EQUIPE TÉCNICA:

Eng.º Diôgo Silva de Oliveira, D.Sc. – DEC/UFV

Eng.ª Carol Ferreira Rezende Santos, D.Sc. – DEC/UFV

Eng.º José Carlos Lopes Ribeiro, D.Sc. – DEC/UFV

Eng.º Kléos Magalhães Lenz Cesar Júnior, Ph.D. – DEC/UFV

Eng.º José Maria Franco de Carvalho, D.Sc. – DEC/UFV

Eng.º Bruno Souza Borges, M.Sc. – DEC/UFV

Eng.ª Letícia Negris Gardioli, M.Sc – DEC/UFV

Eng.º Álvaro Carneiro Coelho, M.Sc. – DEC/UFV

Eng.º Diego Dias Veloso, M.Sc. – DEC/UFV

REVISÃO DE EDITORAÇÃO:

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Victória Barbosa Costa Garcia Vieira – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
Instituto de Pesquisas em Transportes.

Estudo para definição das tipologias e características das pontes a serem consideradas no catálogo – Brasília, 2026.

26 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 029)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

Este relatório apresenta o estudo para a definição das tipologias e características das pontes a serem consideradas no Catálogo de Pontes Padronizadas do DNIT, no âmbito do termo de execução descentralizada com a UFV. O objetivo central é estabelecer diretrizes técnicas para a padronização de estruturas de pontes em vigas de concreto armado e protendido e pontes em vigas mistas de aço e concreto, visando otimizar processos de projeto, contratação e execução de obras de arte especiais na rede rodoviária federal. A metodologia adotada compreendeu o levantamento e a análise de projetos existentes no banco de dados do DNIT, a avaliação de normas técnicas vigentes e a definição de parâmetros geométricos e de carga, como as classes de carregamento e as larguras de plataforma. Os resultados detalham a seleção de tipologias estruturais fundamentadas em critérios de viabilidade construtiva, durabilidade e economia, com foco em sistemas de vigas bi-apoiadas para vãos variados. Conclui-se que a padronização proposta reduzirá a heterogeneidade das soluções de engenharia, facilitando a manutenção e garantindo maior segurança estrutural e eficiência na gestão da infraestrutura de transportes nacional. O trabalho estabelece, assim, uma base normativa sólida para as próximas etapas de detalhamento do catálogo.

Palavras-chave: pontes rodoviárias; padronização; infraestrutura de transportes; concreto estrutural; catálogo de pontes; BIM; pontes; catálogo de projetos; engenharia de estruturas; DNIT; concreto protendido.

ABSTRACT

This report presents the study for defining the typologies and characteristics of bridges to be included in the DNIT Standardized Bridge Catalog, within the scope of the decentralized execution agreement with UFV. The central objective is to establish technical guidelines for the standardization of bridge structures using reinforced and prestressed concrete beams and bridges using composite steel and concrete beams, aiming to optimize design, procurement, and construction processes for special structures (OAE) within the federal highway network. The adopted methodology included the survey and analysis of existing projects in the DNIT database, the evaluation of current technical, and the definition of geometric and loading parameters, such as loading classes and platform widths. The results detail the selection of structural typologies based on criteria of constructive feasibility, durability, and economy, focusing on simply supported beam systems for various spans. It is concluded that the proposed standardization will reduce the heterogeneity of engineering solutions, facilitating maintenance and ensuring greater structural safety and efficiency in the management of national transport infrastructure. Thus, this work establishes a solid regulatory basis for the next stages of the catalog's detailing.

Keywords: highway bridges; standardization; transport infrastructure; structural concrete; bridge catalog; BIM; bridges; project catalog; structural engineering; DNIT; prestressed concrete.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIM – *Building Information Modelling* (Modelagem da informação da construção)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes

NBR – Norma Brasileira

OAE – Obra de Arte Especial

SGO – Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais

TED – Termo de Execução Descentralizada

UFV – Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Ponte com longarinas pré-moldadas sobre o rio Araguai 9

Figura 1.2 – Ponte com Tabuleiro em longarinas mistas de aço e concreto. Ponte sobre a Barragem Maia Filho 10

Figura 2.1 – Tipologia da ponte com pista simples.....12

Figura 2.2 – Tipologia da ponte com pista dupla 12

Figura 2.3 – Tipologia da ponte com pista simples.....15

Figura 2.4 – Tabuleiro misto 18

Figura 2.5 – Modelo numérico de pontes mistas 21

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Larguras definidas para os tabuleiros das pontes.....12

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
2 DESENVOLVIMENTO.....11
2.1 ESCOPO DO CATÁLOGO DE PROJETOS 11
2.1.1 DIMENSÕES DO TABULEIRO E VÃOS.....11
2.2 ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO 13
2.2.1 PONTES EM LONGARINAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO PROTENDIDO.... 13
2.2.2 PONTES MISTAS DE AÇO E CONCRETO 18
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 25

1 INTRODUÇÃO

A utilização de vigas pré-moldadas de concreto para construção de pontes teve início na década de 30 do século passado. Contudo esta técnica teve seu grande desenvolvimento a partir da década de 50 com o avanço da tecnologia da protensão e o desenvolvimento dos sistemas de transporte e montagem das estruturas. Dentre as vantagens desse modelo estrutural pode-se destacar:

- Melhor controle da execução tanto para as vigas pré-fabricadas como para as pré-moldadas no canteiro de obras.
- Otimização obtida na utilização das formas em função do reaproveitamento e do uso de seções padronizadas.
- Redução dos prazos de execução com a execução das vigas simultaneamente com a infraestrutura.
- Eliminação dos cimbramentos, o que é especialmente vantajoso no caso de obras sobre cursos d'água.

As pontes em viga constituem sistemas estruturais compostos por longarinas com ou sem transversinas servindo como suporte para as lajes, que irão receber os carregamentos do tráfego. As longarinas se apoiam sobre travessas sem transmissão de momentos fletores, por meio de aparelhos de apoio elastoméricos. As travessas, por sua vez, se apoiam sobre pilares que levam as cargas à fundação (Cavalcante, 2016).

Um exemplo de ponte com longarinas pré-moldadas é apresentado na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Ponte com longarinas pré-moldadas sobre o rio Araguai

Fonte: SGO/OAE (2021)

Com sistema estrutural semelhante às pontes pré-moldadas, tem-se as pontes mistas de aço e concreto, que consistem em estruturas formadas a partir da associação de uma laje de concreto armado moldada in loco ou pré-moldada e as longarinas metálicas.

O trabalho conjunto entre a viga de aço com a laje do tabuleiro só é possível devido a disposição de conectores de cisalhamento na interface aço-concreto, os quais são soldados na mesa superior das longarinas. No mercado, existem diferentes tipos de conectores de cisalhamento, os mais comuns são os conectores do tipo pino com cabeça, Stud Bolt, e o conector tipo U, sendo o primeiro o mais utilizado.

Na Figura 1.2 é ilustrada uma ponte com tabuleiro misto. Como pode ser visto, além da laje de concreto e vigas metálicas é comum a presença de outros elementos estruturais, como diafragmas e travamentos horizontais, e também não estruturais, como defensas e guarda corpo.



Figura 1.2 – Ponte com Tabuleiro em longarinas mistas de aço e concreto. Ponte sobre a Barragem Maia Filho

Fonte: Cardoso (2009)

Nas pontes mistas, os diafragmas têm como principal função promover a vinculação entre as longarinas que compõem o sistema, permitindo a colaboração entre elas, sobretudo na etapa de concretagem. Os diafragmas contribuem também para a redução do comprimento destravado, e possibilitam a transferência da ação horizontal do vento entre as longarinas até os aparelhos de apoio. Assim como os diagramas, os travamentos horizontais também colaboram na distribuição da ação do vento e contribuem para a estabilidade global do sistema.

Além das vantagens associadas ao aspecto construtivo, as pontes pré-moldadas de concreto ou mista de aço e concreto permitem uma grande variação do número de longarinas, possibilitando com isso, alterar a altura e a distância entre longarinas, bem como a variação do número de diafragmas ou transversinas para enrijecimento transversal.

Devido a essas inúmeras possibilidades, cada modelo proposto trará uma distribuição de esforços solicitantes diferentes e um maior ou melhor aproveitamento das resistências das seções transversais e do consumo de materiais empregados, sendo essencial a realização de um estudo de otimização para indicar seções de tabuleiro que sejam as mais econômicas para se vencer um determinado vão.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 ESCOPO DO CATÁLOGO DE PROJETOS

A pesquisa tem por objetivo a elaboração de um catálogo digital de projetos de pontes. A primeira reunião para a definição do escopo do catálogo foi realizada no dia 07/12/2021 entre membros da UFV e do DNIT. Nessa reunião foram decididas as seguintes características das pontes e suas variações no catálogo:

- **Traçado da pista:** pontes de eixo reto, com tabuleiro em nível.
- **Sistema estrutural:** ponte com um ou mais vãos em longarinas bi apoiadas, sem balanços nas extremidades. As longarinas se apoiam diretamente nos encontros extremos e ou em travessas e pilares intermediários.
- **Seções transversais:** laje de concreto apoiada sobre longarinas pré-moldadas de concreto protendido (seções T ou I) e seção mista de aço e concreto (Seção T ou I).
- **Estudo de otimização:** a definição das dimensões consideradas para o tabuleiro de pontes passará por um estudo de otimização, visando a obtenção de seções que atendam a todas as verificações de projeto, mas que sejam as mais econômicas, do ponto de vista do quantitativo de materiais.

2.1.1 DIMENSÕES DO TABULEIRO E VÃOS

Em próxima reunião, entre UFV e DNIT, realizada no dia 27/04/2021, foram decididos novos detalhes associados às dimensões dos tabuleiros das pontes e do escopo do projeto.

- **Comprimento dos vãos:** o catálogo deverá contemplar vãos de pontes com as seguintes variações: 20 m, 25 m, 30 m e 35 m.
- **Dimensões do tabuleiro:** para cada vão serão projetadas seções de tabuleiro para atender às classes de rodovias: classe I-A (rodovia duplicada com duas faixas de rolamento em cada sentido) e classe I-B (rodovia de pista simples, com uma faixa de rolamento em cada sentido), conforme indicado no Manual de Projetos de Obras de Arte Especiais - DNIT (1996). Também ficou definido que seriam feitos tabuleiros com acostamento, podendo ou não ter passeios para pedestres. Na Figura 2.1 e Figura 2.2 são apresentadas as larguras dos tabuleiros, de forma esquemática, e na Tabela 2.1 são indicadas as dimensões exatas fixadas em reunião. Importante lembrar que, para o caso os tabuleiros dascClasses I-A, serão considerados tabuleiros independentes para casa sentido da rodovia (dois tabuleiros, lado a lado).

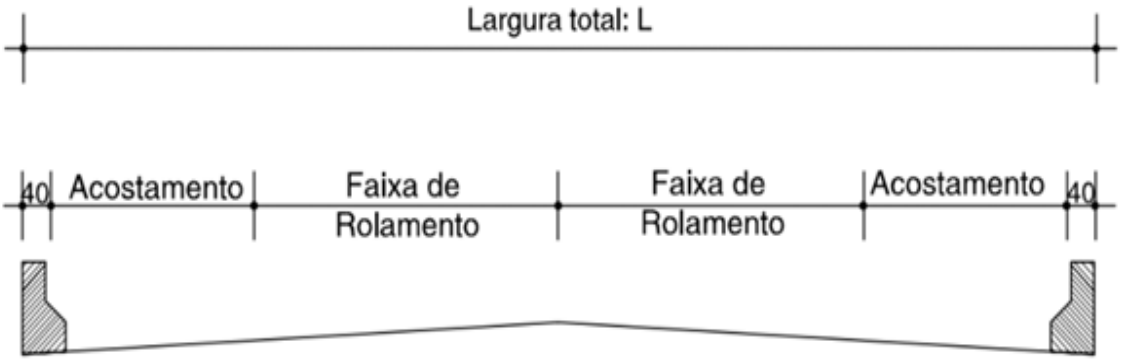


Figura 2.1 – Tipologia da ponte com pista simples

Fonte: Adaptado de DNIT (1996)

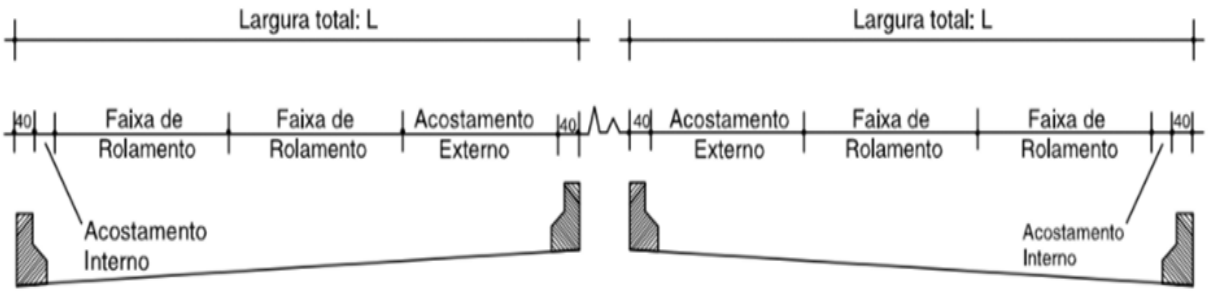


Figura 2.2 – Tipologia da ponte com pista dupla

Fonte: Adaptado de DNIT (1996)

Tabela 2.1 – Larguras definidas para os tabuleiros das pontes

OAE - Pista simples												
Classe	Unidades (m)	Guarda corpo	Passeio	Defensa	Acostamento	Faixa 1	Faixa 2	Acostamento	Defensa	Passeio	Guarda corpo	Total
I-B	Com passeio	0,15	1,50	0,40	2,50	3,60	3,60	2,50	0,40	1,50	0,15	16,30
I-B	Sem passeio			0,40	2,50	3,60	3,60	2,50	0,40			13,00
OAE - Pista dupla												
Classe	Unidades (m)	Guarda corpo	Passeio	Defensa	Acost. Int.	Faixa 1	Faixa 2	Acost. Ext	Defensa	Passeio	Guarda corpo	Total
I-A ou 0	Com passeio			0,40	1,00	3,60	3,60	3,00	0,40	1,50	0,15	13,65
I-A ou 0	Sem passeio			0,40	1,00	3,60	3,60	3,00	0,40			12,0

- **Abrangência do catálogo:** ficou decidido na referida reunião que o catálogo digital de projetos irá contemplar a concepção, o dimensionamento e detalhamento dos seguintes elementos da superestrutura: (longarinas, lajes e pré-lajes, defensas, guarda corpo e juntas). Também serão dimensionados e especificados os aparelhos de apoio elastoméricos. Para a infraestrutura, considerando travessas, pilares, encontros e lajes de transição, serão indicadas as dimensões e esquema de cargas provenientes da superestrutura. Serão apresentadas apenas sugestões e diretrizes para dimensionamento e detalhamento de pilares e encontros com diferentes alturas e larguras. Entende-se que os pilares, encontros e demais elementos associados à infraestrutura dependem da topografia e propriedades do solo do local de implantação da OAE.

2.2 ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO

2.2.1 Pontes em longarinas pré-moldadas de concreto protendido

Para o estudo de otimização foi realizado uma revisão bibliográfica com foco voltado para pontes em concreto protendido. Foi feita a leitura de artigos, dissertações, teses e livros abordando temas como pontes em concreto armado e concreto protendido, estudos de otimização de pontes e levantamentos de informações das pontes cadastradas no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte (SGO) (DNIT, 2021). A partir desse estudo, foi redigido o artigo de Coelho *et al*. (2023) que foi posteriormente publicado do XVI Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas em 2023.

Os estudos e o levantamento dos dados realizados para as pontes com longarinas em concreto protendido possibilitaram notar a falta de diretrizes para a realização de projetos de pontes, onde cada projeto é realizado sem que os elementos estruturais tenham dimensões otimizadas e mais econômicas. Também foi possível identificar as variáveis mais importantes e que devem ser associadas a um estudo de otimização das estruturas de pontes. Tendo em vista essa falta de diretrizes de otimização de projetos, o trabalho que vem sendo realizado tem como objetivo identificar as geometrias ótimas dos elementos a fim de gerar economias na construção de novas estruturas. Sendo os resultados parciais apresentados em Coelho *et al*. (2023).

2.2.1.1 Variáveis do estudo de otimização

Com a definição da geometria do tabuleiro, deu-se início ao estudo das variáveis a serem consideradas na otimização, sendo elas: altura das longarinas/comprimento do vão; número de longarinas/distância entre longarinas; largura da laje em balanço; necessidade ou não das transversinas no meio do vão.

a) Altura das longarinas x comprimento do vão

O comprimento do vão é um dos principais condicionantes à altura da longarina, com a tendência de que, quanto maior o vão, maior deve ser a altura da longarina. Thomaz (2002) propôs uma altura ideal para cada comprimento de vão dada pela Equação 2.1, mas que deve ser verificada em cada caso, amarrada ao número de longarinas escolhido. Por meio do artigo de Coelho *et al*. (2023), verifica-se que apesar dessa recomendação, ainda há uma grande divergência de das alturas médias das pontes no Brasil.

$$h_L = 0{,}00025 \cdot L^2 + 0{,}02064 \cdot L + 0{,}75434 \quad (2.1)$$

Onde:

h_L é a altura da longarina (m);

L é o vão da longarina bi-apoiadas (m);

b) Número de longarinas / distância entre longarinas

A distância ente eixos (a) proposta por Thomaz (2002), é dada pela Equação 2.2:

$$a \leq 0{,}028 \cdot L + 2 \quad (2.2)$$

Onde:

a é a distância entre eixos das longarinas (m).

No entanto, em alguns casos, a altura da longarina pode ser um fator limitante devido a exigências quanto ao gabarito, sendo a utilização de um maior número de longarinas com menores espaçamentos entre elas, uma possível alternativa visando a redução de sua altura.

c) Largura da laje em balanço

Está relacionado à distância entre extremidade da longarina externa até a extremidade do tabuleiro. Um fato associado à presença ou não do balanço está relacionada à faixa de laje colaborante na mesa comprimida da longarina e, portanto, precisa ser verificada caso a caso. Thomaz (2002) propôs a dimensão do balanço indicada na Equação 2.3.

$$b \leq 0{,}40 * a \quad (2.3)$$

Onde:

b é o balanço da laje do tabuleiro (m).

d) Necessidade ou não das transversinas no meio do vão

O uso de transversinas ou não no meio do vão vem sendo discutido nos últimos anos. De acordo com o apresentado por Cavalcante (2016) a ABNT NBR 7187:2003 não aborda a necessidade da inclusão de transversinas, sejam nos apoios ou regiões intermediárias. Por outro lado, a AASTHO (2002) indica algumas recomendações, mas sem justificativas. Já Leonhardt (1979), argumenta que o uso de transversina sempre é recomendado para pontes com mais de duas longarinas, visto que essas contribuem para distribuição das cargas.

Ainda de acordo com Cavalcante (2016) o emprego de transversinas no meio do vão é justificado por Chandolu (2003), que afirma que durante a fase de construção, estas previnem possíveis torções nas longarinas e auxiliam na redistribuição de esforços. Em contrapartida, o uso das transversinas aumenta os custos e tempo de execução, perdendo-se assim eficiência.

Sendo assim, a utilização ou não de transversinas no meio do vão será estudada e verificada quanto à sua interferência nos esforços solicitantes na estrutura e impactos na economia da obra.

2.2.1.2 Análise e dimensionamento

2.2.1.2.1 Modelo estrutural

A análise estrutural e o levantamento dos esforços serão feitos por meio da modelagem em elementos finitos, utilizando o software *CSiBridge v23.0.0*. Na Figura 2.3 é apresentada a malha de elementos finitos de um tabuleiro que já está em fase de implementação. Nesse modelo, as lajes são consideradas como elementos de casca e as longarinas são consideradas como elementos de viga.

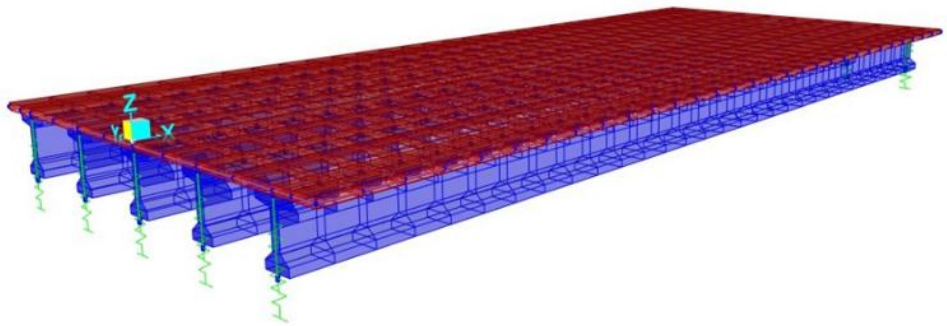


Figura 2.3 – Tipologia da ponte com pista simples

2.2.1.2.2 Ações consideradas

As ações a serem consideradas durante a etapa de modelagem da estrutura são listadas a seguir:

- Peso próprio de elementos estruturais, e não estruturais, durante todas as etapas de construção e serviço da estrutura.
- Força de protensão.
- Carga móvel (TB-450).
- Sobrecarga de pedestres.
- Frenagem e aceleração.
- Vento transversal.
- Variação de temperatura.
- Retração.

2.2.1.2.3 Verificações que serão consideradas

Uma vez levantados os esforços solicitantes via modelo de elementos finitos, estes serão inseridos em uma planilha, desenvolvida em Microsoft Excel, que será capaz de realizar todas as verificações e dimensionar as seções de controle, de forma automática. Essa planilha está em fase de elaboração será apresentada em um relatório futuro.

Serão realizadas verificações para os Estados Limites Último e Estados Limites de Utilização, envolvendo todos as seguintes situações:

2.2.1.2.3.1 Verificações nas longarinas

a) Definição do traçado dos cabos de protensão.

b) Comprimento de engrossamento da alma da viga junto ao apoio.

c) Esforços solicitantes em cada etapa construtiva, sendo elas:

- protensão;
- lançamento;
- concretagem das lajes e transversinas;
- revestimento e barreiras;
- início da operação da ponte;
- final da operação da ponte.

d) Esforços devido à retração da laje.

e) Esforços devido à variação de temperatura na laje.

f) Determinação da força de protensão:

- ELU – Ato da protensão;
- ELS – Protensão limitada.

g) Cálculo das perdas de protensão:

- Perdas imediatas:
  i. atrito do cabo/bainha;
  ii. acomodação da ancoragem;
  iii. encurtamento elástico do concreto.
- Perdas progressivas:
  i. retração;
  ii. fluência;
  iii. relaxação do aço.

h) Dimensionamento da armadura longitudinal da longarina.

i) Dimensionamento da armadura transversal.

j) Dimensionamento da armadura de torção.

k) Fadiga da armadura longitudinal e do concreto.

l) Fadiga da armadura transversal.

m) Verificação da flecha.

n) Estabilidade lateral da viga pré-moldada.

2.2.1.2.3.2 Verificações na laje

a) Dimensionamento das armaduras de flexão.
b) Verificação da fadiga da armadura de flexão.
c) Verificação do cisalhamento na laje.
d) Verificação da abertura de fissuras.

2.2.1.2.4 Normas a serem consideradas

ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

ABNT NBR 6120:2019 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações.

ABNT NBR 7187:2021 - Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto.

ABNT NBR 7188:2013 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

ABNT NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.

ABNT NBR 7480:2007 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação.

ABNT NBR 7483:2010 - Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação.

2.2.2 Pontes mistas de aço e concreto

As pontes mistas de aço e concreto consistem em estruturas formadas a partir da associação de uma laje de concreto armado moldada *in loco* ou pré-moldada e as longarinas metálicas. O trabalho conjunto entre a viga de aço com a laje do tabuleiro só é possível devido a disposição de conectores de cisalhamento na interface aço-concreto, os quais são soldados na mesa superior das longarinas. No mercado, existem diferentes tipos de conectores de cisalhamento, os mais comuns são os conectores do tipo pino com cabeça, *Stud Bolt*, e o conector tipo U, sendo o primeiro o mais utilizado.

Na Figura 2.4 é ilustrado um tabuleiro misto. Como pode ser visto, além da laje de concreto e vigas metálicas é comum a presença de outros elementos estruturais, como diafragmas e travamentos horizontais.

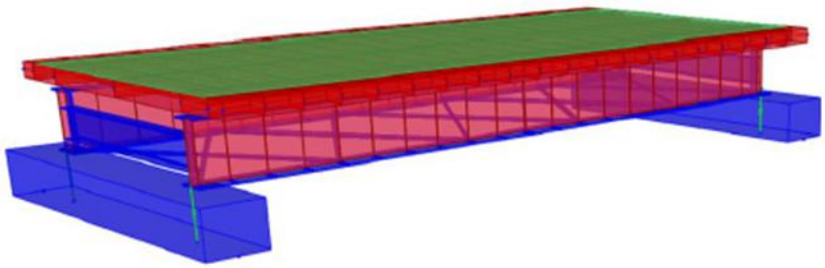


Figura 2.4 – Tabuleiro misto

Fonte: DNIT (2021)

Nas pontes, os diafragmas têm como principal função promover a vinculação entre as longarinas que compõem o sistema, permitindo a colaboração entre elas, sobretudo na etapa de concretagem. Os diafragmas contribuem também para a redução do comprimento destravado, e possibilitam a transferência da ação horizontal do vento entre as longarinas até os aparelhos de apoio. Assim como os diagramas, os travamentos horizontais também colaboram na distribuição da ação do vento e contribuem para a estabilidade global do sistema.

Os diafragmas podem ter diferentes configurações, os mais comuns são: X, K ou perfil de alma cheia (Figura 2.4). Para os perfis de alma cheia, a recomendação que se tem é que a altura da viga usada no diafragma seja superior a 85 % da altura da longarina, para os tipos X e K, também é recomendado a colocação de barras ao longo de 85 % da altura da longarina. Em termos de projeto, a utilização de diafragmas do tipo I simplifica o dimensionamento e o detalhamento das ligações, no entanto, resulta em maior consumo de aço do que o verificado para os travamentos do tipo X e K.

Os travamentos horizontais também apresentam formato X ou K, podendo ser posicionados próximo à mesa superior, a 1/3 dessa, próximo à mesa inferior ou, ainda, no centroide da altura da longarina. Para os travamentos horizontais, o posicionamento das barras próximos às mesas inferior e superior, permite a formação de duas treliças horizontais paralelas entre si, uma no topo e a outra na face inferior da longarina, o que contribui para estabilidade do conjunto, em especial, durante a etapa de concretagem. Após a cura do concreto, os travamentos horizontais superiores podem ser retirados, uma vez que a estabilização do flange comprimido passa a ser promovido pela laje de concreto endurecida.

Além dos travamentos horizontais e dos diafragmas, nas pontes com vãos maiores que 12 metros, existem as emendas, utilizadas para promover a continuidade dos esforços solicitantes entre os perfis que compõem a longarina, as quais são compostas, geralmente, por chapas e parafusos.

Como pode ser visto, a obtenção dos esforços solicitantes em uma ponte requer a análise cuidadosa dos esforços envolvidos. No dimensionamento, deve-se avaliar as fases anterior e posterior à cura do concreto da laje.

2.2.2.1 Variáveis do estudo de otimização

Inicialmente, o estudo de otimização será conduzido apenas para as pontes classe IB, sem passeio. Posteriormente, o estudo será expandido para as demais tipologias.

Além das larguras dos tabuleiros e vãos, já fixados na reunião entre UFV e DNIT, realizada no dia 27/04/2021, serão consideradas as seguintes variáveis no estudo de otimização das seções mistas:

a) Quantidade de longarinas.

b) Distância entre longarinas.

c) Distância entre diafragmas.

d) Comprimento dos balanços.

e) Perfil com alma esbelta e não esbelta.

f) Espessura da laje de concreto.

Uma investigação preliminar será conduzida a fim de avaliar o impacto da resistência e da espessura da laje de concreto na capacidade última das pontes mistas, caso não seja significativo, tais variáveis serão desconsideradas do estudo de otimização. Tal investigação se justifica, pois não há na literatura informações conclusivas sobre esse assunto.

As variáveis propostas foram definidas por serem aquelas que, para uma mesma configuração (vão e largura), influenciam os esforços internos e deslocamentos apresentados pelos elementos estruturais. Para o espaçamento entre diafragmas e tipo de perfil, têm-se as seguintes justificativas adicionais:

- Espaçamento entre diafragmas: os diafragmas exercem impacto no comprimento destravado das longarinas, o que pode ser crítico na etapa de concretagem. Além disso, os diafragmas promovem vinculação entre as longarinas do tabuleiro, logo seu distanciamento, bem como a rigidez de seus elementos, influenciam a distribuição interna dos esforços entre as longarinas.
- Perfil com alma esbelta e não esbelta: uma das decisões de projeto envolve a utilização de perfis com alma esbelta e maior quantidade de enrijecedores, ou perfis com alma não esbelta com poucos enrijecedores. Atualmente não há na literatura um estudo indicando qual o tipo de perfil conduz a uma melhor solução, em termos de consumo materiais, justificando a investigação de tal variável.

O tratamento dos resultados do estudo de otimização será feito em termos de volume de consumo de materiais e capacidade última das pontes. Do estudo de otimização, espera-se extrair como resultados:

- Indicativo da seção transversal ótima da longarina em função do vão e do espaçamento entre longarinas e diafragmas (em termos do consumo de materiais/m^2).
- Influência do espaçamento entre diafragmas sobre a capacidade última e consumo de materiais/m^2 .
- Influência do tipo de perfil (mantida constante a relação consumo de aço/m^2) na capacidade última das pontes mistas.

2.2.2.2 Análise e dimensionamento

2.2.2.2.1 Modelo estrutural

A análise estrutural será realizada por meio de Modelagem Numérica em Elementos Finitos utilizando o software *CSIBridge* v.23.0.0. O modelo já está em fase de implementação. Uma versão prévia do modelo numérico está ilustrada na Figura 2.5.

Como pode ser visto, foi previsto a utilização de mais um perfil na longarina (variação das dimensões do perfil ao longo do vão). Optou-se, inicialmente, por adotar diafragmas com configuração do tipo X e K, porém, essa tipologia pode ser substituída pela configuração do tipo I na versão final do modelo numérico, a qual será utilizada no estudo de otimização.

As principais implementações previstas para o modelo numérico consistem no posicionamento das chapas de emendas (a viabilidade/possibilidade de modelagem ainda será avaliada), colocação dos travamentos horizontais, definição das condições de contorno das barras dos travamentos e diafragmas (rótulas ou engastes) e lançamento dos carregamentos móveis e variáveis.

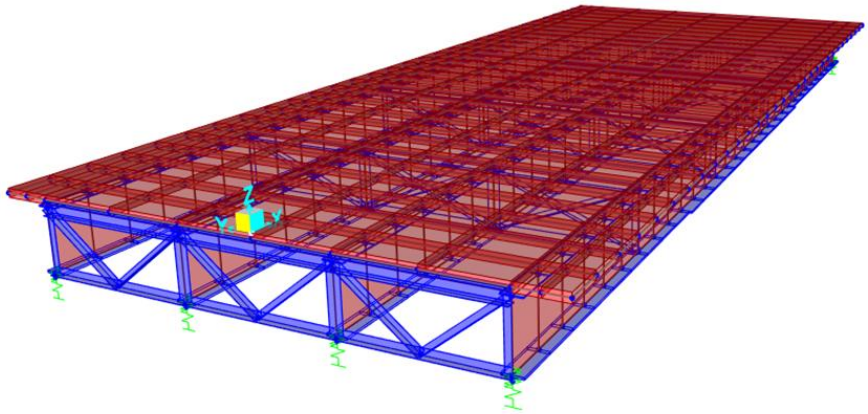


Figura 2.5 – Modelo numérico de pontes mistas

2.2.2.2.2 Ações consideradas

As ações consideradas para o dimensionamento dos tabuleiros de pontes mistas de aço e concreto serão as mesmas consideradas para as pontes pré-moldadas protendidas.

2.2.2.2.3 Verificações que serão consideradas

Uma vez obtidos os esforços solicitantes por meio do modelo em elementos finitos, todas as verificações do estudo de otimização serão feitas de forma automática por meio de uma planilha eletrônica em Microsoft Excel e que já está em fase de desenvolvimento.

2.2.2.2.3.1 Verificações na longarina

As longarinas foram verificadas na fase de construção (seção isolada de aço) e na fase de utilização (seção mista). Para essas duas etapas foram conduzidas as verificações mostradas a seguir:

a) Seção isolada de aço

- Seção não esbelta:
  i. flambagem lateral por torção;
  ii. flambagem local da mesa;
  iii. flambagem local da alma;
  iv. cisalhamento da alma;
  v. flexão local da mesa;
  vi. escoamento local da alma.

- Seção esbelta
  i. escoamento da mesa tracionada;
  ii. flambagem lateral por torção;
  iii. flambagem local da mesa comprimida;
  iv. cisalhamento da alma;
  v. flexão local da mesa;
  vi. escoamento local da alma.

b) Seção mista de aço e concreto

- Seção não esbelta e esbelta
  i. tensão de compressão na mesa superior;
  ii. tensão de tração na mesa inferior;
  iii. cisalhamento da alma;
  iv. esmagamento da laje de concreto;
  v. dimensionamento da solda de composição;
  vi. fadiga na solda de composição;
  vii. dimensionamento dos conectores de cisalhamento;
  viii. fadiga dos conectores de cisalhamento;
  ix. enrijecedores de apoio;
  x. enrijecedores transversais intermediários;
  xi. fadiga da solda dos enrijecedores;
  xii. cargas localizadas;
  xiii. ELS: flecha e contra-flecha.

2.2.2.2.4 Normas a serem consideradas

2.2.2.2.4.1 Normas ABNT

ABNT NBR 5884:2013 - Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais.

ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

ABNT NBR 6120:2019 - Cargas para cálculo de estruturas de edificações.

ABNT NBR 6123:1988 - Forças devido ao vento em edificações.

ABNT NBR 7188:2013 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas.

ABNT NBR 8681:2003 - Ações e segurança em estruturas – Procedimento.

ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

ABNT NBR 15980:2011 - Perfis laminados de aço para uso estrutural - Dimensões e tolerâncias.

ABNT NBR 16694:2020 - Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto lajes variam com a largura do tabuleiro e com o comprimento dos vãos.

2.2.2.2.4.2 Normas internacionais

AASHTO LRFD (2015) - Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridges Superstructures. Reference Manual.

AISC (2013) - Steel Manual 13th Edition. 2013.

AWS D1.5 (2015) - Brigdes welding code. 2015.

EUROCODE 4-2 (EN 4-2) - Design of composite steel and concrete structures: General rules and rules for bridges. 2004.

ASTM A193 B7 - Specification for high tensile bolts, screws, stud bolts, threads rods, anchor bolts and other externally threaded fasteners. 2020.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente relatório marca o início dos estudos realizados para a definição as tipologias a serem consideradas no Catálogo de Projetos de Pontes o qual é produto central dessa pesquisa.

De modo geral, as investigações apontaram para a necessidade de padronização de seções transversais e vãos das pontes, bem como o sistema estrutural a ser adotado para as pontes. Foram definidas as recomendações normativas nacionais e internacionais a serem consideradas no projeto, bem como algumas recomendações de dimensões das seções transversais dos elementos, dando embasamento para o estudo de otimização a ser realizado em etapas futuras

Ficou acordado junto ao DNIT que o Catálogo de Projetos de Pontes terá tabuleiros com larguras para atender às Classes de rodovias 0, I-A e I-B com vãos bi-apoiados de 20 m, 25 m, 30 ou 35 m podendo combinar um ou mais vãos bi-apoiados, sempre em traçado reto. A superestrutura será composta por seções em longarinas pré-moldadas de concreto protendido e seções em longarinas mistas de aço e concreto. A mesoestrutura será composta por travessas de concreto armado apoiadas sobre pilares e encontros em concreto armado apoiados sobre pilares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6120. Ações para o cálculo de estruturas de edificações. 2019.

_____ . NBR 7187. Projeto de Pontes de Concreto Armado e Concreto Protendido - Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.

_____. NBR 7187. Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de janeiro. 2021.

_____. NBR 16694. Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro. 2020.

_____. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de janeiro. 2014.

_____. NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações. Rio de janeiro. 1988.

_____. NBR 7188. Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de janeiro. 2013.

_____. NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de janeiro. Brasil. 2007.

_____. NBR 7483. Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. Rio de janeiro. 2020.

_____. NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de janeiro. Brasil. 2003.

_____. NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de janeiro. 2008.

_____. NBR 9062. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro. 2017.

_____. NBR 5884. Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro. 2013.

_____. NBR 15980. Perfis laminados de aço para uso estrutural - Dimensões e tolerâncias. Rio de Janeiro. 2011

_____. NBR 16694. Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro. 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridges Superstructures. Washington, D.C. 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Standard bridge design specifications. Washington, D.C. 2002.

AMERICAN INSTITURE OS STEEL CONSTRUCTION (AISC). Steel Manual. 13th Edition. 2013.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. AWS D1.5. Brigdes welding code. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. A193 B7. Specification for high tensile bolts, screws, stud bolts, threads rods, anchor bolts and other externally threaded fasteners. 2020.

CARDOSO, E. Ponte, Viadutos e Passarelas: reduzindo distâncias e superando obstáculos. Revista Construção Metálica. Edição 92. ISSN 1414-6517. - Associação Brasileira da Construção Metálica. 2009.

CAVALCANTE, G. H. F. Contribuição ao estudo da influência de transversinas no comportamento de sistemas de estruturas de pontes. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2016.

COELHO, A. C.; OLIVEIRA, D. S.; SANTOS, C. F. R.; RIBEIRO, J. C. L.; CARVALHO, J. M. F.; CÉSAR JR, K. M. L.; ANDRADE, M. S.; BORGES, B. S.; CARDOSO, M. A.; VELOSO, D. D. Considerações sobre a otimização de longarinas de pontes de concreto armado e concreto protendido. Anais do XVI Congresso brasileiro de pontes e estruturas. Rio de Janeiro. 2023.

CHANDOLU, A. Assessing the needs for intermediate diaphragms in prestressed concrete girders bridges. Thesis (Master). Faculty of the Louisiana State University. USA. 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de projeto de Obras-de-arte Especiais. Manual 698. DNIT. Brasil. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPOSTES. Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte - SGO. Disponível em: https://sisdnit.dnit.gov.br/sisdnit/jsp/. Acesso em: 28 de junho de 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1. EUROPEAN UNION. 2004

LEONHARDT. F. Princípios básicos da construção de pontes de concreto. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro. 1979.

THOMAZ, E.C.S. Concreto protendido pontes: Vigas pré-moldadas. Notas de aula. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2002.