

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SAMARA THAÍS LIMA RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DE
CARREGAMENTOS EM OAE VISANDO À EMISSÃO DE AUTORIZAÇÃO
ESPECIAL DE TRÂNSITO**

Maceió
2022

SAMARA THAÍS LIMA RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DE
CARREGAMENTOS EM OAE VISANDO À EMISSÃO DE AUTORIZAÇÃO
ESPECIAL DE TRÂNSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wayne Santos de Assis

Maceió
2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

R175a Ramos, Samara Thaís Lima.
Análise comparativa de métodos de verificação de carregamentos em OAE visando à emissão de autorização especial de trânsito / Samara Thaís Lima Ramos. – 2022.
154 f. : il. color.

Orientador: Wayne Santos de Assis.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 94-98.
Apêndice: f. 99-154.

1. Obras de Arte Especiais - OAEs. 2. Pontes rodoviárias. 3. Veículos de carga. 4. Segurança estrutural. I. Título.

CDU: 625.745.12




**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DE CARREGAMENTOS
EM OAE VISANDO À EMISSÃO DE AUTORIZAÇÃO ESPECIAL DE TRÂNSITO**


SAMARA THAÍS LIMA RAMOS

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 03 do mês de março do ano de 2022.


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 WAYNE SANTOS DE ASSIS
Data: 03/03/2022 16:52:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis
(Orientador – PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 FLAVIO BARBOZA DE LIMA
Data: 07/03/2022 07:49:11-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
(Avaliador Interno - PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 HUDSON CHAGAS DOS SANTOS
Data: 06/03/2022 19:56:18-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
(Avaliador Externo- UFPI)

SAMARA THAÍS LIMA RAMOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DE
CARREGAMENTOS EM OAE VISANDO À EMISSÃO DE AUTORIZAÇÃO
ESPECIAL DE TRÂNSITO**

Texto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, na área de concentração Estruturas e Materiais.

Maceió, 03 de março de 2022.

Prof. Wayne Santos de Assis

Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Barboza de Lima (UFAL/CTEC)

Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

Prof. Hudson Chagas dos Santos (UFPI)

Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a sabedoria, a coragem e a força necessária para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Solange e Marevaldo, por todo exemplo e a minha irmã Samires por estarem presentes em minha vida em todos os momentos, também por toda a confiança e apoio depositados em mim, sem os quais não seria possível a conclusão de mais esta etapa em minha vida. A meu esposo João Paulo, por todo o amor, companheirismo e paciência para comigo na discussão dos meus resultados.

Ao meu prezado e querido orientador, Wayne Santos, por toda paciência e dedicação durante as correções e orientação deste trabalho, obrigada por confiar em mim. Agradeço também ao engenheiro Gustavo Cavalcante por todo suporte durante a modelagem e por toda paciência para com as minhas dúvidas. Aos engenheiros do DNIT/AL Nicolas, Clécio, Ricardo e Theonelly que contribuíram com informações e materiais de apoio.

Aos amigos que sempre estiveram presentes nesta jornada, e que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado Andressa, Anne, Gustavo, Iva, João Marcos, João P. Correia, Teófanés, Paulo Chagas, agradeço o apoio, brincadeiras e bons momentos compartilhados.

À UFAL e à CAPES pelo apoio financeiro e pela estrutura disponibilizada para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

RAMOS, S. T. L. **Análise comparativa de métodos de verificação de carregamentos em OAE visando à emissão de autorização especial de trânsito.** 2022. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

Visando desenvolver uma avaliação comparativa dos princípios para análise de cargas em pontes, este trabalho propõe-se a realizar a verificação estrutural de uma obra de arte especial – OAE, mediante o estudo das cargas móveis adotadas pelas normativas brasileira (NBR 7188:2013), americanas (AASHTO: 2002 e 2020) e europeia (Eurocode 1: 2003). A verificação das cargas solicitantes, geradas por meio dos carregamentos móveis descritos nas respectivas normas, foi realizada sobre a ponte do rio Croatá, localizada na BR-423/AL, município do Canapi/AL, observando os limites de peso e dimensões, relacionados a veículos de carga nas rodovias brasileiras, estabelecidos pelas resoluções do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN. As informações de projeto da ponte foram disponibilizadas pelo DNIT/AL, viabilizando a avaliação dos esforços solicitantes gerados pelos carregamentos de projeto descritos nas normas referidas e por um trem-tipo especial de carga. Empregou-se modelagem numérica, através do método dos elementos finitos – MEF, para analisar os efeitos da passagem dos trens-tipo, determinando-se as solicitações máximas geradas na superestrutura com a passagem dos trens-tipo, comparando-as e aplicando as determinações estabelecidas nas normativas. Fazendo uso dos esforços solicitantes oriundos da análise numérica, aplicou-se aos resultados obtidos a metodologia estabelecida pelo DNIT para elaboração das concessões de Autorizações Especiais de Trânsito – AET, a qual estabelece os critérios de verificação de segurança estrutural em pontes rodoviárias. Por meio deste estudo, concluiu-se que a OAE em discussão se encontra em condições estruturais adequadas para a passagem dos carregamentos especiais e dos carregamentos das normas internacionais, cujos fatores de segurança apresentados nas verificações são superiores à unidade. Concluiu-se ainda que a normativa brasileira, em contraste com as normas internacionais, apresentou no caso analisado valores de fatores de segurança maiores durante a verificação estrutural.

Palavras-chave: Pontes rodoviárias. Autorização especial de trânsito. Carregamento máximo em pontes. Obras de Arte Especiais.

ABSTRACT

RAMOS, S. T. L. **Comparative analysis of verification methods of shipments in special engineering structures aiming at issuing a special transit authorization.** 2022. 155p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Alagoas, Maceió.

Aiming to develop a comparative evaluation of the principles for the analysis of loads in bridges, this work proposes to carry out the structural verification of a Special Engineering Structure, through the study of the mobile loads adopted by the Brazilian regulations (NBR 7188:2013), American (AASHTO: 2002 and 2020) and European (Eurocode 1: 2003). The verification of the requested loads, generated through the mobile loads described in the respective norms, was carried out on the bridge of the Croatá river, located in BR-423/AL, municipality of Canapi/AL, observing the limits of weight and dimensions, related to cargo vehicles on Brazilian highways, established by the resolutions of the National Traffic Council – CONTRAN. The bridge design information was made available by DNIT/AL, enabling the evaluation of the requesting efforts generated by the project loads described in the aforementioned standards and by a special type of freight train. Numerical modeling was used, through the finite element method - FEM, to analyze the effects of the passage of the type trains, determining the maximum requests generated in the superstructure with the passage of the type trains, comparing them and applying the determinations established in the regulations. Making use of the requesting efforts arising from the numerical analysis, the methodology established by the DNIT for the elaboration of concessions of Special Transit Authorizations was applied to the results obtained, which establishes the criteria for verifying structural safety in road bridges. Through this study, it was concluded that the special structure under discussion is in adequate structural conditions for the passage of special loads and loads of international standards, whose safety factors presented in the verifications are superior to unity. It was also concluded that the Brazilian regulations, in contrast to the international norms, presented in the analyzed case values of greater safety factors during the structural verification.

Keywords: Road bridges. Special transit authorization. Maximum loading on bridges. Special engineering structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo segundo a NB-6/1943.....	21
Figura 2 – Esquema para formação de trem-tipo	22
Figura 3 – Cargas segundo a NB-6/1960.....	23
Figura 4 – Cargas segundo a NBR 7188:84	25
Figura 5 – Caminhões padrão H e HS, segundo a AASHTO (2002).....	28
Figura 6 – Carregamento transversal segundo AASHTO-LRFD:2020	29
Figura 7 – Cargas segundo a NBR 7188:2013	31
Figura 8 – Vão teórico	33
Figura 9 – Veículos padrões H e HS segundo a AASTHO (2002)	34
Figura 10 – Faixas de carga.....	34
Figura 11 – <i>Alternate Military Loading</i>	35
Figura 12 – Eixo tandem, veículo HS20 e carga linear segundo a AASHTO-LRFD (2020) ..	36
Figura 13 – Sistema tandem	40
Figura 14 – Exemplo de aplicação de Modelo de carga 1.....	41
Figura 15 – Modelo de carga 2.....	42
Figura 16 – Exemplo de numeração de faixas de tráfego.....	44
Figura 17 – Conjunto transportador de carga indivisível.....	51
Figura 18 – Croqui de conjunto transportador e carga especial	51
Figura 19 – Seção transversal da ponte sobre o rio Croatá	53
Figura 20 – Geometria, cargas e malha.....	59
Figura 21 – Discretização da ponte	60
Figura 22 – Refinamento da malha - primeira discretização.....	61
Figura 23 – Diagrama de momento fletor máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização	61
Figura 24 – Diagrama de esforço cortante máximo devido a cargas permanentes para primeira discretização	62
Figura 25 – Deslocamento máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização	62
Figura 26 – Refinamento da malha - segunda discretização	63
Figura 27 – Diagrama de momento fletor máximo devido as cargas permanentes para segunda discretização	63
Figura 28 – Diagrama de esforço cortante máximo devido a cargas permanentes para segunda discretização	64
Figura 29 – Deslocamento máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização	64
Figura 30 – Ponte sobre o rio Croatá.....	68
Figura 31 – Execução de ponte sobre o rio Croatá.....	68
Figura 32 – Croqui do conjunto transportador	70
Figura 33 – Discretização da estrutura	71
Figura 34 – Modelo de barra representando a longarina	72
Figura 35 – Elemento de casca representando a laja da superestrutura.....	73
Figura 36 – Modelo de cálculo da ponte sobre o rio Croatá, vista inferior.....	75
Figura 37 – Modelo de cálculo da ponte sobre o rio Croatá, vista lateral.....	75
Figura 38 – Diagrama de momento fletor devido às cargas permanentes.....	76
Figura 39 – Diagrama de esforço cortante devido às cargas permanentes.....	77
Figura 40 – Deslocamento verticais devido às cargas permanentes.....	77
Figura 41 – Momentos fletores devidos à carga permanente, conforme memorial de cálculo	78
Figura 42 – Esforço cortante máximo segundo memorial de cálculo	78

Figura 43 – Deslocamento máximo segundo memorial de cálculo.....	79
Figura 44 – Meia Planta baixa da Superestrutura.....	82
Figura 45 – Deslocamentos devido as cargas móveis de projeto: (A) NBR 7188:2013, (B) AASHTO-LRFD (2020) e (C) Eurocode 1 (2003).....	84
Figura 46 – Faixas de carregamento.....	85
Figura 47 – Configuração deformada do tabuleiro: (A) Trem-tipo especial DNIT; (B) Trem-tipo especial NBR 7188:2013.....	86
Figura A. 1 – Vista longitudinal da Ponte sobre o rio Croatá	99
Figura A. 2 – Vista transversal da Ponte sobre o rio Croatá	99
Figura A. 3 – Definindo o material 1 constituinte da ponte	101
Figura A. 4 – Definindo o material 2 constituinte da ponte	102
Figura A. 5 – Seção do pilar	103
Figura A. 6 – Seção da transversina	104
Figura A. 7 – Seção da travessa.....	104
Figura A. 8 – Seção da longarina	105
Figura A. 9 – Definição das propriedades do tabuleiro 1	106
Figura A. 10 – Definição das propriedades do tabuleiro 2.....	106
Figura A. 11 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 1	107
Figura A. 12 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 2.....	108
Figura A. 13 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 3.....	108
Figura A. 14 – Definição de layout line, alinhamento da ponte.....	109
Figura A. 15 – Faixas de rolagem para obtenção de solicitações máximas	110
Figura A. 16 – Definição da lane, para norma brasileira.....	111
Figura A. 17 – Cotas longitudinais da ponte	112
Figura A. 18 – Criação dos vãos da ponte.....	112
Figura A. 19 – Vãos da ponte	113
Figura A. 20 – Determinação dos encontros	114
Figura A. 21 – Cotas verticais do aparelho de apoio.....	114
Figura A. 22 – Inserindo os pórticos	115
Figura A. 23 – Dimensões pórtico.....	116
Figura A. 24 – Elementos transversais	116
Figura A. 25 – Características dos pilares	117
Figura A. 26 – Detalhe Aparelhos de apoio descontínuo	118
Figura A. 27 – Graus de liberdade do aparelho de apoio	118
Figura A. 28 – Dimensões do aparelho de apoio, em cm.....	119
Figura A. 29 – Definições do aparelho de apoio	119
Figura A. 30 – Restrições do aparelho de apoio.....	120
Figura A. 31 – Configurações de rigidez translacional na direção U2.....	122
Figura A. 32 – Analogia de aparelho de apoio com elemento de barra	123
Figura A. 33 – Rigidez rotacional, dados em kN.cm	124
Figura A. 34 – Update e discretização da estrutura.....	125
Figura A. 35 – Visualização dos nós	126
Figura A. 36 – Visualização <i>Standard</i>	127
Figura A. 37 – Visualização Extrude, vista dos encontros, laje e longarinas.....	127
Figura A. 38 – Visualização Extrude, vista das travessas, pilares e molas dos aparelhos de apoio.	128
Figura A. 39 – Verificação nós e cotas.....	128
Figura A. 40 – Distâncias em X entre os nós.	130
Figura A. 41 – Restrições cinemática do nó da fundação	131

Figura A. 42 – Visualização dos carregamentos	132
Figura A. 43 – Carregamento das defensas	133
Figura A. 44 – Carregamento da pavimentação somado a recapeamento.....	133
Figura A. 45 – Definição das características dos carregamentos	134
Figura A. 46 – Características do carregamento das defensas	134
Figura A. 47 – Características do carregamento da pavimentação somado ao recapeamento.	135
Figura A. 48 – Análise dos carregamentos.....	135
Figura A. 49 – Graus de liberdade.....	136
Figura A. 50 – Análise modal.....	136
Figura A. 51 – características do carregamento de análise modal.....	137
Figura A. 52 – Análise modal, primeiro módulo de vibração	138
Figura A. 53 – Representação das forças devido ao peso próprio.....	138
Figura A. 54 – Reações devido ao peso próprio.....	139
Figura A. 55 – Correção da massa da ponte.	140
Figura A. 56 – Valores de período e frequência com massa corrigida.....	141
Figura A. 57 – Modelo de carregamento do trem-tipo TB-450.....	142
Figura A. 58 – Carga pontual do TB-450.....	142
Figura A. 59 – Configurações de carga pontual do TB-450.....	144
Figura A. 60 – Carga de multidão TB-450.....	145
Figura A. 61 – Configurações do carregamento de multidão do TB-450	146
Figura A. 62 – Definição de Load patterns	146
Figura A. 63 – Criando os Load Cases.....	147
Figura A. 64 – Característica da carga pontual	148
Figura A. 65 – Característica da carga móvel	148
Figura A. 66 – Cargas combinadas.....	149
Figura A. 67 – Combinação das cargas do pontual e móvel.	150
Figura A. 68 – Combinação de cargas permanentes.	150
Figura A. 69 – Análise modal com carregamento móvel.....	151
Figura A. 70 – Deformações na ponte.....	151
Figura A. 71 – Representação da pista de rolamento (<i>Lane</i>), norma brasileira	152
Figura A. 72 – Modelo norma americana.....	153
Figura A. 73 – Modelo norma europeia	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas de multidão segundo a NB-6/1943	20
Tabela 2 – Carga para os compressores e caminhões segundo a NB-6/1943.....	21
Tabela 3 – Características dos veículos segundo a NB-6/1960.....	24
Tabela 4 – Características dos veículos segundo a NBR 7188:1984	26
Tabela 5 – Fator de redução para carregamento de múltiplas faixas.....	37
Tabela 6 – Fatores de múltipla presença	37
Tabela 7 – Carregamento nos passeios.....	37
Tabela 8 – Valores característicos, Modelo de carga 1	40
Tabela 9 – Modelo de Carga 3: carregamento e geometria.	43
Tabela 10 – Número e largura de faixas de tráfego.....	44
Tabela 11 – Classificação das Obras de Arte Especiais (SGO)	49
Tabela 12 – Comparação entre as normas.	55
Tabela 13 – Resumo das cargas móveis, segundo a NBR 7188:2013.....	66
Tabela 14 – Resumo das cargas móveis, segundo a AASTHO – LRFD (2020).....	66
Tabela 15 – Resumo das cargas móveis, segundo o Eurocode 1 (2003).....	67
Tabela 16 – Dados do conjunto transportador.....	69
Tabela 17 – Resumo das solicitações do modelo e memorial de cálculo.....	79
Tabela 18 – Resumo das solicitações do modelo durante refinamento e calibração.....	81
Tabela 19 – Variação percentual dos resultados	81
Tabela 20 – Resumo de solicitações máximas nas longarinas.	83
Tabela 21 – Fatores de segurança obtidos considerando coeficientes de ponderação	87
Tabela 22 – Fatores de segurança obtidos sem considerar coeficientes de ponderação.....	88
Tabela 23 – Fatores de segurança obtidos pelos veículos estabelecidos pela NBR 7188:2013	89
Tabela 24 – Razões entre as solicitações máximas de projeto da norma brasileira e internacionais.....	89
Tabela 25 – Razões entre as solicitações máximas características da norma brasileira e internacionais.....	89
Tabela 26 – Razões entre as solicitações máximas de projeto das normas internacionais.....	89
Tabela 27 – Razões entre as solicitações máximas características das normas internacionais	90
Tabela 28 – Momentos fletores máximos conforme a distância de eixos de aplicação de carga	91
Tabela A. 1 – Materiais constituintes dos elementos da Ponte	100
Tabela A. 2 – Materiais de cada elemento da ponte.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AET	Autorização Especial de Trânsito
CGPERT	Coordenação Geral de Operações Rodoviárias
CIA	Coefficiente de Impacto Adicional
CIV	Coefficiente de Impacto Vertical
CNF	Coefficiente de Número de Faixas
CMT	Capacidade Máxima de Tração
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CP	Coefficiente de Ponderação
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CVC	Combinações de Veículos de Carga
D.O.U.	Diário Oficial da União
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELU	Estado Limite Último
EVE	Estudo de Viabilidade Estrutural
FS	Fator de Segurança
IM	Tolerância da carga dinâmica
LIV	Vão em metros usado para o cálculo do CIV
LRFD	Load and Resistance Factor Design
MEF	Método dos elementos finitos
NB	Norma Brasileira
NBR	Norma Brasileira Registrada
OAE	Obras de Arte Especiais
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
SGO	Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte
SIAET	Sistema de Gerenciamento e Autorização Especial de Trânsito

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Número inteiro de faixas de tráfego
N_f	Número de faixas
M_d	Momento fletor de projeto
M_k	Momento fletor característico
S_g	Solicitações devidas às cargas permanentes
S_q	Solicitações devidas às cargas móveis ou acidentais de projeto
S_{qe}	Solicitações devidas a Carga Especial
V_d	Esforço cortante de projeto
V_k	Esforço cortante característico
γ_c	Peso específico do concreto
γ_g	Coefficiente de ponderação para as ações permanentes
φ	Coefficiente de Impacto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	AUTORIZAÇÃO ESPECIAL DE TRÂNSITO E NORMAS CORRELATAS	19
2.1	EVOLUÇÃO DAS NORMATIVAS	19
2.1.1	Verificação Estrutural Nacional	19
2.1.2	Verificação Estrutural Americana	26
2.1.3	Verificação Estrutural Europeia	29
2.2	CARGA MÓVEL	30
2.2.1	Norma Brasileira	30
2.2.2	Normas Americanas	33
2.2.3	Norma Europeia	39
2.3	CONCESSÕES DE TRÂNSITO E NORMAS DE TRANSPORTE DE CARGA	44
2.4	AUTORIZAÇÃO ESPECIAL DE TRÂNSITO (AET)	46
2.4.1	Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte	47
2.4.2	Estudo de Viabilidade Estrutural	49
3	METODOLOGIA	53
3.1	ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS ESTUDADAS	54
3.2	OBTENÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA	56
3.3	MODELAGEM DA PONTE	57
3.4	MODELAGEM DOS CARREGAMENTOS NORMATIVOS	65
3.5	MODELAGEM DO CARREGAMENTO ESPECIAL	67
4	MODELO DA PONTE	71
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO	74
5	RESULTADOS	82
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA MODELAGEM	99
A1.	DADOS DA PONTE	99
A2.	CRIAR UM ARQUIVO NOVO	100
A3.	DEFINIR AS PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS	100
A4.	DEFINIR AS PROPRIEDADES DA SEÇÃO TRANSVERSAL	102
A5.	CRIAÇÃO DA PONTE	111

A6.	VERIFICAÇÃO DOS NÓS.....	125
A7.	ANÁLISE MODAL.....	131
A8.	CRIAÇÃO DOS CARREGAMENTOS MÓVEIS.....	141
A9.	VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS GERADOS	148

1 INTRODUÇÃO

Definido como o movimento de pessoas e produtos, o transporte tem por finalidade oferecer uma ferramenta para a troca de bens e informações, trânsito de pessoas, e contribuir com o desenvolvimento econômico e social, fornecendo as condições necessárias para o desenvolvimento das atividades humanas, tais como comércio, recreação e defesa (HOEL; GARBER; SADEK, 2011).

Segundo Hoel, Garber e Sadek (2011), um sistema de transporte de boa qualidade proporciona inúmeros benefícios à sociedade, levando em consideração o seu papel no desenvolvimento econômico. Cerca de 60% do volume de mercadorias realizado no Brasil é possibilitado pelo transporte rodoviário de cargas, e seu custo é representado por aproximadamente 6% do Produto Interno Bruto do país.

O transporte de uma carga pode ser feito por diversos meios, destacando-se os modais aeroviário, aquaviário, dutoviário, ferroviário e rodoviário. O modal rodoviário é o principal meio para o transporte de cargas no Brasil, o que não significa dizer que seja o mais seguro ou mais eficaz, pois sua logística gera grandes custos, e as estradas de rodagem nem sempre apresentam boas condições.

Muitas das cargas transportadas pela malha rodoviária nacional correspondem a máquinas, peças e equipamentos, entre outros tipos de cargas, que não podem ser divididas sem gerar custos indevidos ou risco de danos, sendo por vezes classificadas como cargas indivisíveis. De acordo com o Art. 4º da resolução DNIT n.º 1 de 2020, a carga indivisível consiste em uma carga unitária com peso e/ou dimensões excedentes aos limites regulamentares, cujo transporte demanda a necessidade do uso de veículos especiais com lotação, dimensões, estrutura, suspensão e direção apropriadas (BRASIL, 2020). Para que essas cargas possam transitar pelas nossas rodovias, utilizando pontes e outras OAE dispersas por estas, faz-se necessária uma Autorização Especial de Trânsito (AET), que corresponde ao documento expedido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT destinado a veículo ou combinação de veículos utilizados no transporte de carga especial ou indivisível, que não se enquadrem nos limites de peso e dimensões estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN.

As disposições relativas à legislação brasileira no tangente as características de peso e dimensões em pontes, atualmente estão dispersas em várias normas. A principal entre elas é o Código de Trânsito Brasileiro – CTB, estabelecido pela Lei n.º 9.503/97, por meio de vários artigos. O CTB é um documento que institui as atribuições dos diversos órgãos e autoridades

ligados ao trânsito no Brasil, e no seu Art. 7º define o CONTRAN como órgão máximo normativo e consultivo. O CTB conferiu competência ao CONTRAN para instituir os limites de peso e dimensões, e sobre este assunto o Conselho dispôs diversas resoluções, portarias e até atos administrativos (REIS, 2014).

Os limites de peso relacionados a veículos de carga também estão definidos em resoluções do CONTRAN. A resolução n.º 12 de 1998 estipulava o limite de 450 kN para peso bruto total, entretanto, a circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVCs) de até 740 kN era possível através de uma Autorização Especial de Trânsito, de acordo com a resolução n.º 68/98 (FERREIRA, 2006).

Aprovada pelo CONTRAN em 2006, a resolução n.º 211 elevou o peso bruto das CVCs com duas ou mais unidades — incluída a unidade tratora — para 570 kN, dispensando a necessidade da AET para essas composições. Estabelece-se ainda, no Art. 2º da referida resolução, que a AET pode ser concedida pelo órgão executivo rodoviário da união, estados, municípios ou do distrito federal, e que as CVCs devem atender os seguintes requisitos: o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) deve ser igual ou inferior a 910 kN, e as dimensões para os PBTC que estejam acima de 570 kN e/ou tenham um PBTC menor ou igual a 910 kN deverão ter comprimento entre 25 e 30 metros.

Quando o veículo ou a carga extrapolam os limites de peso e/ou dimensões estabelecidos pela resolução CONTRAN n.º 210 de 2006, é necessário que o transportador da carga ou solicitante seja cadastrado no Sistema de Gerenciamento e Autorização Especial de Trânsito – SIAET, junto à Coordenação Geral de Operações Rodoviárias - CGPERT, para que solicite uma autorização especial a fim de realizar o transporte desta carga. Essas autorizações são necessárias porque durante o seu trajeto, o conjunto transportador muitas vezes precisa transpor obras de arte que podem não estar em condições adequadas de trânsito ou oferecem riscos estruturais face à carga transportada, ou pode ocorrer que o percurso escolhido apresente pontes, vias ou viadutos com dimensões inferiores às do veículo transportador. Desses fatos, surge a necessidade de estudo preliminar de rotas mais adequadas para realização do transporte.

O estudo de relevantes normas e procedimentos – dentre as quais as normativas americanas (AASHTO: 2002 e 2020), brasileira (NBR 7188:2013) e europeia (Eurocode 1: 2003) – surge neste trabalho visando à avaliação comparativa dos princípios para verificação de cargas em pontes, mediante o estudo das cargas móveis adotadas para a realização da verificação estrutural. Segundo Luchi (2006), nas normativas brasileiras e internacionais, as cargas são admitidas através de trens-tipo idealizados, que imperiosamente não refletem a

realidade dos veículos passantes nas obras de arte, seja em relação à carga por eixo, seja em relação à distribuição de carga.

Muitas vezes, as pontes localizadas na malha rodoviária federal recebem carregamentos que excedem os previstos nos modelos idealizados pela norma brasileira NBR 7188:2013. Deste modo, quando necessário, carregamentos especiais são idealizados como um trem-tipo especial, segundo metodologia do DNIT, para verificação de segurança estrutural relacionada à elaboração de uma AET.

Na verificação associada à emissão de AETs, é adotado um fator de segurança que é estabelecido a partir do estudo dos esforços solicitantes. O modelo de cálculo apresentado para a elaboração das AETs leva em consideração os coeficientes de ponderação estabelecidos na NBR 8681:2003 e os coeficientes de impacto previstos na NBR 7187:2021 e NBR 7188:2013.

Durante a elaboração deste estudo recorreu-se a alguns trabalhos que tiveram temas correlatos e contribuíram para a temática escolhida, destacando-se os seguintes.

- *Contribuição ao estudo do efeito de combinações de veículos de carga sobre pontes*: neste trabalho o autor (SANTOS, 2003) elaborou um estudo sobre normas referentes às cargas móveis aplicadas em pontes, analisando as consequências e a viabilidade do tráfego das CVCs.
- *Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras*: para este estudo o autor (LUCHI, 2006) desenvolveu um modelo para a verificação do trem-tipo de projeto de pontes e viadutos da norma brasileira a partir do tráfego real nas estradas, apresentando ainda a comparação das cargas móveis relativas às normas brasileira, americana e europeia.
- *Contribuição ao projeto e dimensionamento da superestrutura de pontes rodoviárias em vigas mistas de aço e concreto*: neste estudo o autor (SOUZA, 2012) realizou um estudo das principais características sobre análise, projeto e processos construtivos de pontes mistas de aço e concreto. Compara quanto às cargas móveis – descritos nas normas brasileira, americana e europeia – os momentos fletores e deslocamentos na seção central das vigas que compõem o tabuleiro da ponte analisada.
- *Contribuição ao estudo da influência de transversinas no comportamento de sistemas estruturais de pontes*: aqui o autor (CAVALCANTE, 2016) realizou um estudo numérico, via método dos elementos finitos, para pontes pré-moldadas em viga e pontes moldadas no local em pórtico, cujo objetivo foi estudar a influência dessas vigas secundárias no desempenho estrutural das pontes, verificando os valores de deslocamentos e esforços máximos nas longarinas e pilares.

1.1 OBJETIVOS

Com o desenvolvimento deste trabalho objetivou-se analisar comparativamente as metodologias previstas nas normativas nacionais e internacionais, para a verificação de carregamentos em obras de arte especiais, tendo em vista seu impacto na emissão de autorizações especiais de trânsito. Por conseguinte, obter fatores de segurança (FS) por meio da metodologia de cálculo estabelecida pelo DNIT, para a elaboração do estudo de viabilidade estrutural, a fim de realizar verificações estruturais na ponte sobre o rio Croatá, localizada na BR-423/AL, município do Canapi/AL.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente as normativas americanas (AASHTO: 2002 e 2020), brasileira (NBR 7188:2013) e europeia (Eurocode 1: 2003) estudando os carregamentos móveis e prescrições adotadas para verificação de carregamentos em OAE, visando seu impacto na emissão de AET.

1.1.2 Objetivos específicos

No contexto do atendimento do objetivo geral, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Pesquisar o processo de elaboração das Autorizações Especiais de Trânsito;
- b) Avaliar os coeficientes de Impacto estabelecidos pelas NBR 7187:2021, NBR 7188:2013, AASHTO (2002 e 2020) e Eurocode 1 (2003);
- c) Avaliar os fatores de segurança obtidos por meio da razão entre as combinações de ELU das normativas e seus respectivos carregamentos móveis e ELU do carregamento especial, com destaque para a aplicação da ponte sobre o rio Croatá.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho busca contribuir com o estudo da verificação da segurança das pontes rodoviárias brasileiras, tendo em vista que se pretende, por meio da utilização da modelagem numérica, atribuir alternativas à verificação estrutural de obras de arte especiais. Tendo em vista que a ferramenta numérica, por meio do método dos elementos finitos, pode ser tida como auxiliar à metodologia de verificação atual, que é baseada no método de verificação analítica para obtenção das cargas solicitantes, e com estas estabelece fatores de segurança.

Para isto é realizado um estudo sobre relevantes documentos normativos, nacionais e internacionais, tendo como foco a avaliação dos conceitos de cargas móveis. Com esse estudo

buscou-se avaliar de forma comparada os carregamentos móveis descritos nas normas internacionais frente à prescrição nacional, em relação aos esforços solicitantes máximos que serão utilizados para obtenção dos FS.

Destarte, este estudo justifica-se na busca da compreensão, mais clara, de como esses coeficientes atuam na verificação estrutural das pontes que necessitam ser avaliadas para receber carregamentos que excedem aqueles adotados durante a sua concepção estrutural.

2 AUTORIZAÇÃO ESPECIAL DE TRÂNSITO E NORMAS CORRELATAS

Neste capítulo é apresentada a evolução das normativas nacional (NBR 7188:2013), americanas (AASHTO: 2002 e 2020) e europeia (Eurocode 1: 2003), além de um breve panorama sobre seus critérios de projeto, com ênfase nos carregamentos móveis adotados. Também serão discutidas as prescrições para o transporte de carga rodoviário, conforme disposto nas resoluções do CONTRAN e do DNIT, para que se possam configurar os limites legais de peso e dimensões e a necessidade da elaboração das AETs, respectivamente.

2.1 EVOLUÇÃO DAS NORMATIVAS

À medida que as solicitações rodoviárias aumentam, em função do crescimento das demandas e das necessidades humanas, surge a necessidade de adequação da capacidade portante das OAEs, para que se possa assegurar que as estruturas a serem concebidas atendam às demandas atuais e futuras, garantindo melhores características de projeto e segurança aos usuários. Entretanto, para este fim, os procedimentos adotados precisam ser elaborados por órgãos competentes. O processo de elaboração e aplicação de regras com a finalidade de solucionar ou prevenir problemas, com a cooperação de todos os interessados e, em particular, para a promoção da economia global, denomina-se normalização (ABNT, 2014).

2.1.1 Verificação Estrutural Nacional

A normalização de cargas em pontes surgiu no Brasil na década de 1940, com a publicação da norma NB-1/1946 – Cálculo e Execução de Obras de concreto armado - que tratava do cálculo de estruturas de concreto armado. Em seguida, outras normas foram elaboradas para complementá-la, entre elas a NB-6: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias, publicada em 1943 (LUCCHI, 2006).

Segundo a ENGETI (2017), no período referente aos anos de 1943 e 1960, as considerações referentes à carga móvel em pontes rodoviárias eram elaboradas em acordo com a norma NB-6/1943. As rodovias eram divididas de acordo com o grau de importância, sendo as rodovias principais classificadas como rodovias de Classe I, enquanto o trem-tipo era composto por cargas de compressores, caminhões e multidão. As pontes rodoviárias eram agrupadas em três classes:

- a) Classe I: Pontes situadas em estradas-tronco federais e estaduais ou nas estradas principais de ligação entre esses troncos;

- b) Classe II: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias, mas em que, atendendo a circunstâncias especiais do local, haja conveniência em se prever a passagem de veículos pesados;
- c) Classe III: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias não incluídas na classe II.

O trem-tipo é definido como o conjunto do carregamento móvel a ser aplicado à estrutura em sua posição mais desfavorável para cada seção de cálculo e combinação de carregamento. A multidão representa o tráfego de veículos de pequeno porte que pode acompanhar a passagem do caminhão e/ou do compressor. A multidão é constituída por carga uniformemente distribuída cuja intensidade para o cálculo dos arcos ou vigas principais é indicada na Tabela 1. Para os demais elementos estruturais, a multidão deveria ser considerada constante, com valores que variavam entre 4,5 ou 4,0 kN/m², dependendo da classe a ser utilizada.

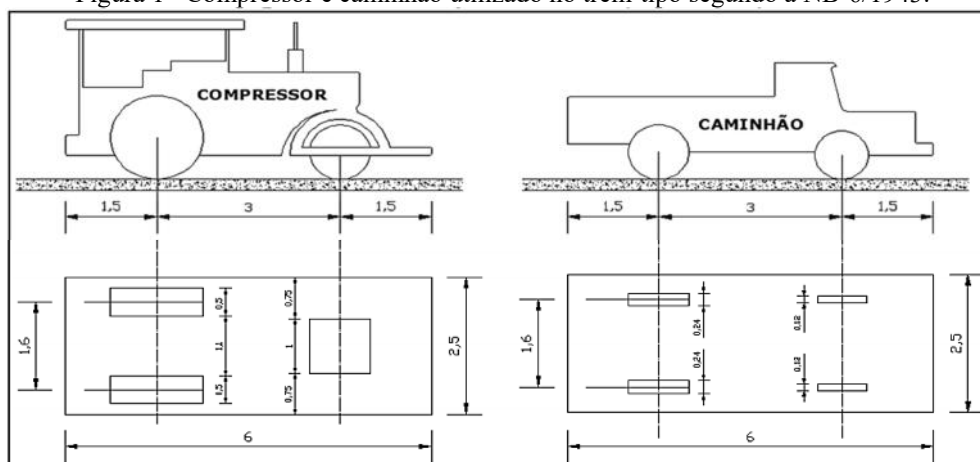
Tabela 1 – Cargas de multidão segundo a NB-6/1943

Características da estrutura	Carga de Multidão (kN/m ²)		
	Classe I	Classe II	Classe III
Vão teórico ≤ 25 m	4,5	4,0	4,0
$25 < \text{vão (L)} \leq 125$ m	$4,5 - (L - 25)$	$4,0 - (L - 25)$	$4,0 - (L - 25)$
Vão teórico > 125 m	3,5	3,0	3,0

Fonte: ABNT *apud* (CAVALCANTE, 2004), 1943 (adaptado).

Segundo Cavalcante (2004), a multidão distribui-se sobre os passeios e sobre a parte do tabuleiro não ocupada pelos veículos. Para tal, a área ocupada por um veículo, compressor ou caminhão, indicada na Figura 1, é representada por uma área retangular, com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, com o centro sobre o eixo longitudinal do veículo e a igual distância dos eixos dianteiro e traseiro. No cálculo dos arcos ou vigas principais, com vão de 30 m ou superior, admite-se ainda substituir as cargas concentradas dos veículos por carga uniformemente distribuída, sobre área retangular com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, cuja resultante é igual à soma das cargas concentradas.

Figura 1– Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo segundo a NB-6/1943.



Fonte: ABNT *apud* (CAVALCANTE, 2004), 1943 (adaptado). Dimensões em metros.

O carregamento teórico da ponte era calculado com um veículo designado como compressor e um veículo designado como caminhão, representados na Figura 1. Havia três tipos de compressor: Tipo A, com peso total de 7 tf; Tipo B, com 16 tf e Tipo C, com 24 tf. Dois tipos de carregamento estavam associados para o caminhão: Tipo A de 6 tf e o Tipo B de 9 tf, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Carga para os compressores e caminhões segundo a NB-6/1943

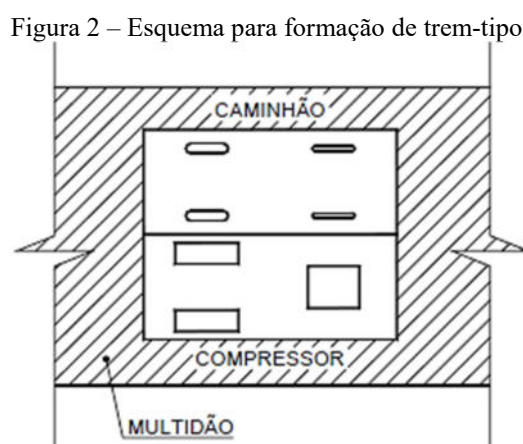
Compressores	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Unidade
Peso total	7	16	24	tf
Peso da roda dianteira	5	7	10	tf
Peso da roda traseira	1	4,5	7	tf
Largura da roda dianteira	1	1	1	m
Largura da roda traseira	10	40	50	cm
Distância entre os eixos diante e traseiro	3	3	3	m
Distância entre os meios das rodas traseiras	160	160	160	cm
Caminhão	Tipo A	Tipo B	Unidade	
Peso total	6	9	tf	
Peso da roda dianteira	750	1500	kgf	
Peso da roda traseira	2250	3000	kgf	
Largura da roda dianteira	8	12	cm	
Largura da roda traseira	18	24	cm	
Distância entre os eixos diante e traseiro	3	3	m	
Distância entre os meios das rodas traseiras	160	160	cm	

Fonte: ABNT *apud* (CAVALCANTE, 2004), 1943 (adaptado).

Para pontes da Classe III o trem-tipo era composto de carga de multidão igual a $4,0 \text{ kN/m}^2$, de um compressor Tipo A e de tantos caminhões Tipo A quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, todos orientados na direção do tráfego e colocados na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento. Atentando-se para a restrição de nunca colocar mais de um veículo sobre cada faixa de tráfego, nem em posição que permitisse um afastamento inferior a $2,5 \text{ m}$ entre os eixos longitudinais de dois veículos.

Para pontes da Classe II o trem-tipo é o mesmo da Classe III, porém, deve-se verificar ainda a resistência da estrutura para um compressor Tipo B, visto na Tabela 2, posto isolado sobre a ponte, na posição mais desfavorável para o elemento estudado, mas sempre orientado na direção do tráfego.

Por fim, para pontes da Classe I, o trem-tipo compõe-se de multidão com $4,5 \text{ kN/m}^2$, de um compressor Tipo B e de tantos caminhões Tipo B quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, e dispostos como no caso da Classe III. A resistência da estrutura deve ser verificada para um compressor Tipo C, conforme indicado na Tabela 2, posto isolado sobre a ponte, na posição mais desfavorável para o elemento estudado, mas sempre orientado na direção do tráfego, como ilustrado na Figura 2.

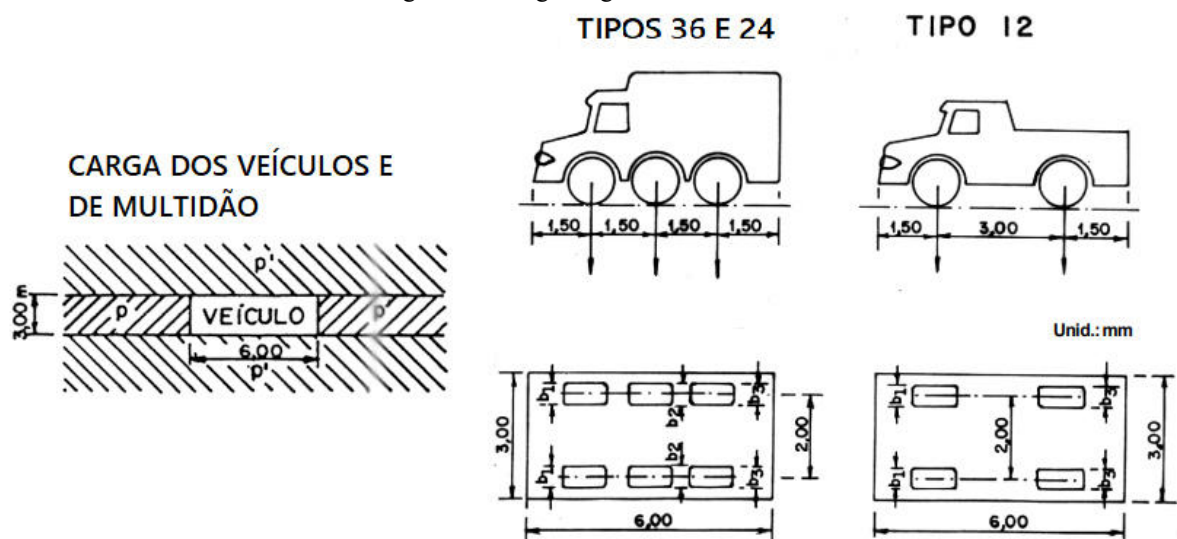


Fonte: BRASIL, 2004.

As pontes concebidas até o ano de 1950 foram dimensionadas de acordo com a norma brasileira NB-6/1946. Entre os anos de 1960 e 1975 houve grandes mudanças na norma brasileira com a atualização da NB-6/1960, cuja principal foi a introdução do trem-tipo composto por um veículo de 360 kN , multidão de 5 kN/m^2 na frente e atrás do veículo e de multidão de 3 kN/m^2 no restante da pista e nos passeios. O coeficiente de impacto (ϕ) passou a ser dado em função do vão (L) pela formulação $\phi = 1,4 - 0,007 \cdot L$ (SANTOS *et al*, 2016).

De acordo com Luchi (2006), no período de 1960 a 1984, as considerações sobre carga móvel em pontes rodoviárias foram realizadas em acordo com a norma NB-6/1960, que estabelecia as cargas de 360 kN, 240 kN e 120 kN para as rodovias de Classe I, II e III, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3. As cargas eram consideradas através de trens-tipo idealizados que não reproduziam a realidade dos veículos passantes nas obras, seja em relação à carga por eixo ou em relação à distribuição de eixo, sendo esses trens-tipo semelhantes aos considerados nas normas alemãs da época, representados na Figura 3.

Figura 3 – Cargas segundo a NB-6/1960



Fonte: ABNT, 1960 (adaptado).

Tabela 3 – Características dos veículos segundo a NB-6/1960

Cargas dos veículos						
Classe da Ponte	Veículo		Carga uniformemente distribuída		Classe da rodovia	
	Tipo	Peso total (tf)	p (kgf/m ²)	p' (kgf/m ²)	Disposição da carga	
36	36	36	500	300	Carga p à frente e atrás do veículo. Carga p' no restante da pista e passeios.	Classe I
24	24	24	400	300		Classe II
12	12	12	300	300		Classe III
Características dos veículos						
	Unidade	Tipo 36 t	Tipo 24 t	Tipo 12 t		
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2		
Peso total do veículo	tf	36	24	12		
Peso de cada roda dianteira	tf	6	4	2		
Peso de cada roda traseira	tf	6	4	4		

Fonte: ABNT, 1960 (adaptado).

Durante a verificação, dever-se-ia sempre orientar o trem-tipo na direção do tráfego, colocando-o na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, sem considerar a carga do eixo ou da roda que gere redução de esforços solicitantes. No cálculo de placas, longarinas e transversinas junto às bordas do tabuleiro, era obrigatório encostar a roda do veículo-tipo no guarda-rodas. A carga p deveria ser aplicada na faixa longitudinal correspondente ao veículo na região não ocupada por este e a carga p' deveria ser aplicada no restante da pista de rolamento e nos passeios, conforme ilustrado na Figura 3.

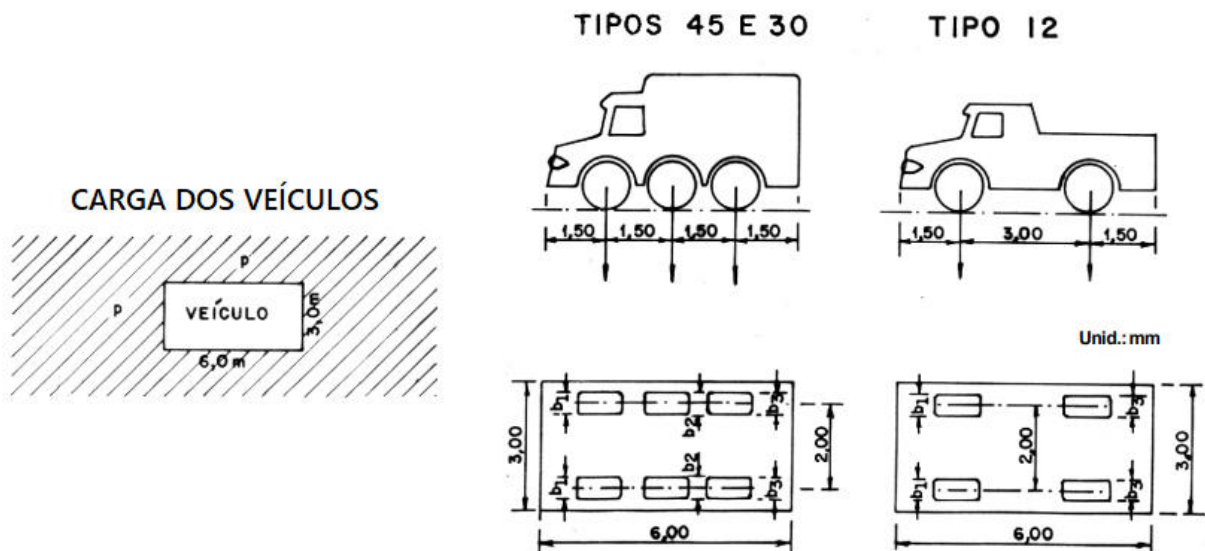
Em casos em que os guarda-rodas possuíssem altura superior a 25 cm, tomados em referência a partir da borda de pavimentação da pista, e ocupassem faixa de largura útil, no máximo de 75 cm, não se deveria dispor cargas devido à multidão na faixa ocupada por ele. Para os outros casos, a multidão deveria ser considerada na faixa ocupada pelo guarda-rodas. Tratando-se de pontes com refúgios centrais elevados, em rodovias de mais de uma pista, o uso de carregamento dessa área era obrigatório, com carga p' .

Para o cálculo de arcos ou vigas principais com vãos iguais a 30 m ou mais, a NB-6/1960 permitia substituição das cargas concentradas do veículo por carga igual, porém uniformemente distribuída, disposta sobre área retangular ocupada pelo mesmo, caracterizando o trem-tipo homogeneizado.

Por fim, foi publicada a norma NBR 7188: 1984 - Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas para Pedestres, substituindo os trens-tipos de 240 kN e 360 kN por 300 kN e 450 kN, respectivamente, mantendo-se a distribuição de eixos.

Nesta norma foram definidos três veículos-tipo, respectivamente as Classes 12, 30 e 45, conforme indicado na Figura 4, sendo o número de classe correspondente ao valor do peso em toneladas força do veículo-tipo. A área ocupada pelo veículo é retangular, com largura igual a 3 m e comprimento igual a 6 m. As cargas uniformemente distribuídas na pista e no passeio possuem intensidade p e p' , respectivamente, e podem ser observadas na Tabela 4.

Figura 4 – Cargas segundo a NBR 7188:84



Fonte: ABNT, 1984 (adaptado).

Tabela 4 – Características dos veículos segundo a NBR 7188:1984

Cargas dos veículos								
Classe da Ponte	Veículo			Carga uniformemente distribuída				Disposição da carga
	Tipo	Peso total		p		p'		
		kN	tf	kN/m ²	kgf/m ²	kN/m ²	kgf/m ²	
45	45	450	45	5	500	3	300	Carga p em toda pista. Carga p' nos passeios.
30	30	300	30	5	500	3	300	
12	12	120	12	4	400	3	300	
Características dos veículos								
				Unidade	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12	
Quantidade de eixos				Eixo	3	3	2	
Peso total do veículo				kN-tf	450 - 45	300 - 30	120 - 12	
Peso de cada roda dianteira				kN-tf	75 - 7,5	50 - 5	20 - 2	
Peso de cada roda traseira				kN-tf	75 - 7,5	50 - 5	40 - 4	
Peso de cada roda intermediária				kN-tf	75 - 7,5	50 - 5		

Fonte: ABNT, 1984 (adaptado).

A utilização de diferentes classes não é estabelecida pela norma, ficando a sua definição a critério dos órgãos jurisdicionais. Em vias principais rurais e urbanas, as pontes são projetadas para a classe 45. As outras classes são utilizadas apenas para rodovias secundárias, de caráter local ou regional.

De acordo com Brasil (2004), na malha rodoviária brasileira há pontes de idades distintas, concebidas segundo diferentes critérios e solicitadas a suportar o tráfego de cargas móveis sempre crescentes. Além disso, existe uma quantidade significativa de obras com carregamentos móveis distintos dos atualmente utilizados, dessa forma, já não atendem as solicitações atuais, muitas das quais projetadas, detalhadas e executadas na década de 60.

Ainda, considerando-se que muitas das obras de arte especiais do Brasil foi construída a partir do ano de 1960 (BRASIL, 2004), as duas normas que têm uma melhor representação para as cargas de projeto em pontes rodoviárias são: NB-6 de 1960 — que especifica as seguintes classes de carregamento móvel: 12 t, 24 t e 36 f — e a NBR 7188 de 1987, estando em vigor atualmente a sua segunda edição (NBR 7188:2013), com os trens-tipo rodoviário brasileiro (TB) TB-240 e TB-450.

2.1.2 Verificação Estrutural Americana

O primeiro padrão nacional amplamente reconhecido para o projeto e construção de pontes nos Estados Unidos foi publicado em 1931 pela AASHO (*American Association of State*

Highway Officials), a antecessora da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). A primeira publicação foi intitulada *Standard Specifications for Highway Bridges and Incidental Structures* (Especificações padrão para pontes rodoviárias e estruturas incidentais), que rapidamente tornou-se o padrão americano e foi adotado e usado não apenas pelos departamentos de rodovias estaduais, mas também por outras autoridades e agências proprietárias de pontes nos Estados Unidos e no exterior.

Embora os Departamentos de Transportes estaduais estabeleçam suas próprias exigências nos Estados Unidos, as normas da AASHTO definem os padrões referentes às combinações e distribuição das cargas móveis em pontes. As normas AASHTO abordadas neste trabalho são: *Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002), que foi descontinuada a partir da sua 17ª edição final, dando espaço para a atual norma *Load and Resistance Factor Design Specifications* (AASHTO-LRFD, 2020).

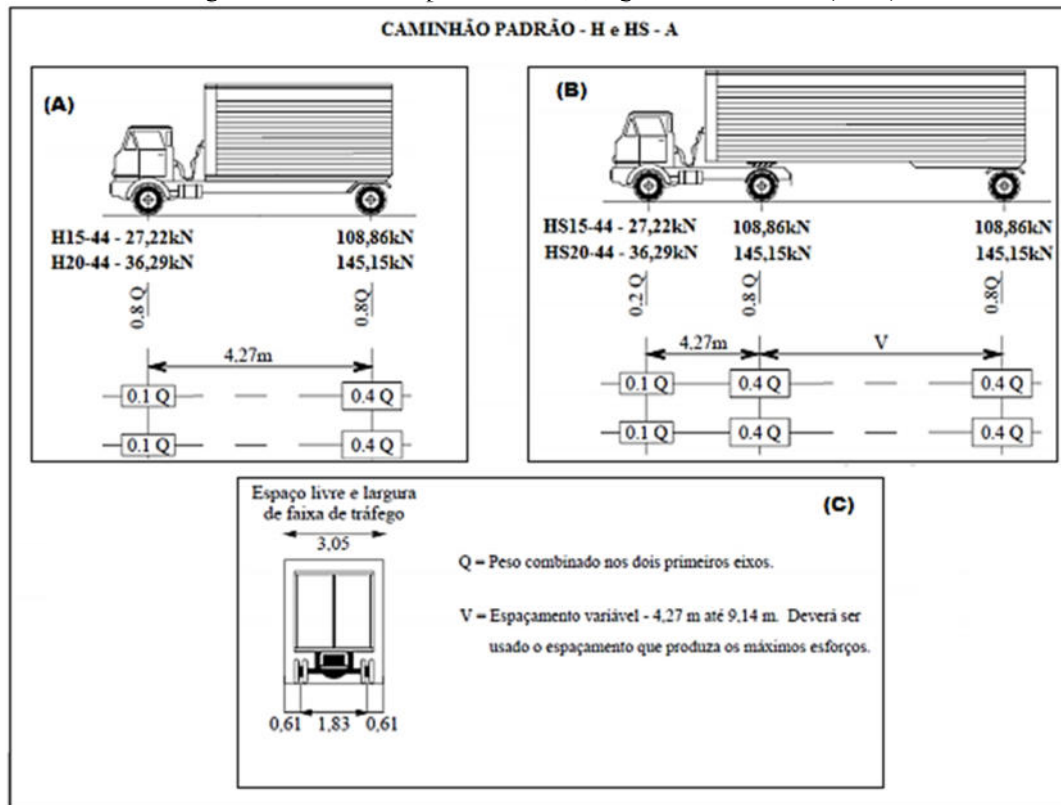
A norma AASHTO (2002) foi utilizada por aproximadamente 70 anos pela AASHTO como principal documento normativo, entretanto, dentro desse período diversas modificações foram realizadas em seu texto, causando inconsistências nos procedimentos. Com isso, a partir do ano de 2007, foi substituída totalmente após um processo que durou mais de duas décadas de estudos. A nova e atual norma LRFD faz parte de uma nova geração de normas de projetos de pontes que é baseada em teorias de probabilidades e estatísticas, onde o desempenho estrutural pode ser medido em termos de um índice de confiabilidade.

Segundo a AASHTO (2002), as cargas móveis rodoviárias nas pontes consistem em caminhões padronizados ou faixas de carga que são equivalentes a trens de carga, no qual são fornecidos dois sistemas de carga, representados por H e HS que equivalem a um caminhão de dois eixos e um caminhão trator com semirreboque, respectivamente, representados na Figura 5. As cargas prefixadas por HS são maiores que as prefixadas por H. Existem quatro classes padrões de cargas móveis rodoviárias: H 20, H 15, HS 20 e HS 15, onde o carregamento H 15 corresponde a 75% do carregamento do H20 e o HS15 corresponde a 75% do carregamento do HS20. Se carregamentos diferentes forem desejados, eles deverão ser obtidos alterando proporcionalmente os pesos mostrados para o caminhão padrão e as correspondentes cargas de faixa.

Os veículos padronizados referentes a classe H possuem dois eixos espaçados entre si por uma distância de 4,27 m, conforme a Figura 5 (A). Já os veículos do tipo HS possuem três eixos, com espaçamento entre os eixos dianteiros iguais ao da classe H e distância variável entre os eixos traseiros, conforme a Figura 5 (B).

Com o propósito de facilitar a compreensão das letras e números utilizados para especificar os veículos padrão da AASTHO, pode-se definir como Hn-44 ou HSn-44, onde o tipo de veículo é definido por H e HS, o peso total do caminhão reboque em toneladas é representado pela letra “n”, seguido do número 44 que faz referência ao ano da edição da norma em que foram estabelecidos os veículos (SOUZA, 2012).

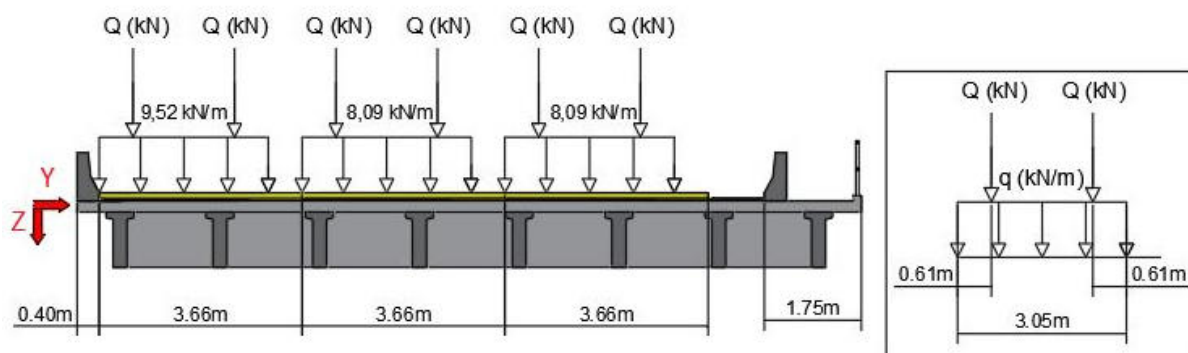
Figura 5 – Caminhões padrão H e HS, segundo a AASTHO (2002)



Fonte: AASTHO, 2002 (adaptado).

Na verificação estrutural leva-se em consideração o número de faixas de tráfego da superestrutura e, prevendo que essas faixas nem sempre estarão carregadas, é estabelecido fatores de ponderação com base no número de faixas. Os veículos são posicionados nas faixas de tráfego associados ao carregamento de multidão que - assim como a carga dos veículos - é ponderado com relação ao número de faixas, ocupando um comprimento transversal de 3,05m em uma faixa de 3,66 m, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Carregamento transversal segundo AASHTO-LRFD:2020



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A norma ainda possui um coeficiente de efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de incremento ou coeficiente de impacto. Essas particularidades normativas serão pormenorizadas no item 2.2.2.

2.1.3 Verificação Estrutural Europeia

Grande parte dos países europeus atualmente faz uso do Eurocode. Para as cargas de tráfego em pontes, emprega-se a *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2*, cujo documento foi desenvolvido pelo Comitê Europeu de Normalização – CEN (EN, 2003).

Souza (2012) comenta que os critérios estabelecidos pela Eurocode 1 foram definidos com o propósito de padronização do carregamento móvel a ser considerado em pontes, contudo, os carregamentos indicados neste código correspondem aos trechos com maior intensidade de tráfego na Europa, devendo-se ajustar para cada país, por meio de coeficientes apropriados, em acordo com as suas respectivas particularidades.

Segundo o *Joint Research Centre Eurocodes* (2018), a versão atual dos *EN Eurocodes* resulta de um longo e dedicado esforço por parte da Comissão, dos Estados-Membros e, em particular, da comunidade científica e técnica da engenharia civil e mecânica da União Europeia que redigiram os documentos normativos, desenvolveram e realizaram vários projetos de investigação com o objetivo de esclarecer diversos aspectos científicos e técnicos a serem definitivamente aprovados pelos Estados-Membros.

A normativa Europeia (Eurocode 1) não define um trem-tipo específico como na normativa brasileira (NBR 7188:2013) e nas normas americanas (AASHTO, 2002 e AASHTO-LRFD, 2020). Ela estabelece quatro modelos de carga, destinados a representar os efeitos de tráfego de veículos associados às verificações de estado limite último e algumas verificações de serviço. No item 2.2.3 deste trabalho esses modelos serão discutidos com mais detalhes.

- a) Modelo 1: o modelo de carga principal, o qual consiste em cargas concentradas, sistema tandem, e carga uniformemente distribuída representando a ação proveniente dos veículos pesados e dos veículos leves, respectivamente. Esse modelo pode ser utilizado tanto para as verificações locais quanto para as verificações globais;
- b) Modelo 2: este modelo é normalmente utilizado para elementos com componentes estruturais curtos, possuindo carga sobre um único eixo para verificações locais e semi-locais;
- c) Modelo 3: este modelo representa um conjunto de veículos especiais altamente carregados, utilizados para verificações globais e locais;
- d) Modelo 4: este modelo é destinado apenas para verificação global. Trata-se de um carregamento de multidão de 5 kN/m^2 , onde já são incluídos os efeitos dinâmicos das cargas móveis.

2.2 CARGA MÓVEL

Para que se possa realizar o dimensionamento de qualquer estrutura é necessário conhecer os esforços solicitantes máximos e mínimos que ela apresentará quando submetida ao carregamento a que se destina. Para estruturas submetidas a cargas móveis existe um diagrama, denominado de envoltória de esforços, que determina os valores limites, máximo ou mínimo, para as seções transversais da estrutura.

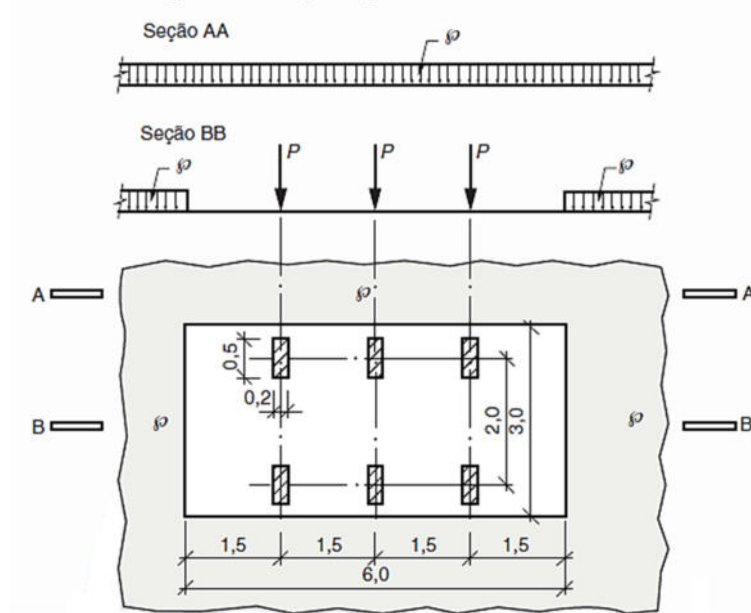
Nesta seção, serão apresentados conceitos relacionados a cargas móveis descritas pelas normas brasileira, americanas e europeias, a fim de se obter os esforços solicitantes máximos em pontes e como suas ponderações devem ser realizadas.

2.2.1 Norma Brasileira

A norma vigente no Brasil para cargas móveis em ponte é a NBR 7188:2013, na qual a carga móvel rodoviária padrão é o TB-450.

O trem-tipo rodoviário brasileiro (TB) compõe-se de um veículo e de cargas uniformemente distribuídas, conforme ilustrado na Figura 7. O TB-450 é definido por um veículo tipo de 450 kN , com seis rodas, com carga estática de roda do veículo (P) equivalente a 75 kN , três eixos de carga afastados entre si em $1,5 \text{ m}$, com área de ocupação de $18,0 \text{ m}^2$, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante p correspondente a 5 kN/m^2 .

Figura 7 – Cargas segundo a NBR 7188:2013



Fonte: ABNT, 2013.

A norma ainda estabelece o TB-240, destinado às obras em estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares. O TB-240 é definido por um veículo tipo de 240 kN, com seis rodas, com carga estática de roda do veículo (P) equivalente a 40 kN, com três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18,0 m², circundada por uma carga uniformemente distribuída constante p correspondente a 4,0 kN/m² (ABNT, 2013).

O efeito dinâmico das cargas móveis na norma brasileira é considerado majorando-se o efeito estático por meio da multiplicação pelo coeficiente de impacto (ϕ), o qual é determinado por meio da NBR 7188:2013 por três coeficientes distintos que ponderam as ações das cargas verticais. Esses coeficientes servem para ponderar os efeitos dos carregamentos móveis, onde o coeficiente de impacto é dado pelo produto dos três coeficientes, que são eles: coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente de número de faixas (CNF) e o coeficiente de impacto adicional (CIA).

O coeficiente de impacto vertical assume o valor de 1,35 para estruturas com vão inferior a 10 m, e para estruturas com vão entre 10,0 m e 200,0 m é calculado por meio da Equação 1. Para vãos maiores que 200,0 m a NBR 7188: 2013 determina que deve ser realizado estudo específico para a consideração da ampliação dinâmica e definição do coeficiente de impacto vertical.

$$CIV = 1 + 1,06 \left(\frac{20}{LIV + 50} \right) \quad (1)$$

Onde:

CIV é o coeficiente de impacto vertical;

LIV é o vão em metros usado para o cálculo do CIV , corresponde ao próprio vão para vigas isostáticas, média aritmética dos vãos no caso de vigas contínuas e o próprio comprimento no caso de vigas em balanço.

O cálculo do coeficiente de número de faixas é definido pela equação 2, e deve atender a um valor mínimo de 0,9.

$$CNF = 1 - 0,05 \times (n - 2) > 0,9 \quad (2)$$

Onde:

CNF é o coeficiente de número de faixas;

n é o número de faixas de tráfego rodoviário, adotando-se um valor inteiro, observando-se que acostamentos e faixa de segurança não são considerados.

Para o coeficiente de impacto adicional a NBR 7188: 2013 recomenda o valor de 1,25 para obras em concreto ou mistas e 1,15 para obras em aço.

A NBR 7187:2003 definia nos elementos estruturais de obras rodoviária um coeficiente equivalente ao resultado obtido por meio do uso da Equação 3. Entretanto, em sua última atualização a norma indica que deve ser considerado os valores característicos das cargas móveis rodoviárias, incluindo cargas verticais, efeito dinâmico, força centrífuga, efeitos da frenagem e da aceleração, fixados na ABNT NBR 7188.

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot l \geq 1 \quad (3)$$

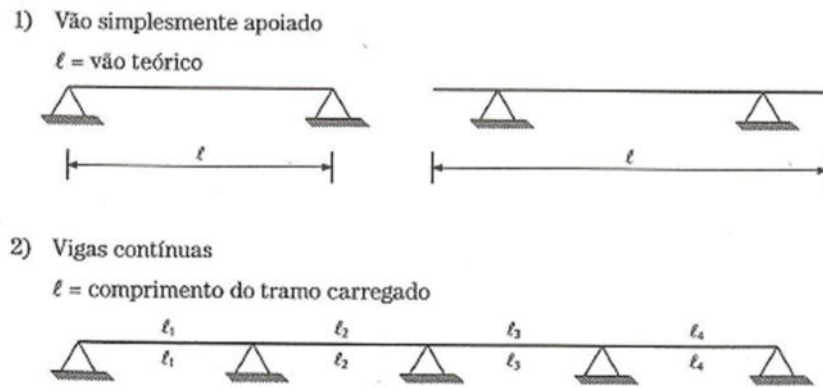
onde:

φ é o coeficiente de impacto ≥ 1 ;

l é o comprimento de cada vão teórico do elemento carregado, em metros.

No caso de vãos desiguais, representado pela Figura 8 (2), em que o menor vão seja igual ou superior a 70% do maior, permite-se considerar um vão ideal equivalente à média aritmética dos vãos teóricos. No caso de vigas em balanço, l é tomado igual a duas vezes o seu comprimento. Não deve ser considerado o impacto na determinação do empuxo de terra provocado pelas cargas móveis, no cálculo de fundações e nos passeios das pontes rodoviárias (ABNT, 2003 b).

Figura 8 – Vão teórico



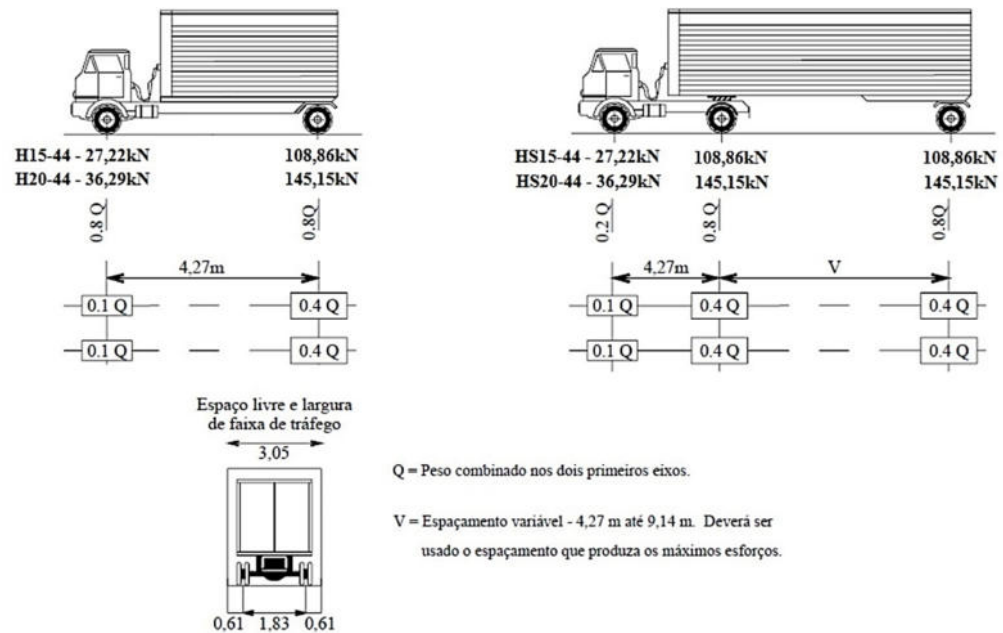
Fonte: MARCHETTI, 2018.

Segundo a NBR 8681:2003, o coeficiente de ponderação para as ações das cargas móveis em pontes, para verificação no estado limite último (γ_q), vale 1,5.

2.2.2 Normas Americanas

As normas americanas adotam dois sistemas de carregamento quando do dimensionamento de pontes rodoviárias, os quais estão descritos em AASTHO (2002) e AASHTO-LRFD (2020). A AASTHO (2002) define que as cargas móveis rodoviárias nas pontes são constituídas de caminhões padronizados ou faixas de carga, equivalentes a trens de carga, que são considerados no projeto de dimensionamento de pontes rodoviárias. Os veículos padrão são denominados H e HS, diferenciados pelo tipo de veículo e carregamento, como ilustrado na Figura 9, na qual pode-se observar que existem quatro classes de carregamento padronizados: H 20, H 15, HS 20 e HS 15. Os carregamentos correspondem aos veículos padrão HS e H, onde os veículos do tipo HS possuem maior carga por eixo que os veículos tipo H. Segundo Santos (2003), a maioria das pontes americanas é projetada para o veículo padrão do tipo HS20-44.

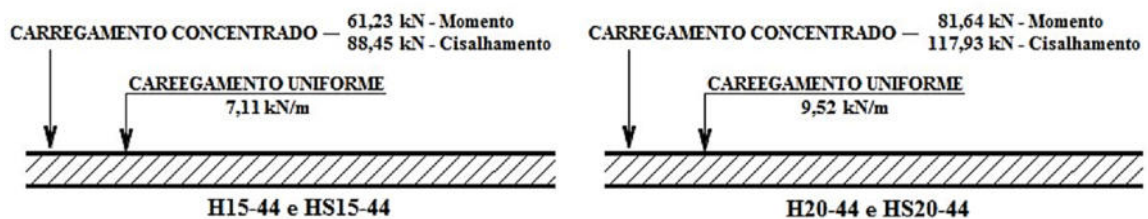
Figura 9 – Veículos padrões H e HS segundo a AASTHO (2002)



Fonte: AASHTO, 2002 (adaptado).

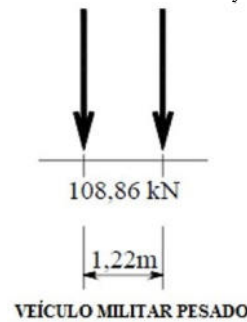
Cada faixa de carga, representada na Figura 10, representa um carregamento linearmente distribuído ou uma carga de tráfego combinada com uma carga concentrada simples, posicionadas no vão de modo a produzir os esforços máximos. Essas cargas deverão ser consideradas como uniformemente distribuídas, em uma largura de 3,05 m em uma linha normal ao centro da faixa. Essas faixas de carga são geralmente utilizadas para o projeto de vigas com vãos maiores que 43 m (SOUZA,2012).

Figura 10 – Faixas de carga



Fonte: SOUZA, 2012 (Adaptado).

Segundo a AASTHO (2002), pontes localizadas no sistema de rodovias interestaduais ou rodovias que possuem tráfego mais pesado, deverão ser projetadas com um veículo padronizado HS 20-44 ou por uma carga dupla, conhecida como *Alternate Military Loading*, ilustrado através da Figura 11. Esse carregamento simula veículos militares pesados de dois eixos a 1,22 m de distância, com cada eixo pesando 108,86 kN, sendo utilizado somente em pontes com vãos inferiores a 12 m.

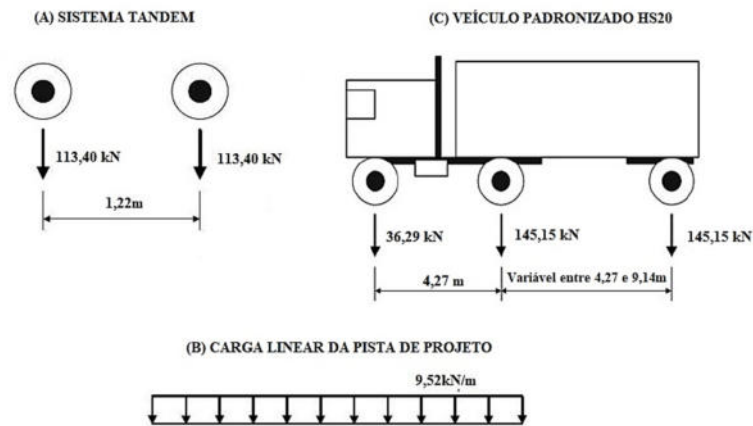
Figura 11 – *Alternate Military Loading*

Fonte: SANTOS, 2003.

Souza (2012) ressalta que apenas um veículo H ou HS pode ser utilizado por faixa de projeto na determinação dos esforços. Alguns estados americanos utilizam o veículo HS25, que consiste em um aumento de 25% sobre a carga do veículo HS20-44 e, além disso, já desenvolveram configurações adicionais para carregamentos móveis, conhecidos como *Permit Desing Loading*.

As cargas móveis em pontes são denominadas pela AASHTO-LRFD (2020) como HL-93, e consistem em uma combinação de um veículo padronizado ou um eixo tandem combinado com uma carga linear de projeto. O veículo padronizado é o HS20 especificado pela AASHTO (2002), como mostra a Figura 12 (C), enquanto o eixo tandem consiste em um par de eixos com uma carga de 113,40 kN por eixo espaçados de 1,22 m, conforme ilustrado na Figura 12 (A). Em ambos os carregamentos o espaçamento transversal entre as rodas deve ser considerado de 1,83 m. A carga de projeto da pista deve ser considerada por uma carga uniformemente distribuída correspondente a 9,52 kN/m, essa carga distribuída é considerada ao longo da direção longitudinal, e transversalmente deve assumir uma largura de 3,05 m, como ilustrado na Figura 12 (B). Os efeitos do veículo padrão e do sistema tandem devem ser sobrepostos com os efeitos do carregamento linear de projeto, de modo que o máximo efeito do carregamento móvel corresponde ao maior valor entre as duas sobreposições.

Figura 12 – Eixo tandem, veículo HS20 e carga linear segundo a AASHTO-LRFD (2020)



Fonte: AASHTO-LRFD, 2012 (adaptado).

Deste modo, o efeito máximo da força para o carregamento móvel a ser utilizado será o maior entre os seguintes:

- o efeito combinado do eixo tandem com a faixa de carga de projeto, ou
- o efeito de um veículo padronizado com a faixa de carga de projeto, e
- para vigas contínuas, tanto para momentos negativos quanto para as reações dos pilares internos, a combinação de 90% do efeito de dois veículos padrão HS20 (espaçados no mínimo 15,24 m entre o eixo dianteiro de um caminhão e o eixo traseiro de outro) combinado com 90% do efeito da faixa de carga de projeto. A distância entre os eixos de 145,15 kN de cada caminhão deve ser de 4,27 m.

Assim como a norma brasileira, a AASHTO considera que as cargas devem ser posicionadas de forma a maximizar o efeito mais desfavorável. O veículo de projeto e o eixo tandem padronizados deverão ser posicionados transversalmente, de modo que o eixo de cada roda carregada possua uma distância mínima de 0,61 m para o guarda-rodas ou a guia.

Segundo as normativas, divide-se o tabuleiro em faixas de projeto, que devem ser determinadas adotando-se a parte inteira da razão estabelecida por meio do uso da Equação 4. Embora a faixa projetada tenha uma largura de 3,66 m, a largura carregada dentro da pista, ocupada transversalmente pelas cargas dentro de uma faixa de projeto, é de 3,05 m em cada faixa de tráfego.

$$Nf = \frac{w}{3,66} \quad (4)$$

onde:

Nf é o número de faixas;

w é a largura da pista, em metros, entre guias ou guarda rodadas.

Dada à baixa probabilidade do carregamento máximo simultâneo em todas as faixas, a AASHTO (2002) admite no artigo 3.12, uma redução no valor da intensidade das cargas móveis aplicadas, de acordo com o número de faixas de cargas existentes. O fator de redução do carregamento máximo a ser adotado varia de acordo com o número de faixas, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Fator de redução para carregamento de múltiplas faixas

Número de Faixas carregadas	Fator de redução
1 ou 2	1
3	0,90
4 ou mais	0,75

Fonte: AASHTO, 2002.

A AASHTO LRFD (2020) apresenta no item 3.6.1.1.2-1 um fator de múltipla presença (m), com valores indicados na Tabela 6, que deve ser aplicado de acordo com o número de faixas de tráfego carregadas.

Tabela 6 – Fatores de múltipla presença

Número de Faixas carregadas	Fator de múltipla presença (m)
1	1,20
2	1,00
3	0,85
4 ou mais	0,65

Fonte: AASHTO LRFD, 2020.

Para o carregamento nos passeios, a AASHTO (2002) determina que a área correspondente aos passeios deverá ser carregada com uma carga uniformemente distribuída variável, decrescente com o vão, conforme expresso na Tabela 7.

Tabela 7 – Carregamento nos passeios

Comprimento do vão (m)	Carga (kN/m ²)
0 a 7,62m	4,07
Acima 7,62m até 30,48m	2,88
Acima de 30,48 m	$q = \left(145 + \frac{4470}{l}\right) \cdot \left(\frac{16,75 - w}{73,93}\right)$

Fonte: AASHTO, 2002.

Na Tabela 7 a expressão de q corresponde a carga distribuída na área, com valor máximo de 2,88 kN/m²; l corresponde ao vão da ponte (em metros), e w a largura do passeio (em metros).

A norma americana possui um coeficiente que considera o efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de coeficiente de impacto ou incremento. O impacto é considerado no cálculo da superestrutura e dos pilares, não sendo utilizado no projeto da infraestrutura. Geralmente, também não se considera o impacto nas faixas de carga e nas cargas provenientes de pedestres (LUCHI, 2006).

O coeficiente de impacto devido à vibração da ponte é definido em função do vão da ponte e , a partir de unidades do sistema internacional (SI), pode ser expresso segundo a Equação 5 (SANTOS, 2003).

$$\varphi = \frac{15,24}{(l + 38,1)} \quad (5)$$

onde:

φ é a fração de impacto ou coeficiente de impacto (máximo 30 por cento);

l é o comprimento do vão carregado para momentos provenientes dos caminhões; comprimento do trecho carregado do vão até o apoio mais distante, para força cortante proveniente de caminhões, em metros.

Para a AASHTO-LRDF (2020), os efeitos estáticos do caminhão de projeto ou tandem, além das forças centrífugas e de frenagem, devem ser aumentados em porcentagens específicas de acordo com o componente estrutural, por meio da tolerância de carga dinâmica (IM). A tolerância de carga dinâmica é definida como um aumento dos efeitos da força estática aplicada para explicar a interação dinâmica entre a ponte e veículos em movimento. Para calcular o efeito total da carga móvel, incluindo efeitos estáticos e dinâmicos, a Equação 6 deve ser utilizada:

$$\varphi = P_{LL+1} = P_{LL} (1 + IM) \quad (6)$$

onde:

P_{LL+1} é o efeito de força devido à carga móvel e a tolerância da carga dinâmica (coeficiente de impacto);

P_{LL} é o efeito de força devido à carga móvel (sem a carga dinâmica), veículo padrão HS20 ou sistema tandem, não é aplicado à carga linear da pista de projeto ou para cargas de pedestre.

IM é a tolerância da carga dinâmica, para os diferentes elementos da ponte, sendo considerado igual a 75% para lajes em todos os estados limites; 15% para todos os outros componentes, nos estados limites de fadiga e fratura e 33% para os demais estados limites.

Segundo Luchi (2006), a norma AASHTO (2002) define algumas combinações de carregamento a serem analisadas, considerando a simultaneidade das ações variáveis. A combinação onde as cargas móveis verticais são predominantes estabelece um coeficiente de ponderação (γ_f) igual a 2,17. Por outro lado, para o mesmo caso de combinações para verificação na ruptura, a *LRFD Specifications* estabelece um coeficiente de ponderação igual a 1,75.

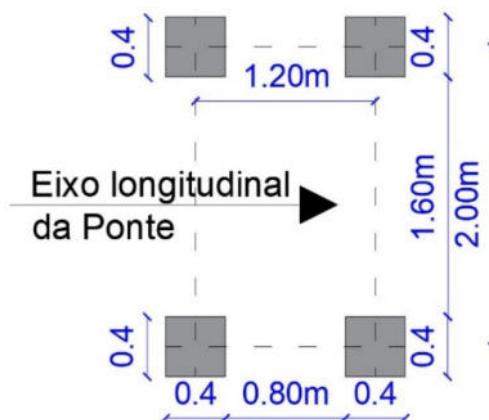
2.2.3 Norma Europeia

Os modelos de carga representam os efeitos de tráfego associados com a verificação dos estados limites últimos e algumas verificações de serviço. O Eurocode 1 (2003) especifica quatro modelos de carga para representar as forças verticais, descritos a seguir e calibrados para pontes de até 200 m de comprimento.

O modelo de carga 1 é constituído por ações provenientes de caminhões e automóveis, que são representados respectivamente por cargas concentradas sobre eixos duplos (sistema tandem), representado na Figura 13, na qual cada eixo pesa $\alpha_Q \cdot Q_K$ e uma carga uniformemente distribuída correspondente a $\alpha_q \cdot q_K$. Esse modelo pode ser utilizado tanto para as verificações locais quanto para as verificações globais. Nestas verificações apenas um sistema tandem deve ser considerado por faixa de tráfego.

Os valores da força concentrada e carga distribuída característica Q_{iK} e q_{iK} , respectivamente, são dados por meio da Tabela 8, e devem ser ajustados através dos coeficientes de adaptação α_Q e α_q fixados nas normas de cada país, devendo ser respeitados os limites de $\alpha_{Qi} \geq 0,8$ e $\alpha_{qi} \geq 1$, para $i \geq 2$, onde (i) representa o número de faixas. Na ausência de indicações específicas, esses fatores são considerados iguais a 1. Nas faixas remanescentes esses coeficientes são desprezados.

Figura 13 – Sistema tandem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 8 – Valores característicos, Modelo de carga 1

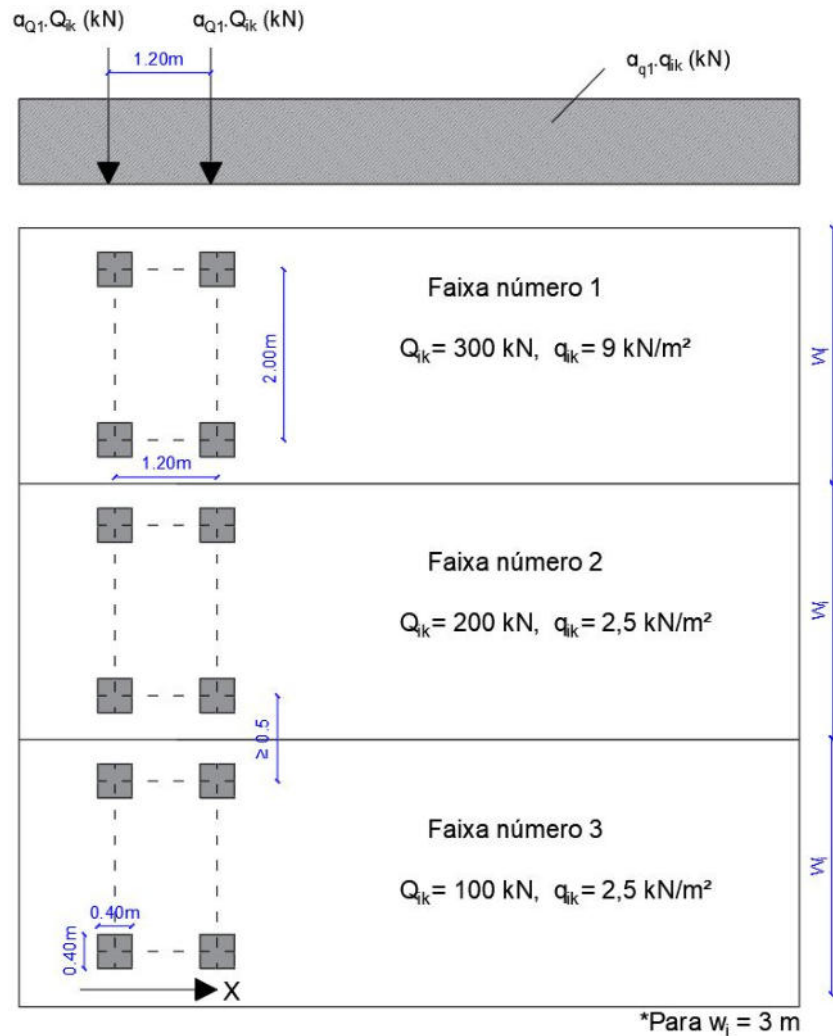
Posição	Sistema tandem – Carga por eixo Q_K (kN)	Carga uniformemente distribuída q_K (kN/m ²)
Faixa 1	300	9,00
Faixa 2	200	2,50
Faixa 3	100	2,50
Demais faixas	0	2,50
Área remanescente	0	2,50

Fonte: Eurocode 1, 2003.

Esse modelo de carga deve ser aplicado de acordo com algumas considerações, esquematizadas na Figura 14, onde cada faixa é carregada de acordo com as recomendações da Tabela 8. As cargas dos eixos duplos são diferentes em cada faixa de tráfego unitária, equivalentes a 600 kN na faixa 1, 400 kN na faixa 2 e 200 kN na faixa 3. Para as cargas uniformemente distribuídas, adota-se o valor de 9 kN/m² para faixa 1 e 2,5 kN/m² para as demais faixas.

Deve-se ainda atender a seguinte recomendação, quando dois sistemas tandem são posicionados de forma adjacente suas distâncias entre eixos de roda não devem ser inferiores a 0,50 m.

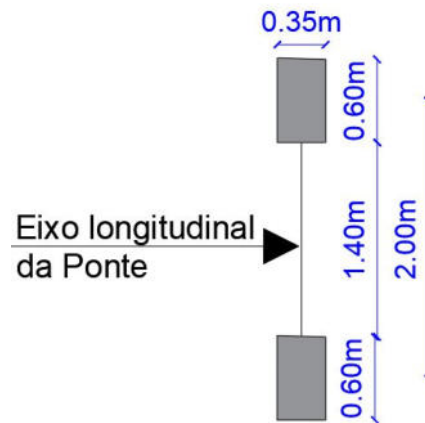
Figura 14 – Exemplo de aplicação de Modelo de carga 1.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O modelo de carga 2 consiste em uma carga de eixo simples $\beta_Q \cdot Q_{AK}$, com Q_{AK} igual a 400 kN, sendo considerado nesse carregamento o efeito de amplificação dinâmica (coeficientes de impacto). A menos que seja especificado, o valor do coeficiente β_Q deve ser considerado de mesmo valor que α_Q . Esse modelo é utilizado normalmente para elementos com vãos muito pequenos, devendo ser aplicado em direção longitudinal ao eixo da ponte e em qualquer lugar da faixa de tráfego. No entanto, quando relevante, pode ser levado em conta somente o efeito de uma roda de $\beta_Q \cdot 200 \text{ kN}$, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Modelo de carga 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Luchi (2006) comenta que as áreas de contato dos modelos de carga 1 e 2 são distintas, correspondentes a diferentes modelos de pneus, arranjos e distribuição de pressões. As áreas de contato do modelo 2 são equivalentes a dois pneus adjacentes, e são relevantes no caso de tabuleiros ortotrópicos.

O modelo de carga 3 consiste em veículos especiais para trechos altamente carregados, devendo ser considerado somente quando solicitado, podendo ser aplicado um ou mais veículos especiais no tabuleiro. Esses veículos especiais são representados por oito modelos, com variações da distância entre eixos e do peso total, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelo de Carga 3: carregamento e geometria.

Peso Total (kN)	Eixo de 150 kN			Eixo de 200 kN		
	Geometria (m)	Carga por eixo (kN)	Tipo do Veículo	Geometria (m)	Carga por eixo (kN)	Tipo de Veículo
600	3 x 1,5	4 x 150	600/150			
900	5 x 1,5	4 x 150	900/150			
1200	7 x 1,5	4 x 150	1200/150	5 x 1,5	6 x 200	1200/200
1500	9 x 1,5	4 x 150	1500/150	7 x 1,5	1 x 100 + 7x200	1500/200
1800	11 x 1,5	4 x 150	1800/150	9 x 1,5	9 x 200	1800/200
2400				11 x 1,5		2400/200
2400				5 x 1,5 + 12 + 5 x 1,5	12 x 200	2400/200/200
3000				14 x 1,5	15 x 200	3000/200
3000				7 x 1,5 + 12 + 6 x 1,5	15 x 200	3000/200/200
3600				17 x 1,5	18 x 200	3600/200
Eixo de 240 kN						
	Geometria (m)		Carga por eixo (kN)		Tipo de Veículo	
2400	8 x 1,5		10 x 240		2400/240	
3000	12 x 1,5		1 x 120 + 12 x 200		3000/240	
3600	14 x 1,5		15 x 240		3600/240	
3600	7 x 1,5 + 12 + 6 x 1,5		15 x 240		3600/240/240	

Fonte: Eurocode 1, 2003 (adaptado).

O modelo de carga 4 consiste em uma carga de multidão, e deve ser representada por uma carga uniformemente distribuída correspondente a 5 kN/m², já incluso o efeito dinâmico das cargas móveis. Esse modelo deve ser aplicado em todas as partes relevantes do comprimento e largura da ponte, incluindo os refúgios centrais, quando necessário.

Para a aplicação dos modelos de cargas estabelecidos pela norma, a faixa de tráfego do tabuleiro é dividida em faixas de tráfego de cálculo (n), de acordo com as dimensões do tabuleiro (w) que deve ser medida entre os meios fios ou entre os limites dos sistemas de retenção do veículo. Geralmente cada faixa tem 3 m de largura, conforme mostra a Tabela 10. Essas faixas são numeradas de acordo com os seus respectivos carregamentos, sendo aquelas com os efeitos mais desfavoráveis numeradas como faixa 1. Após a divisão do tabuleiro, a área

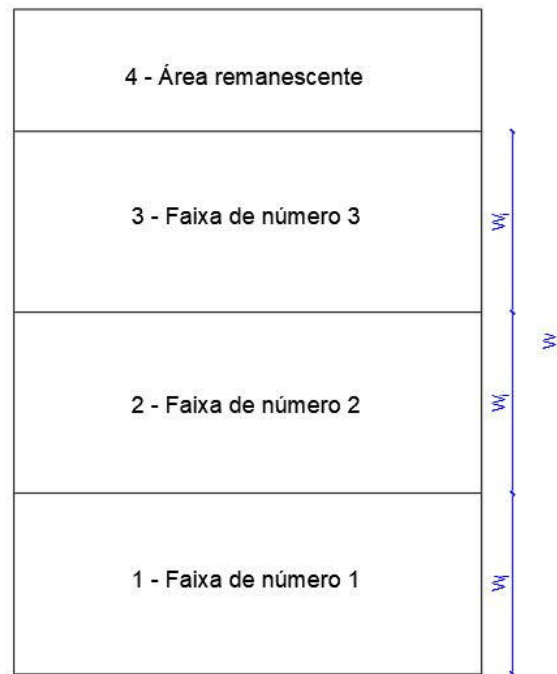
remanescente é distribuída ao longo do tabuleiro entre as faixas de tráfego, como mostra a Figura 16.

Tabela 10 – Número e largura de faixas de tráfego

Largura trafegável (w)	Número de faixas de tráfego (n)	Largura de faixas de tráfego fictícias (w1)	Largura de área remanescente
$w < 5,4\text{m}$	1	3,00 m	$w - 3,00\text{ m}$
$5,4\text{ m} \leq w < 6\text{ m}$	2	(w/2)	0
$6\text{ m} \leq w$	Inteiro (w/3)	3,00 m	$w - n \times 3$

Fonte: Eurocode 1, 2003.

Figura 16 – Exemplo de numeração de faixas de tráfego



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De forma distinta das normas brasileira e americanas estudadas, na norma europeia o efeito do carregamento móvel é considerado nos valores de carga previstos para os modelos de carga adotados pela *Eurocode 1* (2003). De acordo com Santos (2003), para o estado limite último, são estabelecidos os mesmos coeficientes de ponderação utilizados pela NBR 8681:2003, onde para as cargas permanentes é utilizado um coeficiente de ponderação igual a 1,35 e para as cargas móveis o coeficiente de ponderação é igual a 1,5.

2.3 CONCESSÕES DE TRÂNSITO E NORMAS DE TRANSPORTE DE CARGA

No momento em que veículos, com ou sem carga, excedem as dimensões regulamentares fixadas pelas resoluções do CONTRAN, surge a necessidade da concessão de

uma autorização para que estes possam percorrer as rodovias, sejam elas federais, estaduais ou municipais. Essas concessões são conhecidas como autorização especial de trânsito (AET).

A Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997, dispõe que as concessões de autorizações de trânsito só poderão ser proporcionadas pela autoridade com circunscrição sobre a via, seja ela de autarquia federal, estadual ou municipal, conforme exarado no seu Art. 101:

“Ao veículo ou combinação de veículos utilizado no transporte de carga indivisível, que não se enquadre nos limites de peso e dimensões estabelecidos pelo CONTRAN, poderá ser concedida, pela autoridade com circunscrição sobre a via, autorização especial de trânsito, com prazo certo, válida para cada viagem, atendidas as medidas de segurança consideradas necessáriasFonte bibliográfica inválida especificada..”

A resolução DNIT n.º 1 de 2020 refere-se à regulamentação do uso de rodovias federais para transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões. A esse respeito, o Art. 1º da supracitada resolução estabelece:

“Esta Resolução regulamenta o uso de rodovias federais por veículos ou combinações de veículos e equipamentos, destinados ao transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões ao limite estabelecido nas legislações vigentes, para o conjunto de veículo e carga transportada, assim como por veículos especiais, fundamentado nos Art. 21 e 101 da Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997, conhecido como Código de Trânsito Brasileiro - CTB e Resolução n.º 520, de 29 de janeiro de 2015, do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN (BRASIL,2020).”

As normas asseguram características desejáveis a produtos e serviços, como qualidade, segurança e eficiência, sendo assim, a ausência de normatização acarretaria em muitos problemas relacionados a falta de regulamentação. Diante disso, foram estabelecidas normas para efetivação do transporte de cargas nas rodovias, uma vez que a falta de regulamentação para uso das vias acarretaria em má utilização pelos usuários, reduzindo desde modo a vida útil e trazendo prejuízos à segurança estrutural.

A resolução DNIT n.º 11 de 2005 regulamenta a utilização das rodovias federais por veículos ou combinações de veículos e equipamentos. Esses veículos ou combinações de veículos são designados para o transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões aos limites estabelecidos nas legislações vigentes, para o conjunto veículo e carga transportada, assim como por veículos especiais. Esses limites são fundamentados no Art. 101 do Código de Trânsito Brasileiro - CTB, que deve ser observado juntamente com as resoluções do Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN - e as normas específicas. Na ausência de alguma especificação que trate do assunto devem ser observadas as normas internacionais pertinentes.

São definidos a seguir termos que serão utilizados ao longo do texto, conforme Art. 4 da resolução DNIT n.º 1:

- a) Carga indivisível: uma carga unitária com peso e/ou dimensões excedentes aos limites regulamentares, cujo transporte requeira o uso de veículos especiais com lotação, dimensões, estrutura, suspensão e direção apropriadas. São exemplos de carga indivisível: máquinas, equipamentos, peças entre outros;
- b) Carga composta de mais de uma unidade indivisível: é a carga constituída de duas ou mais unidades de cargas indivisíveis;
- c) Veículo trator ou de tração: é o veículo automotor projetado e fabricado para tracionar ou arrastar veículo reboque e semirreboque e/ou equipamento;
- d) Veículo reboque ou semirreboque: é o veículo de um ou mais eixos a ser engatado a um veículo trator ou que se apoia ou que está ligado por meio de articulação a sua unidade tratora;
- e) Conjunto transportador: é o veículo ou combinação de veículos, com exceção das Combinações Veiculares de Carga - CVC regidas pela resolução n.º 211/2006-CONTRAN, ou outra que venha a substituí-la, acrescido da carga;
- f) Veículo especial: é aquele construído com características específicas, destinado ao transporte de cargas indivisíveis excedentes em peso e/ou dimensões, assim como os dotados de equipamentos para prestação de serviço especializado, que se configurem como carga permanente, tais como: guindastes, máquinas perfuratrizes entre outros.

A resolução CONTRAN n.º 211 de novembro de 2006 tem por objetivo definir as condições necessárias para a circulação de Combinações de Veículos de Carga - CVC. Essa resolução define no seu Art.1º que as CVCs que possuam mais de duas unidades, incluindo a unidade tratora, com peso bruto total acima de 57 toneladas ou com seu comprimento total acima de 19,80 m, só poderão circular portando Autorização Especial de Trânsito - AET (BRASIL, 2006).

De acordo com o Art. 9º da resolução DNIT n.º 1 de 2020, se o PBT do reboque ou semirreboque for igual ou superior a 288,0 t deverá ser realizado um estudo de verificação estrutural de todas as OAEs que serão transpostas pelo conjunto transportador, mas nos casos em que o PBT do reboque ou semirreboque for igual ou superior a 150 t e inferior a 288 t, a AET deverá ser submetida à análise de setor competente.

2.4 AUTORIZAÇÃO ESPECIAL DE TRÂNSITO (AET)

A AET corresponde a um documento expedido pelo DNIT, destinada a veículo ou combinação de veículos utilizados no transporte de carga especial ou indivisível, que não se enquadrem nos limites de peso e dimensões estabelecidos pelo CONTRAN.

Para emissão de uma AET, é necessária a consulta de viabilidade às Superintendências Regionais do DNIT - realizada via Sistema de Gerenciamento de Autorização Especial de Trânsito -SIAET, conforme descrito no Art.15 da resolução DNIT n.º 1 de 2020:

“Art.15. O pedido da concessão de Autorização Especial de Trânsito – AET para conjunto transportador ou veículo especial, cujo Peso Bruto Total Combinado – PBTC ou dimensões ultrapassem qualquer dos limites abaixo discriminados, deverá ser submetido à consulta de viabilidade, das Superintendências Regionais do DNIT – SRE/DNIT e das empresas concessionárias, que terão prazo de até 3 (três) dias úteis para a manifestação sobre a transitabilidade ou não do transporte:

I – Largura de 4,5m;

II – Altura de 5,3m;

III – Comprimento de 30m;

IV – PBTC de 100t.

O Sistema de Gerenciamento de Autorização Especial de Trânsito - SIAET - é um sistema informatizado de prestação de serviços on-line, elaborado para solicitação, análise e expedição de AETs, fornecendo-as diretamente pela internet ou intermediando o processo de solicitações que necessitam de estudo de viabilidade. Os utilizadores deste sistema, sejam eles transportadores, embarcadores e público em geral, junto ao DNIT, são denominados usuários externos (DNIT, 2020).

O SIAET disponibiliza as resoluções para cada tipo de carga em relação à qual seja solicitada uma AET, a saber, DNIT (2020):

- Resolução n.º 577/81;
- Resolução n.º 12/98;
- Resolução n.º 68/98;
- Resolução n.º 75/98;
- Resolução n.º 82/98;
- Resolução n.º 11/04 em substituição a resolução 2264/82.

2.4.1 Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte

Atualmente, o DNIT possui um Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais - SGO, onde armazena os dados do estoque de obras sob sua administração. O SGO conta com funções úteis na identificação das necessidades das estruturas e no estabelecimento das prioridades. Deste modo, a alocação de recursos e o estabelecimento de uma política de manutenção podem ser realizados à luz de critérios objetivos.

O SGO envolve uma série de procedimentos e rotinas, tendo como exemplo: levantamento de dados cadastrais, dados relativos às condições de segurança e de conservação das pontes, registros fotográficos, vídeos, croquis e a atualização permanente dos dados.

A avaliação da estrutura é realizada em uma inspeção rotineira, onde uma nota é atribuída a cada um dos elementos da estrutura. Essa nota, também chamada de nota técnica, varia de 1 a 5, conforme o grau de deterioração do elemento. Desta maneira, quanto mais graves são os problemas encontrados no elemento, menor é a sua nota técnica. A nota 1 é reservada aos elementos com função estrutural em estado crítico. Os demais elementos são avaliados com notas técnicas entre 2 a 5.

Todos os elementos de uma OAE recebem a sua respectiva nota técnica em função dos danos constatados durante a inspeção rotineira. A estrutura como um todo é avaliada com base nas notas técnicas recebidas por seus elementos individualmente, de modo que a nota técnica da OAE corresponde à menor nota técnica recebida pelos seus elementos com função estrutural, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação das Obras de Arte Especiais (SGO)

Nota	Danos no elemento/insuficiência estrutural	Ação corretiva	Condições de estabilidade	Classificação das condições da ponte
5	Não há dano nem insuficiência estrutural	Nada a fazer.	Boa	Obra sem problemas
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural.	Nada a fazer, apenas serviços de manutenção.	Boa	Obra sem problemas importantes
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra.	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, nesse caso, colocar-se o problema em observação sistemática.	Boa aparentemente	Obra potencialmente problemática Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo.	Sofrível	Obra problemática
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte, o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) – ou em alguns casos substituição da obra – deve ser feita sem tardar.	Precária	Obra crítica Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação de a obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial do tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações etc.

Fonte: DNIT, 2014.

2.4.2 Estudo de Viabilidade Estrutural

O estudo de viabilidade estrutural - EVE - corresponde ao estudo da capacidade portante das obras de arte presentes ao longo de um determinado itinerário, destinado à passagem de carga indivisível excedente em peso, considerando o estado de conservação e as características estruturais das obras de artes especiais obtidas de projeto e memorial de cálculo (DER, 2016).

No EVE é apresentada a verificação da análise estrutural das OAEs, que ocorre por meio da comparação dos esforços provocados pelo trem-tipo especial com os provocados pelo trem-tipo de projeto e seus respectivos coeficientes de segurança, considerando-se a versão da norma correspondente à época de projeto da OAE.

De acordo com o Art.º 9 da resolução DNIT n.º 1 de 2020, para transposição de OAE, na situação em que o PBT do reboque ou semirreboque for igual ou superior a 288 t (duzentos e oitenta e oito toneladas), deverá ser submetido à análise da Coordenação Geral de Desenvolvimento e Projetos - CGDESP/DPP - um Estudo de Viabilidade Estrutural - EVE - de todas as Obras de Arte Especiais - OAEs - que constam ao longo do itinerário a ser percorrido. O EVE deverá ser executado por empresa especializada de engenharia e todas as despesas decorrentes do estudo caberão ao interessado no transporte. Para estas situações, o EVE deverá ser composto de:

- Croquis do conjunto transportador;
- Descrição das características do Conjunto transportador;
- Descrição do Percurso;
- Relação das Obras de Arte Especiais;
- Vistoria das obras de arte;
- Verificação estrutural;
- Tabela de resultados;
- Conclusão/Recomendações;
- Anotação de Responsabilidade Técnica – ART.

Para os casos nos quais a Superintendência Regional do DNIT julgue a estrutura da OAE como crítica, recomenda-se que essa Superintendência comunique a Coordenação Geral de Operações Rodoviárias - CGPERT, para que essa permita à empresa transportadora apresentar um EVE específico para a passagem do conjunto transportador nas obras que apresentem risco estrutural, caso a empresa opte pela passagem sobre essas estruturas.

No contexto da composição dos EVE, o relatório de vistoria deverá conter a localização georreferenciada das obras e os levantamentos das características geométricas, estruturais (tipo de estrutura, trem-tipo obtido mediante levantamento dos projetos originais ou de outros meios aceitáveis) e do estado de conservação de todas as OAEs, devendo ser assinado por engenheiro civil. As vistorias das OAEs deverão ser realizadas seguindo as recomendações do Manual de Normas de Procedimento - PRO n.º 010 de 2004, admitindo-se uma validade de 12 meses para essas vistorias, desde que não haja registro de eventos estruturalmente relevantes nas OAEs durante este prazo (BRASIL, 2020).

Os croquis do conjunto transportador compreendem o desenho ilustrando a geometria do veículo somado à carga, detalhando largura, altura, comprimento, distribuição de pesos por eixo e as distâncias entre os eixos, devendo ser fornecido pelo contratante do estudo de

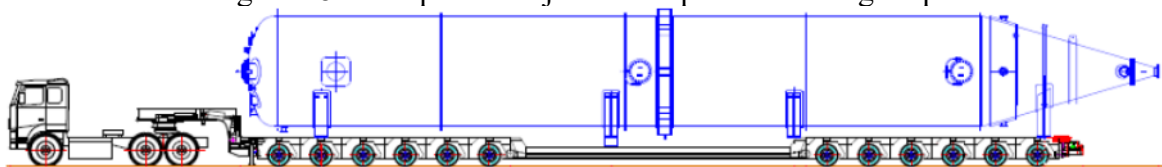
viabilidade e assinado por engenheiro mecânico. A Figura 17 e a Figura 18 ilustram um carregamento especial, constituído por um vaso de pressão que, devido ao peso e dimensões excessivos em relação aos valores permitidos pelas resoluções do CONTRAN, necessitou de um estudo de rota para viabilização do transporte, no qual foi mapeado todo o percurso do transporte e as obras que deveriam ser transpostas pelo conjunto.

Figura 17 – Conjunto transportador de carga indivisível.



Fonte: DNIT, 2014.

Figura 18 – Croqui de conjunto transportador e carga especial



It	Descrição do Conjunto Transportador	Quantidade	Dimensões para Transporte (mm)			PBT Combinado (kg)
			Comp.	Larg.	Alt.	
1	Cav.6x4 + 06LE x 2 c/ Plataforma + V-49-01 (Carga)	1,00	42.000	4.900	5.700	110.500

Fonte: DNIT, 2014.

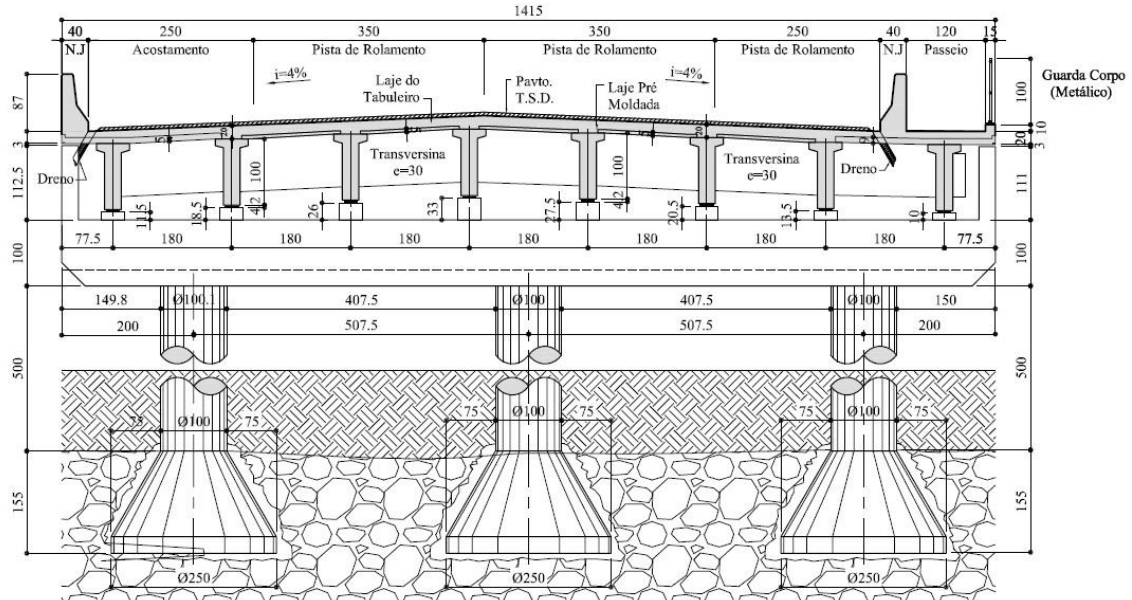
Nas conclusões/recomendações apresenta-se o posicionamento quanto à viabilidade do transporte, acompanhado das recomendações e providências a serem executadas durante a operação do transporte, tais como velocidade, posicionamento do veículo com relação ao eixo da estrutura, entre outras especificações contidas no Art.10 da resolução DNIT n.º 11, de outubro de 2004 e no Anexo A da NBR 7188:2013.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as etapas, técnicas e normas utilizadas, visando alcançar os objetivos propostos descritos no item 1.

A primeira etapa referiu-se ao estudo das normativas brasileira, americanas e europeia. Foram avaliados os efeitos dos carregamentos móveis descritos nas respectivas metodologias descritas nas normas nacional, americana e europeia para a ponte sobre o rio Croatá. Esta ponte está localizada na BR-423/AL, no município de Canapi/AL. A escolha desta ponte deve-se a disponibilização por meio DNIT/AL dos respectivos projetos e memorial de cálculo, e ainda ao fato da autora deste texto ter tido contato com a obra de implantação da rodovia que contemplou a sua construção, realizada durante o segundo semestre do ano de 2017 e primeiro semestre do ano de 2018. Trata-se de uma ponte de concreto armado com um total de 31,97 m de comprimento longitudinal, e um vão transversal de 14,15 m. O vão transversal da superestrutura é composto por duas defensas de New Jersey, um passeio, dois acostamentos e duas faixas de tráfego com 3,5 m de extensão cada, como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Seção transversal da ponte sobre o rio Croatá



Fonte: DNIT, 2018.

A análise dos esforços gerados pela passagem dos carregamentos móveis é proposta a fim de que se possa avaliar concomitantemente os efeitos dos momentos fletores e esforços cortantes na ponte em estudo, considerando os carregamentos de projeto descritos nas normativas estudadas.

Em seguida, foi realizada a análise da influência do coeficiente de impacto descritos nas NBR 7187:2021 e 7188:2013 e AASHTO (2002 e 2020) e Eurocode 1 (2003) na verificação de solicitação máxima para elaboração das AETs concedidas pelo DNIT.

A segunda etapa refere-se à construção do modelo da ponte selecionada, utilizando o software de elementos finitos Csi Bridge® que é uma extensão do SAP2000®, voltada para análise de pontes. A modelagem por meio do método dos elementos finitos é proposta pelo fato desse método, em comparação aos métodos analíticos usuais, apresentar resultados mais exatos, tendo em vista que este método permite abordagem mais aproximada do comportamento real da estrutura, por considerar menos simplificações que a verificação analítica durante o processo de cálculo. Após a criação do modelo e a definição das cargas permanentes atuantes na superestrutura, o modelo foi calibrado e validado segundo as informações fornecidas no projeto. O modelo foi elaborado com o intuito de obter os resultados dos esforços gerados pelos trens-tipo estabelecidos por cada norma, em acordo com suas respectivas prescrições.

Assim, com os valores dos esforços máximos, foram avaliadas as diferenças de solicitações ocasionadas pelas ações dos trens-tipo, considerando as normas internacionais e a norma brasileira, aferindo-se as diferentes solicitações geradas entre os veículos de projeto.

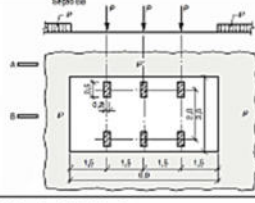
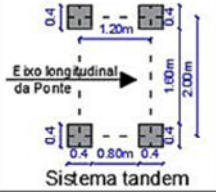

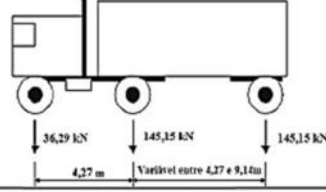
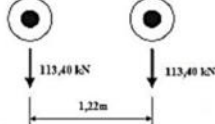
Na terceira etapa, foram determinados os valores dos Fatores de Segurança – FS, os quais são essenciais durante as concessões das Autorizações Especiais de Trânsito – AET. As AETs especificam a necessidade de elaboração do EVE para trem-tipo especial superior a 288 t, requerendo-se os resultados dos esforços gerados pelo trem-tipo de projeto e pelo trem-tipo especial de carga para determinação dos FSs. Os FSs estão relacionados à razão das combinações do Estado Limite Último - ELU - das cargas de projeto, descritos nas normas durante o processo de concepção da superestrutura, e o carregamento especial que se pretende avaliar. Neste trabalho, foram considerados o veículo especial descrito no exemplo fornecido pelo DNIT, item 3.5, e o veículo especial descrito pela NBR 7188:2013 utilizado a fim de complementar a verificação.

3.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS ESTUDADAS

As normas NBR 7188:2013, AASTHO (2002) e AASHTO-LRFD (2020) definem um trem-tipo específico, que são ponderados por coeficientes, a fim de contemplar o efeito das cargas dinâmicas. Entretanto, a norma Eurocode 1 (2003) propõe quatro modelos de carga, destinados a estabelecer os efeitos de tráfego de veículos, no qual o efeito das cargas dinâmicas já é contemplado nos modelos de carga, associados com as verificações de estado limite último e algumas verificações de serviço.

Elaborou-se a Tabela 12 para comparar algumas características estabelecidas nas normas supracitadas.

Tabela 12 – Comparação entre as normas.

Norma	Veículo	Peso total	Geometria/Arranjo
NBR 7188:2013	TB - 450	450 kN	
Considerar uma carga uniformemente distribuída de 5kN/m ² .			
Eurocode 1 (2003)	Modelo de carga 1	Sistema tandem - Carga por eixo e uniformemente distribuída	 <p>A carga por eixo e a uniformemente distribuída varia de acordo com a faixa de tráfego. $Q_k \text{ max} = 300 \text{ kN}$ $q_{ik} \text{ max} = 9 \text{ kN/m}^2$</p>
	Modelo de carga 2	Carga por eixo simples - 400 kN	 <p>Caso necessário pode ser considerado apenas uma roda com uma carga de 200 kN.</p>
	Modelo de carga 3	Veículos Especiais $600 \text{ kN} \leq p \leq 3600 \text{ kN}$	A geometria do veículo varia de acordo com a carga por eixo, existindo eixos com: 150 kN, 200 kN, e 240 kN.
	Modelo de carga 4	Carga de multidão	Consiste em uma carga uniformemente distribuída, incluindo o efeito dinâmico das cargas moveis, de 5 kN/m ² .
Para obter a carga de projeto o Eurocode 1 (2003) divide o trecho trafegável em faixas de projeto, de acordo com a dimensão do tabuleiro, geralmente com 3 m.			
AASHTO - LRFD (2020)	Caminhão HS 20 - 44 + Carga distribuída	327 kN + 9,52 kN/m	
	Sistema tandem + Carga distribuída	113,40 kN + 9,52 kN/m	
Considerar uma carga distribuída de 9,52 kN/m.			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A simulação da introdução dos carregamentos relativos aos trens-tipo descritos nas normas brasileira, americana e europeia, indicados na Tabela 12 sobre a ponte do rio Croatá, foi realizada por meio do programa de elementos finitos Csi Bridge[®], obtendo-se os valores dos momentos fletores e esforços cortantes. Com os esforços solicitantes, foi elaborada uma tabela resumo, com uma análise comparativa dos valores dos esforços gerados por cada trem-tipo

verificado. Os resultados obtidos servem como base para mensurar a proporção da diferença dos modelos de veículos de projetos adotados pelas normas e, com isso, concluir se a norma brasileira possui padrões de prescrições de esforços de carregamento para elaboração de OAE equivalentes às normas estrangeiras estudadas.

Por fim, a verificação estrutural da ponte sobre o rio Crotá foi realizada aplicando-se as equações descritas no item 3.2 para a obtenção de FS. Fez-se uso dos carregamentos descritos no item 3.4, para as normas supracitadas, e dos carregamentos especiais de 362 t (TTE-312) descrito no item 3.5, denominado carregamento especial DNIT, complementado com o descrito na NBR 7188:2013 de 512 t (TTE-512). Esta verificação objetivou a obtenção dos fatores de segurança referentes à passagem dos carregamentos especiais, segundo as verificações de segurança estabelecidas para elaboração de AETs, em acordo com as especificações do DNIT.

3.2 OBTENÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA

Os coeficientes de ponderação são aplicados aos valores característicos obtidos pela ação das cargas permanentes e das cargas móveis, durante a verificação do estado limite último da ponte, juntamente com o coeficiente de impacto, o qual pondera o efeito estático do carregamento móvel de projeto, considerando a ação do carregamento móvel na estrutura como uma “carga estática equivalente”.

Segundo os critérios estabelecidos pelo DNIT (2016), objetivando a segurança estrutural da OAE, devemos garantir algumas condições de verificação de segurança de acordo com os seus respectivos trens-tipo estabelecidos durante a sua concepção. O fator de segurança é estabelecido por meio da razão entre o estado limite último – ELU - da carga móvel de projeto e o ELU da carga móvel do veículo especial, sendo que essa razão deve ser superior a um.

Para as OAE estabelecidas pelo trem-tipo com 36 t, a verificação será estabelecida pelas Equações 7 e 8:

$$1,4.S_g + 1,4.\varphi.S_q \geq 1,25.S_g + 1,20.S_{qe} \quad (7)$$

ou

$$FS = \frac{1,4.S_g + 1,4.\varphi.S_q}{1,25.S_g + 1,20.S_{qe}} \geq 1 \quad (8)$$

Para as OAE estabelecidas pelo trem-tipo com 45 t, a verificação será estabelecida pelas Equações 9 e 10:

$$1,35.S_g + 1,5.\varphi.S_q \geq 1,25.S_g + 1,20.S_{qe} \quad (9)$$

ou

$$FS = \frac{1,35.S_g + 1,5.\varphi.S_q}{1,25.S_g + 1,20.S_{qe}} \geq 1 \quad (10)$$

onde:

FS é o fator de segurança;

S_g são as solicitações devidas às cargas permanentes;

S_q são as solicitações devidas às cargas móveis ou acidentais de projeto;

S_{qe} são as solicitações devidas a carga especial;

φ é o coeficiente de impacto, relacionado ao ano de concepção da estrutura.

O coeficiente de ponderação para as ações permanentes (γ_g) presente na combinação última das cargas de projeto para obtenção do FS, definido nas Equações 9 e 10, pode ser reduzido de 1,35 para 1,30 segundo as prescrições da NBR 8681:2003, ficando a critério do projetista qual o valor de coeficiente a ser adotado.

Pode-se observar que para as combinações de FS, descritas nas Equações 7, 8, 9 e 10, relativamente às solicitações devidas a carga especial, o coeficiente de impacto (φ) não é aplicado para ponderar os efeitos desse carregamento especial. Isto se deve ao fato destes carregamentos serem aplicados segundo as prescrições presentes no Anexo A da norma brasileira NBR 7188:2013, a qual determina algumas prescrições de operação quando da transposição de obras de arte especiais, desprezando na verificação estrutural os efeitos de carga distribuídas, vento, impacto vertical, frenagem, forças centrífugas e ações excepcionais descritas na norma.

3.3 MODELAGEM DA PONTE

Distintos fenômenos em engenharia e ciências podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais, de modo que solucionar estas equações através de métodos analíticos clássicos para geometrias arbitrárias é praticamente impossível. O método dos elementos finitos (MEF) pode ser definido como uma aproximação numérica na qual as equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado (FISH; BELYTSCHKO, 2009). Durante a discretização mantêm-se as propriedades originais do elemento. Este método é aplicado na resolução de problemas de análise estrutural por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões. Possibilita ainda a verificação do desempenho da estrutura relativa à resistência, rigidez ou fadiga. O MEF também permite que sejam realizadas análises térmicas, acústica, dinâmica, eletromagnética.

Segundo Rezende *et al.* (2006), a modelagem numérica de um sistema físico qualquer consiste em simulá-lo por meio de uma aproximação matemática. Faz-se uso de um conjunto de elementos finitos inter-relacionados, os quais representam de maneira satisfatória o sistema de interesse.

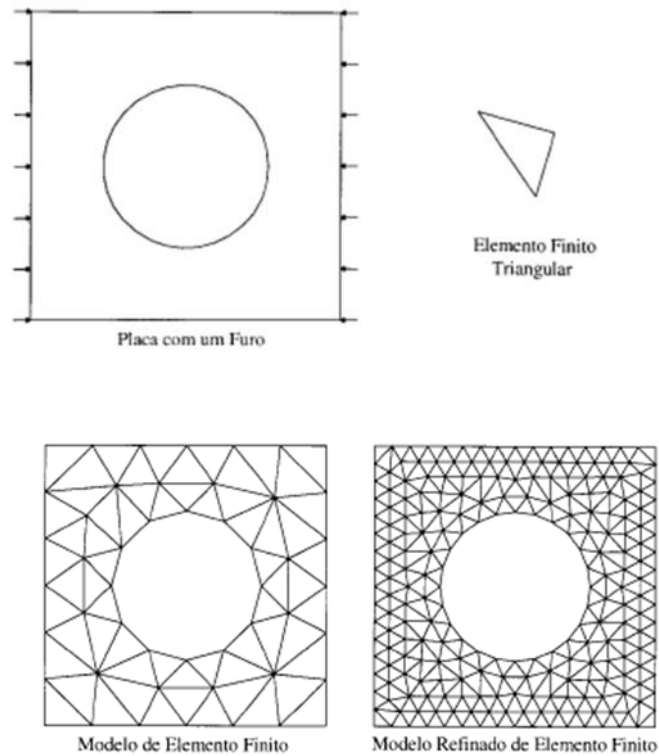
A finalidade da análise de elementos finitos segundo Kim e Sankar (2011) *apud* Cavalcante (2016), é determinar a resposta por meio de deslocamentos e tensões de determinada estrutura para um definido conjunto de cargas e condições de contorno. Corresponde a um procedimento de análise onde a estrutura – sua geometria, propriedades do material, condições de contorno e cargas – é bem definida com o objetivo de determinar a sua resposta.

O MEF em síntese trata o problema contínuo como discreto. No problema contínuo a subdivisão do corpo é continuamente indefinida e o problema é estudado apenas por uma abstração matemática de um infinitesimal, gerando equações diferenciais complexas. Já no problema discreto, objetiva-se dividir o corpo em um número finito de variáveis, nos quais se aplicam conceitos numéricos a fim de se atingir as respostas (CAVALCANTE, 2016).

A ideia básica do MEF é dividir o corpo em elementos finitos, geralmente denominados apenas por elementos, unidos por nós, e obter uma solução. Na Figura 20 pode-se observar a geração da malha de elementos finitos, esse processo ocorre a partir da discretização da estrutura em elementos finitos que podem assumir diversas geometrias, a exemplo das geometrias triangular ou retangular. Dessa forma, é gerada uma malha de elementos finitos, que por sua vez pode ser refinada aumentando-se o número de elementos da malha ou alterando a geometria dos elementos finitos, a fim de se obter resultados mais exatos que convergem para a solução aproximada do problema real (FISH; BELYTCHKO, 2009).

A malha representa a união das subdivisões dos elementos, desse modo a eficiência da malha dependerá da adaptação do refinamento feito. O refinamento é uma importante etapa, pois define como será a subdivisão dos elementos, de modo que sua boa execução irá influenciar na qualidade da malha (GIL, 2015).

Figura 20 – Geometria, cargas e malha.

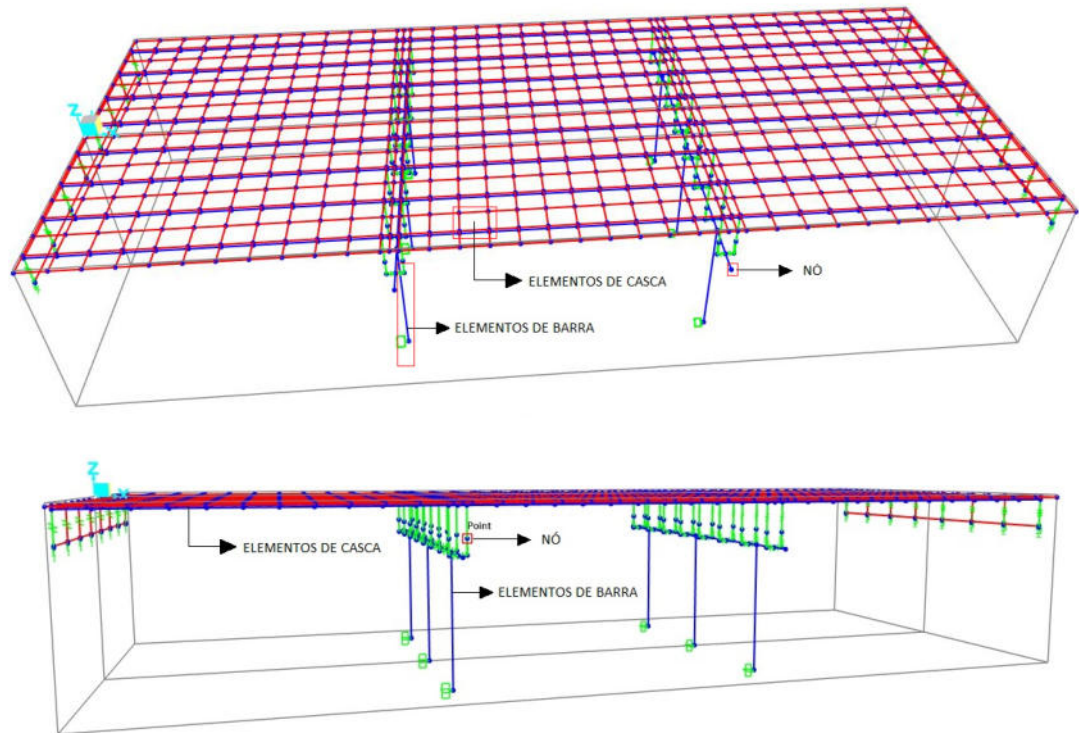


Fonte: Fish e Belytshko, 2009.

Segundo Cavalcante (2016), a utilização do MEF é justificada por se tratar de uma análise com menos simplificações e gerar resultados mais realistas que os modelos de grelha, pórtico e associações grelha-pórtico. Neste estudo, o MEF é aplicado para realizar a análise estrutural de uma ponte, a partir dos carregamentos aplicados na superestrutura por meio dos trens-tipo de projetos, obtendo-se os deslocamentos e os esforços internos solicitantes. Discretiza-se a estrutura da ponte em elementos de barras e cascas como ilustra a Figura 21. O modelo de barras é aplicado para obtenção dos esforços nas longarinas, enquanto o modelo de cascas é aplicado na modelagem do tabuleiro.

Segundo o *CSi Analysis Reference Manual* (2013), o elemento de barra ou pórtico (*frame element*) é um componente que pode ser usado para modelar vigas, pilares e treliças em um plano bidimensional ou tridimensional. O elemento de casca ou *shell element* é um tipo de objeto de área que é usado para discretizar membranas, placas e cascas planas ou tridimensionais.

Figura 21 – Discretização da ponte



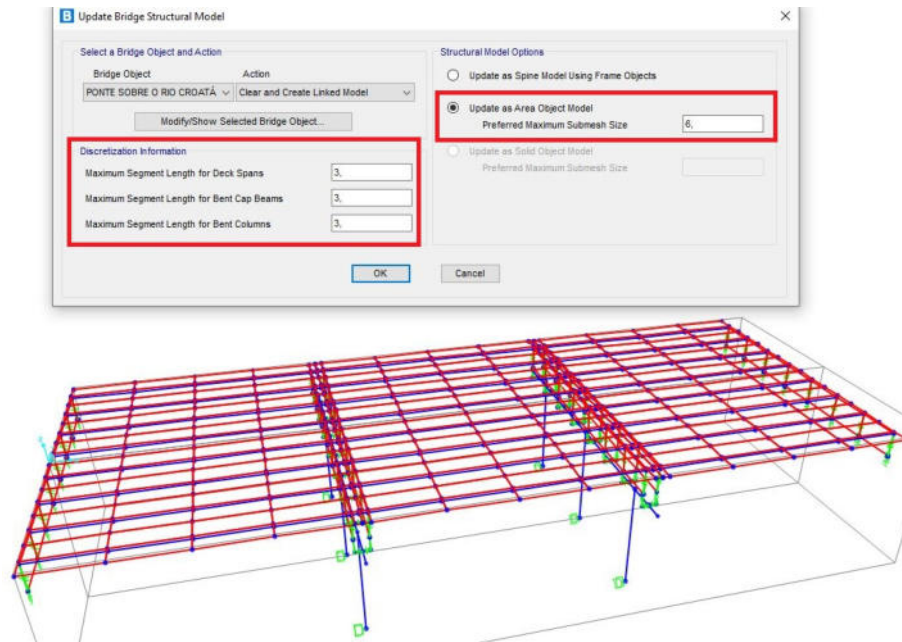
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Durante o processo de modelagem da ponte, a fim de se alcançar os resultados próximos dos descritos no memorial de cálculo, o modelo da superestrutura foi refinado durante o seu processo de discretização, ou seja, foram geradas malhas com elementos cada vez menores até se alcançar uma convergência para os resultados, como ilustra a Figura 22 e a Figura 26. Observa-se na Figura 22 que os elementos de barra, considerados no programa para a primeira discretização, possuem comprimento máximo para cada elemento correspondendo a 3 m, e os elementos de área possuem comprimento máximo dos elementos de malha correspondendo a 6 m. Para o segundo refinamento, ilustrado na Figura 26, observa-se que os elementos de barra são adotados com comprimento máximo para cada elemento correspondendo a 1 m e para os elementos de área o valor máximo dos elementos da malha corresponde a 1,2 m.

Para cada modelo, representados através da Figura 22 e da Figura 26, foram gerados resultados correspondentes às solicitações internas e os seus respectivos deslocamentos máximos. A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 ilustram as solicitações internas máximas e o deslocamento máximo, respectivamente, para o primeiro refinamento, enquanto a Figura 27, Figura 28 e Figura 29 ilustram as solicitações internas e o deslocamento máximo, respectivamente, para o segundo refinamento. A partir da análise dos resultados apresentados para cada modelo observa-se que os resultados obtidos vão convergindo para os valores

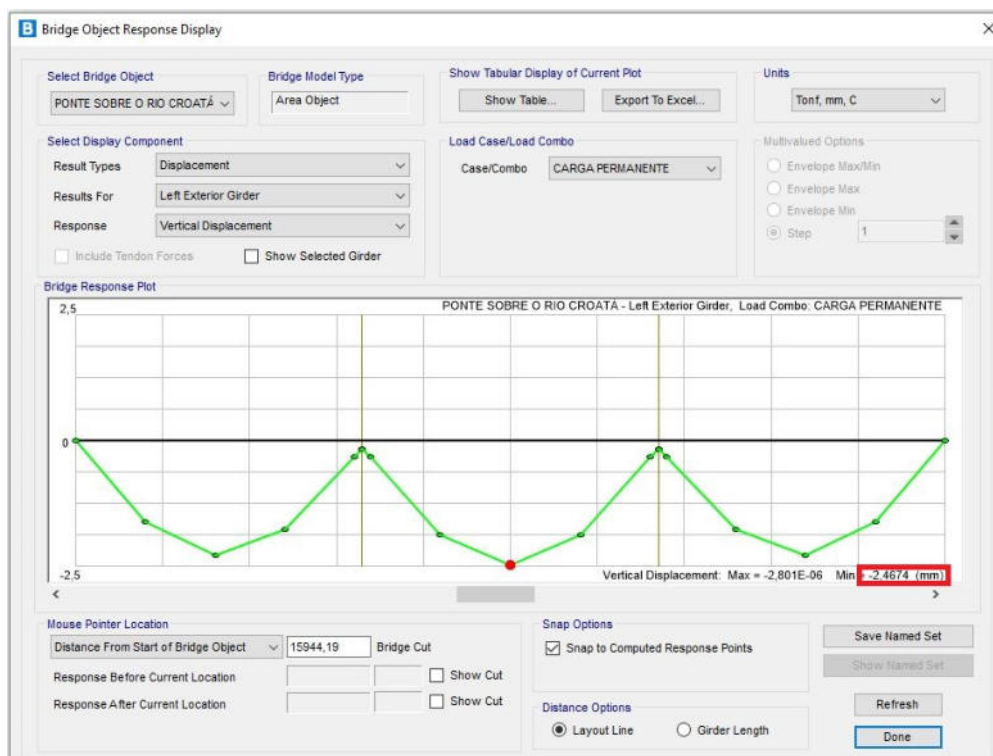
apresentados na memória de cálculo. Desse modo, o refinamento do modelo demonstra que quanto menores os elementos que compõem a malha melhores os resultados obtidos, entretanto, isso significa um maior custo computacional, devendo-se, portanto, encontrar um refinamento que represente bem o modelo com um adequado número de elementos.

Figura 22 – Refinamento da malha - primeira discretização



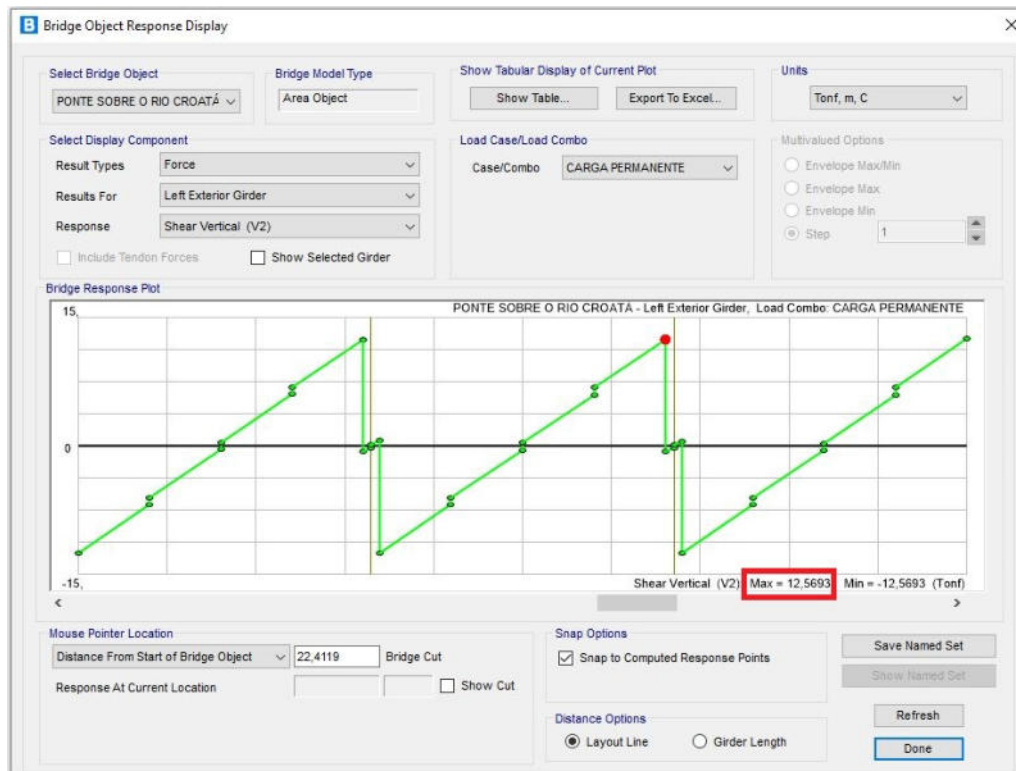
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 23 – Diagrama de momento fletor máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização



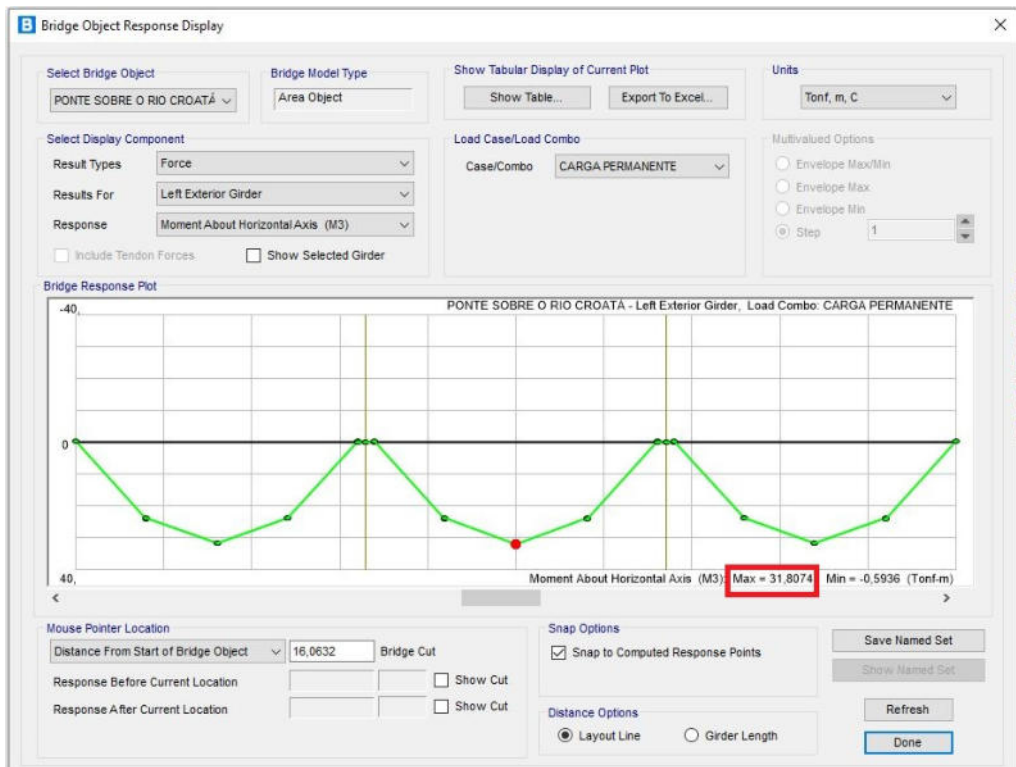
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 24 – Diagrama de esforço cortante máximo devido a cargas permanentes para primeira discretização



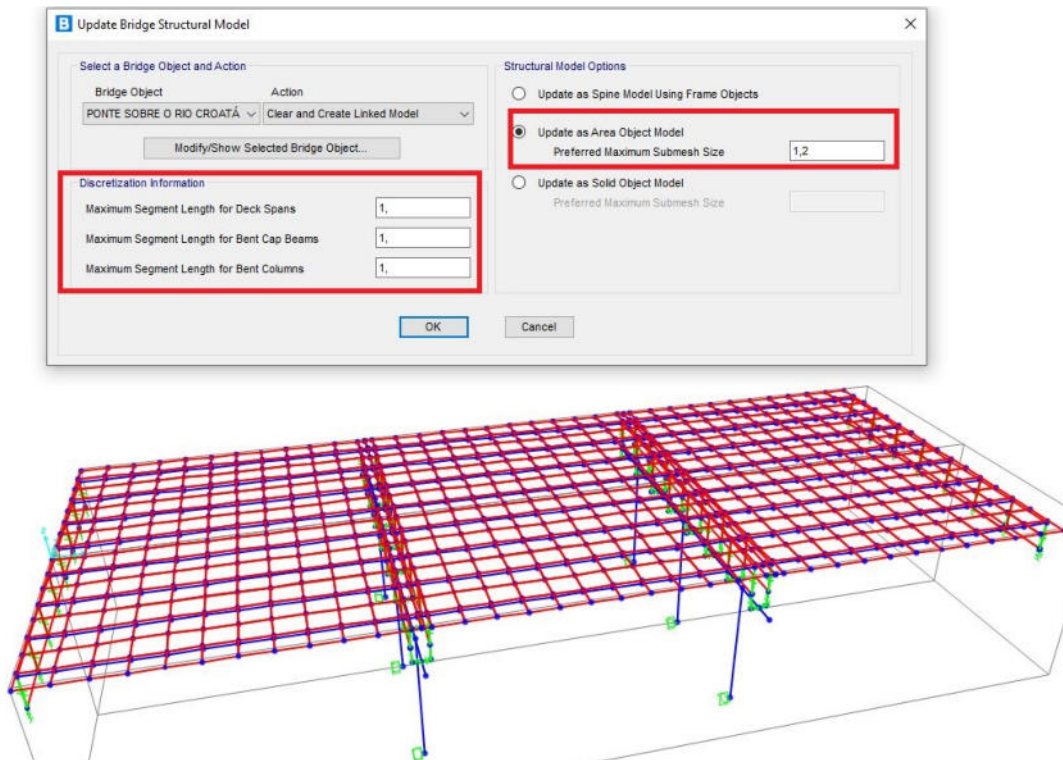
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 25 – Deslocamento máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização



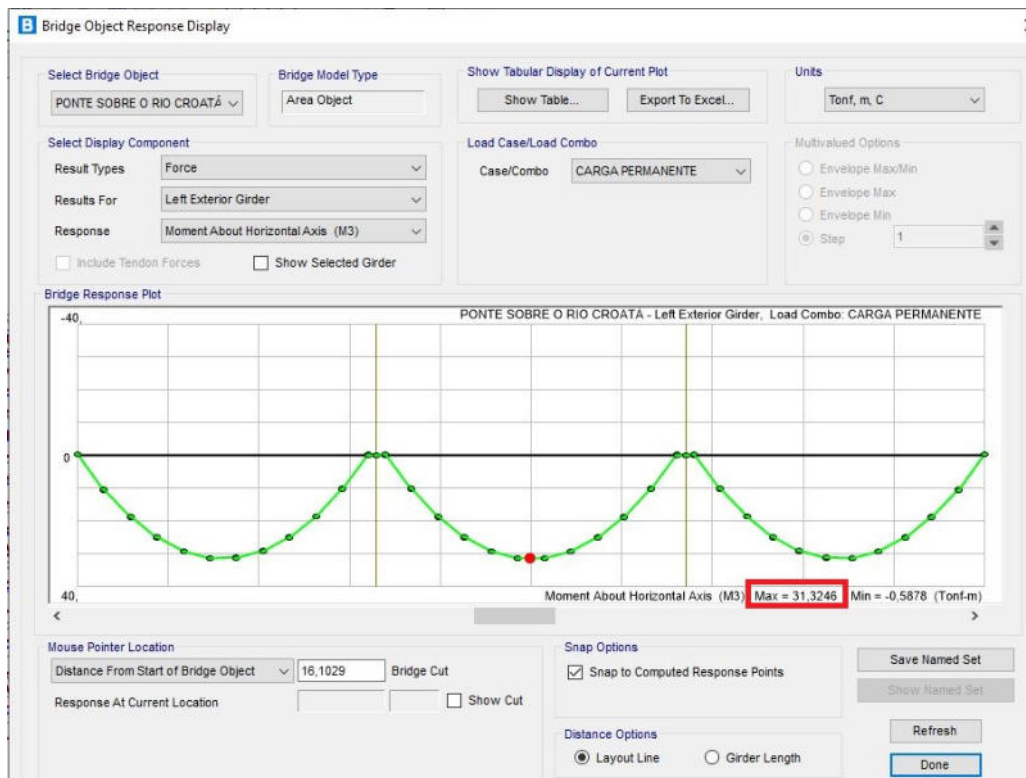
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 26 – Refinamento da malha - segunda discretização



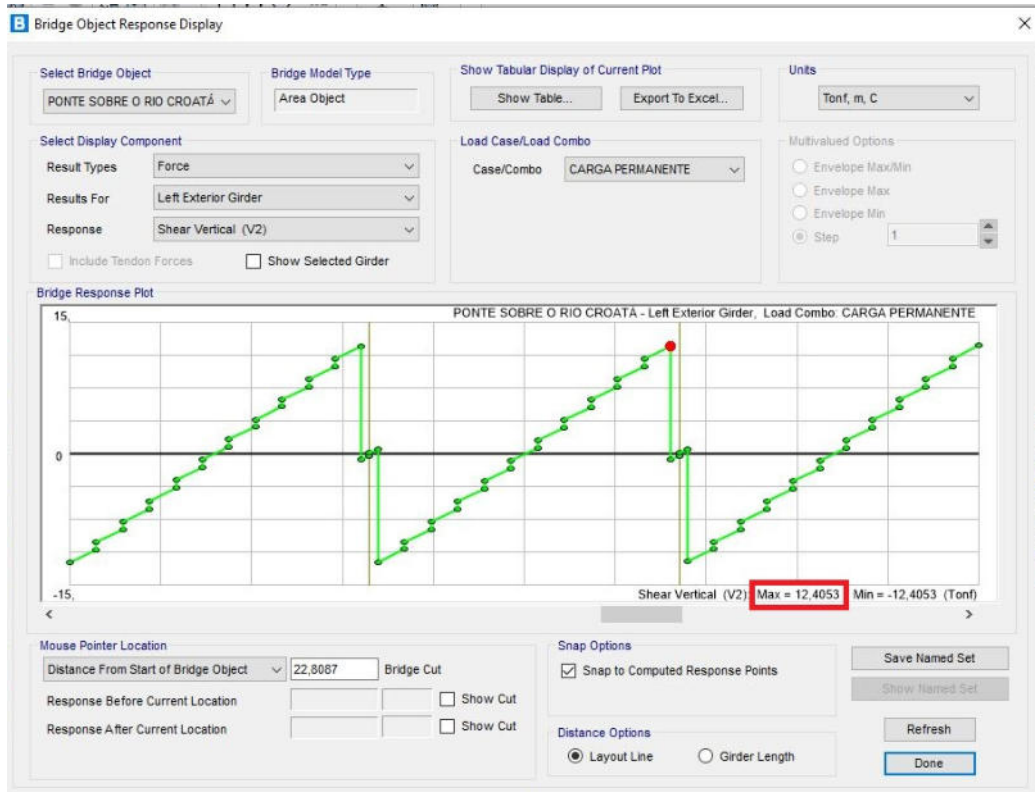
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 27 – Diagrama de momento fletor máximo devido as cargas permanentes para segunda discretização



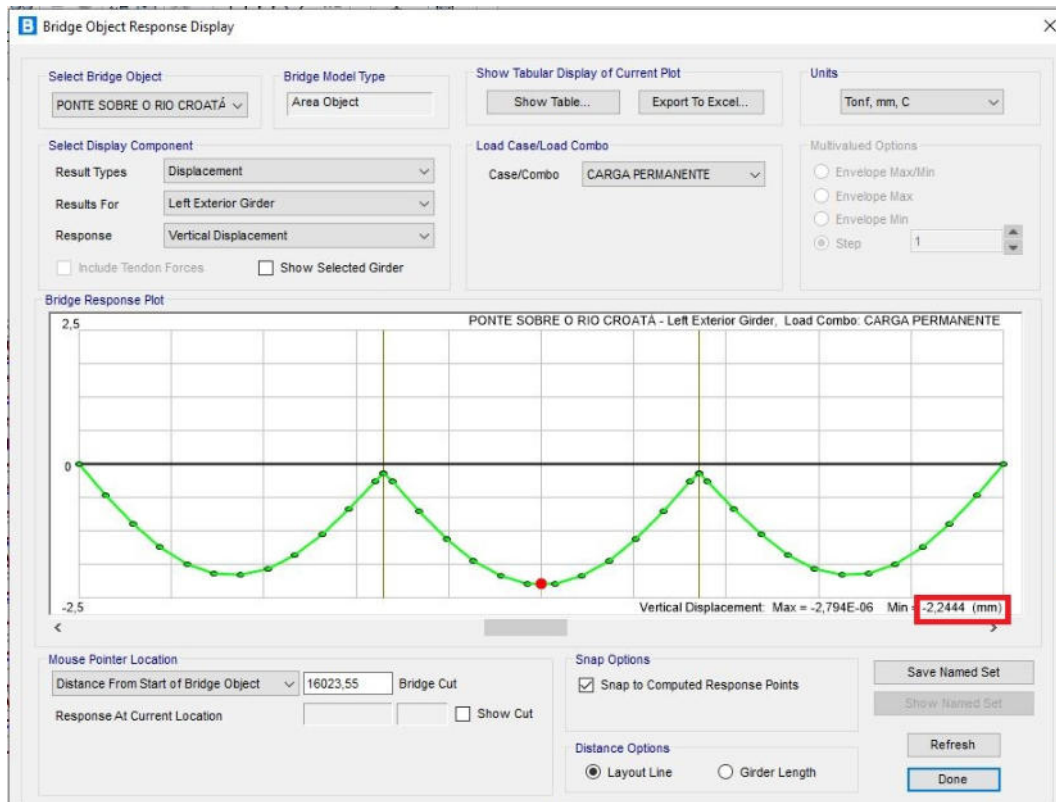
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 28 – Diagrama de esforço cortante máximo devido a cargas permanentes para segunda discretização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 29 – Deslocamento máximo devido as cargas permanentes para primeira discretização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.4 MODELAGEM DOS CARREGAMENTOS NORMATIVOS

Os resultados dos esforços gerados na ponte sobre o rio Croatá foram alcançados por meio do uso do MEF. A escolha deste modelo de verificação dá-se como forma alternativa à verificação analítica, atualmente aplicada pelo DNIT.

Segundo Cavalcante (2016), no cenário atual, um projeto dimensionado analiticamente se torna bastante oneroso e limitado, pelo fato de não poder contemplar todas as análises necessárias para o bom comportamento da estrutura, o que pode em muitas situações dificultar ou até mesmo inviabilizar sua elaboração. O estudo computacional oferece análises mais rigorosas dos comportamentos local e global das estruturas. Em projetos estruturais de pontes, diversos estudos são relevantes, como a avaliação das não linearidades físicas e geométricas, do efeito dinâmico do vento e da carga móvel, da fluência e retração etc.

A análise estrutural da ponte foi realizada a partir dos carregamentos permanentes e cargas móveis aplicados na superestrutura, por meio dos trens-tipo de projetos, obtendo-se as deformações, deslocamentos e os esforços solicitantes nas vigas longarinas. A discretização da estrutura da ponte foi realizada por meio de elementos de barras e cascas. O modelo de barras foi aplicado para obtenção dos esforços nas longarinas, enquanto o modelo de cascas na modelagem do tabuleiro, por meio do software Csi Bridge[®], que é uma extensão SAP2000[®], aplicado para pontes.

O Csi Bridge[®] é um programa de elementos finitos que permite realizar a modelagem e análise de uma ampla variedade de problemas de engenharia de estruturas. Esta ferramenta foi aplicada neste trabalho na obtenção dos esforços internos solicitantes da ponte sobre o rio Croatá, gerando as envoltórias de momentos fletores e esforços cortantes dos trens-tipo de projeto e do trem-tipo especial, reproduzidas nas Tabelas 13, 14 e 15.

Com base nos modelos de trens-tipo elaborados e apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, que incluem as cargas e os posicionamentos dos veículos padrão considerados para as três normas discutidas neste estudo, objetivou-se determinar as solicitações máximas na OAE. Quando da modelagem do carregamento referente ao trem-tipo da norma americana fez-se uso do modelo de carga estabelecido pela AASHTO-LRFD (2020), uma vez que possui carregamentos mais desfavoráveis que o da AASTHO (2002) que está obsoleta desde de 2007.

Tabela 13 – Resumo das cargas móveis, segundo a NBR 7188:2013.

Carregamento Longitudinal		Carregamento Transversal													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Classe da Ponte</th> <th colspan="3">Veículo</th> </tr> <tr> <th>Tipo</th> <th>Carga por eixo (kN)</th> <th>Peso total (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">45</td> <td>TB-450</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>		Classe da Ponte	Veículo			Tipo	Carga por eixo (kN)	Peso total (kN)	45	TB-450	150	150	
Classe da Ponte	Veículo														
	Tipo	Carga por eixo (kN)	Peso total (kN)												
45	TB-450	150	150												
			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Coef. de impacto</th> <th colspan="3">Carga uniformemente distribuída</th> </tr> <tr> <th>p (kN/m²)</th> <th>p' (kN/m²)</th> <th>Disposição da carga</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot L \geq 1$ ou $\varphi = \text{CIV.CNF.CIA}$</td> <td rowspan="2">5</td> <td rowspan="2">3</td> <td rowspan="2">- Carga p ao longo da pista - Carga p' nos passeios</td> </tr> <tr> <td>$\varphi = 1,35$</td> </tr> </tbody> </table>		Coef. de impacto	Carga uniformemente distribuída			p (kN/m²)	p' (kN/m²)	Disposição da carga	$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot L \geq 1$ ou $\varphi = \text{CIV.CNF.CIA}$	5	3	- Carga p ao longo da pista - Carga p' nos passeios
Coef. de impacto	Carga uniformemente distribuída														
	p (kN/m²)	p' (kN/m²)	Disposição da carga												
$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot L \geq 1$ ou $\varphi = \text{CIV.CNF.CIA}$	5	3	- Carga p ao longo da pista - Carga p' nos passeios												
$\varphi = 1,35$															

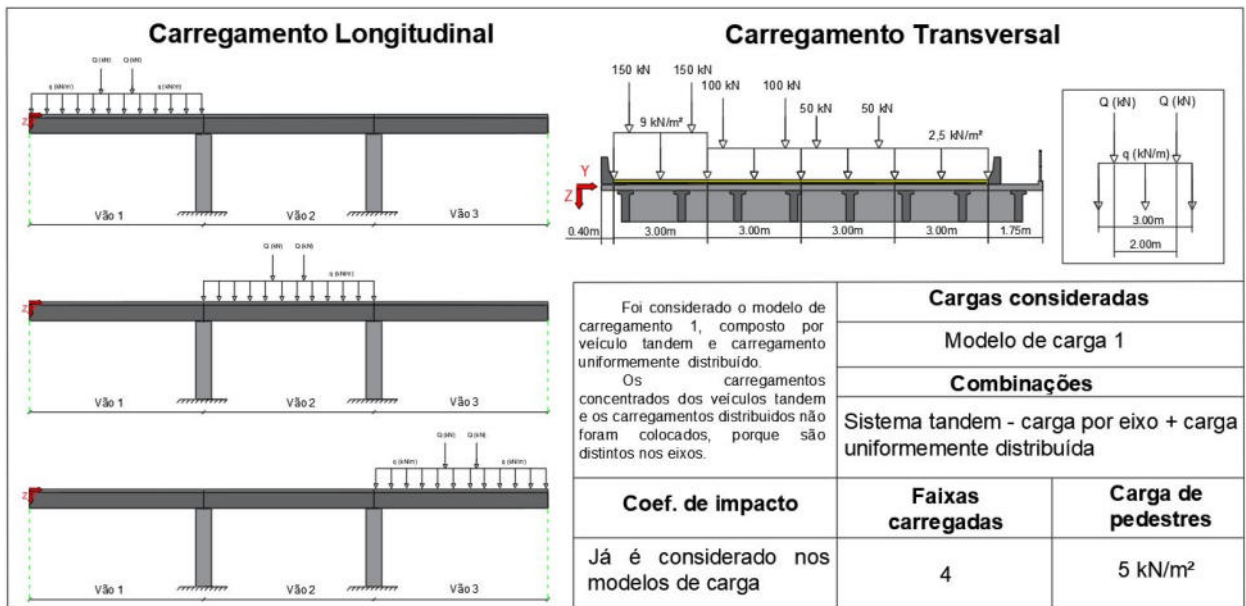
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 14 – Resumo das cargas móveis, segundo a AASTHO – LRFD (2020).

Carregamento Longitudinal		Carregamento Transversal													
		<p>Foram consideradas as prescrições da AASHTO-LRFD:2012, sendo mais desfavoráveis que as da AASHTO:2002. Os carregamentos concentrados dos caminhões e os carregamentos distribuídos não foram colocados, porque são distintos nos eixos</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Cargas consideradas</th> <th>Veículo padrão</th> <th>Sistema tandem</th> <th>Carga distribuída</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">Combinções</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Veículo padrão ou sistema tandem + carga distribuída</td> </tr> </tbody> </table>		Cargas consideradas	Veículo padrão	Sistema tandem	Carga distribuída	Combinções				Veículo padrão ou sistema tandem + carga distribuída			
Cargas consideradas	Veículo padrão	Sistema tandem	Carga distribuída												
	Combinções														
Veículo padrão ou sistema tandem + carga distribuída															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Coef. de impacto</th> <th>Faixas carregadas</th> <th>Fator (m)</th> <th>Carga de pedestres</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\varphi = P_{LL+1} = P_{LL} (1 + IM)$ $\varphi = 1,33$</td> <td>3</td> <td>0,85</td> <td>3,66 kN/m²</td> </tr> </tbody> </table>		Coef. de impacto	Faixas carregadas	Fator (m)	Carga de pedestres	$\varphi = P_{LL+1} = P_{LL} (1 + IM)$ $\varphi = 1,33$	3	0,85	3,66 kN/m²				
Coef. de impacto	Faixas carregadas	Fator (m)	Carga de pedestres												
$\varphi = P_{LL+1} = P_{LL} (1 + IM)$ $\varphi = 1,33$	3	0,85	3,66 kN/m²												

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 15 – Resumo das cargas móveis, segundo o Eurocode 1 (2003).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para a modelagem da ponte no Csi Bridge[®] foram adotadas as seguintes etapas: a) definição das propriedades dos materiais; b) definição das propriedades das seções transversais; c) geração do modelo no programa com as propriedades definidas; d) definição das condições de contorno da estrutura; e) calibração do modelo; f) modelagem do veículo padrão; g) definição das faixas correspondentes aos veículos e h) análise dos resultados e calibração do modelo.

Após a criação do modelo e a definição das cargas permanentes atuantes na superestrutura, o modelo foi calibrado e validado segundo as informações fornecidas no projeto. Com o modelo calibrado e validado, são definidos os carregamentos móveis e as faixas de tráfego estabelecidas em cada uma das normativas. Posteriormente foi gerado o carregamento móvel de carga especial total de 512 t, definido pela NBR 7188:2013, e o carregamento móvel especial fornecido pelo DNIT de 362 t para as verificações de FS.

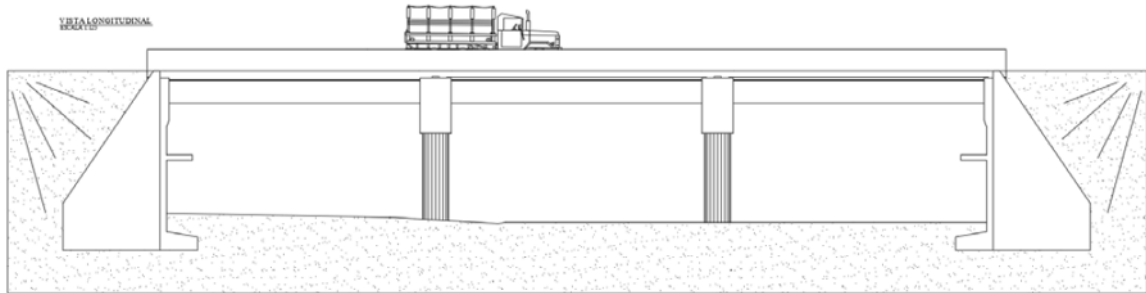
No Apêndice A deste trabalho, é apresentado todo o processo de modelagem da ponte sobre o rio Croatá, com as definições adotadas na geração do modelo explicadas detalhadamente.

3.5 MODELAGEM DO CARREGAMENTO ESPECIAL

A primeira etapa do processo de modelagem consiste na reprodução da geometria e dos resultados dos esforços solicitantes previamente estabelecidos através projeto fornecido pelo DNIT/AL, para ponte sobre o rio Croatá, apresentada na Figura 30 e Figura 31. Trata-se de uma

ponte de concreto armado com trem-tipo de projeto de classe 45, concebida segundo as recomendações da NBR 7188:2013.

Figura 30 – Ponte sobre o rio Croatá



Fonte: DNIT, 2018.

Figura 31 – Execução de ponte sobre o rio Croatá.



Fonte: DNIT, 2018.

Inicialmente, no contexto de familiarização com o programa Csi Bridge[®], a autora realizou um curso de modelagem de pontes com carga horária de 12 horas e, em seguida, deu-se início à modelagem da ponte e à obtenção dos esforços internos solicitantes.

Visando à calibração do modelo, fez-se a verificação das solicitações máximas geradas pelas cargas permanentes. As cargas permanentes aplicadas a estrutura são devidas ao peso próprio, carga de pavimentação, recapa e defesa, onde as informações de esforços máximos nas vigas principais são fornecidas na memória de cálculo do projeto da ponte.

Após a validação do modelo, foram realizadas as análises de esforços máximos com os trens-tipo das normas europeia e americana, com posterior análise dos esforços obtidos através de um trem-tipo especial estabelecido pelo DNIT. Para complementar as verificações dos esforços solicitantes máximos optou-se por realizar a verificação do veículo especial fornecido por meio da NBR 7188:2013. De posse dos dados de esforços máximos dos cinco trens-tipo,

foi realizada a verificação de solicitação de esforço máximo por meio da aplicação da metodologia do DNIT para concessão das autorizações especiais de trânsito.

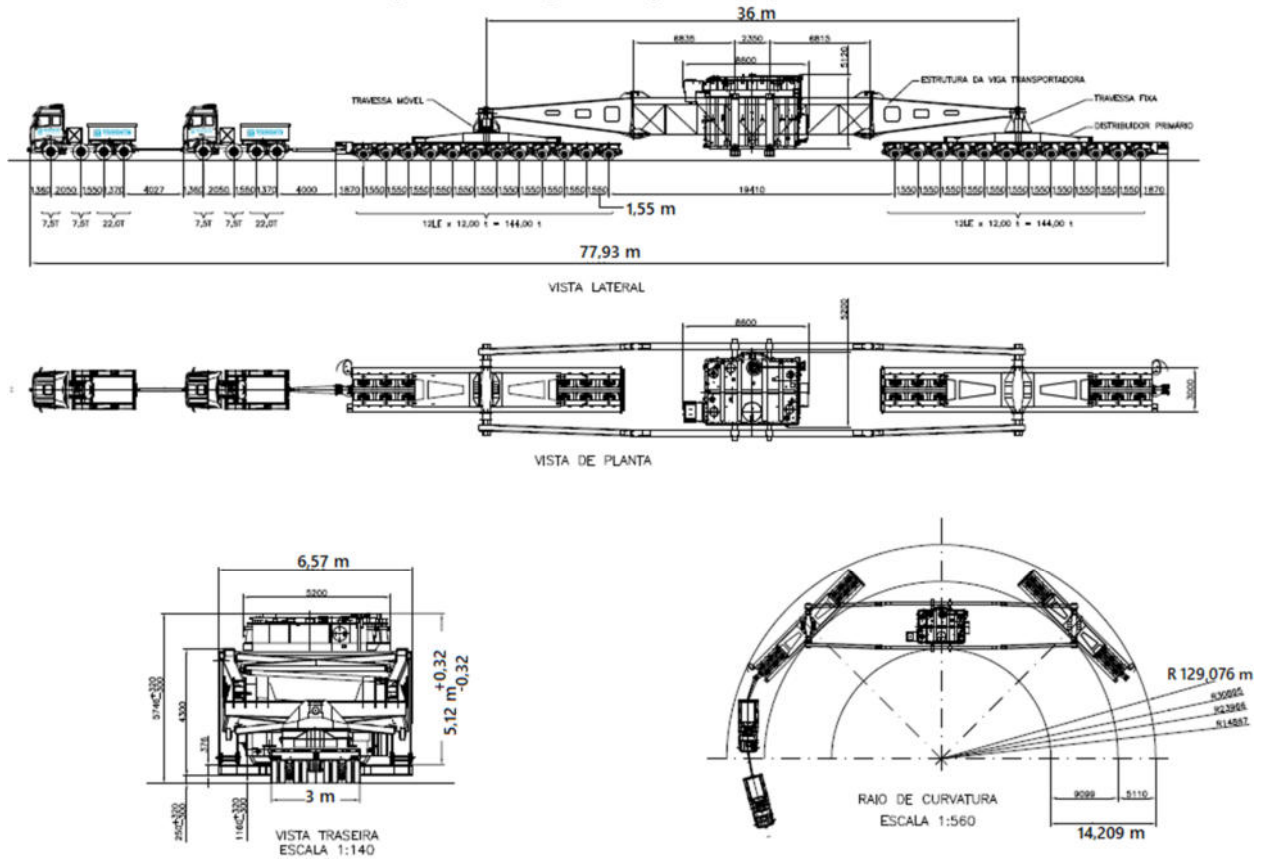
O trem-tipo especial descrito pelo DNIT, utilizado na verificação, é apresentada na Tabela 16, que estabelece as características do conjunto transportador ilustrado na Figura 32. O exemplo aplicado nesta análise corresponde a um carregamento real, aplicado em uma ponte localizada na BR-448/RS, projetada para um trem-tipo de classe 45 (TB-450).

Tabela 16 – Dados do conjunto transportador.

Conjunto Transportador	
Dimensões	
Conjunto transportador carregado (m)	
Largura (m)	6,570
Altura (m)	5,746
Comprimento (m)	77,937
Cargas	
Descrição	Peso (tf)
01 transformador	159,00
12 L.E. + Viga + 12 L.E	129,00
Subtotal:	288,00
Tração:	74,00
PBT:	362,00
Carga unitária (24 L.E.) tf/eixo:	12,00
Tipo	
Conjunto trator:	2 cavalos mecânicos 8x4.
	08 L.E. – (4 x 7,5 + 4 x 11) tf.
Conjunto tracionado:	24 L.E – (12,00 tf/ eixo).

Fonte: DNIT, 2016 (adaptado).

Figura 32 – Croqui do conjunto transportador



Fonte: DNIT, 2016.

Visando à obtenção dos fatores de segurança (FS), foi realizada a passagem dos carregamentos móveis sobre a ponte do rio Croatá. Em seguida, obteve-se a envoltória dos esforços solicitantes durante a passagem do trem-tipo de projeto e dos trens-tipo especiais (TTE-362 e TTE-512). Os resultados obtidos foram aplicados na Equação 10, descrita no item 3.2, onde é verificada a razão entre a solicitação do ELU do trem-tipo de projeto, TTE-362 e TTE-512, obtendo-se assim os respectivos coeficientes de segurança.

Considera-se que o atendimento ao critério segurança estrutural durante a transposição da OAE pelo carregamento especial ocorre quando FS obtido é superior ou igual a um.

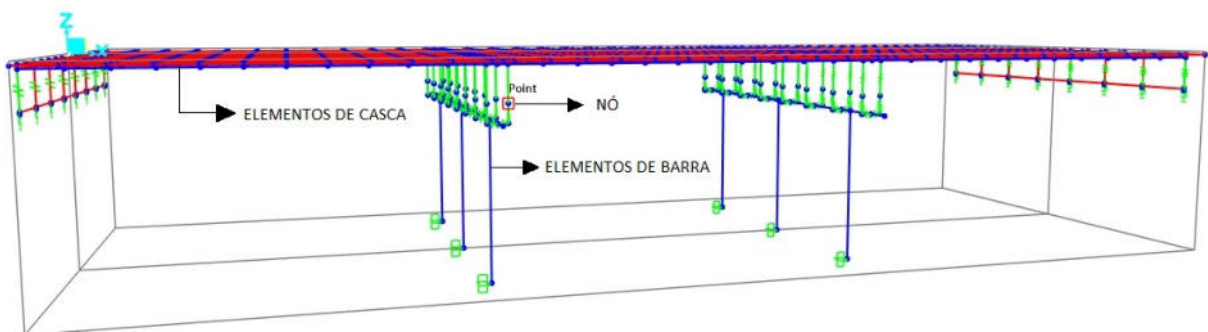
Neste trabalho, a obtenção do FS dá-se por meio da Equação 10 por se tratar de uma ponte classe 45 (TB-450). Entretanto, no problema que será analisado somente serão considerados os valores dos carregamentos móveis, tornando a verificação mais restritiva, uma vez que deste modo diminui-se a resistência e aumenta-se o valor da solicitação. Aplica-se apenas o coeficiente de impacto, a fim de majorar o carregamento móvel de projeto considerando-o uma carga estática equivalente. Assim, a Equação 10 se resume à Equação 11:

$$FS = \frac{\varphi \cdot S_q}{S_{qe}} \geq 1 \quad (11)$$

4 MODELO DA PONTE

O modelo foi concebido a fim de se obter a representação da estrutura da ponte correspondente à estrutura real, buscando-se resultados confiáveis. A estrutura da ponte foi discretizada por meio do *software* Csi Bridge® em elementos de barras e cascas, correspondentes às cores azul e vermelha na Figura 33, respectivamente. Elementos de barras foram aplicados para obtenção dos esforços nas longarinas, enquanto elementos de cascas foram aplicados na modelagem do tabuleiro.

Figura 33 – Discretização da estrutura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O Csi Bridge® disponibiliza ao usuário uma extensa variedade de elementos finitos, que devem ser escolhidos de acordo com o tipo de problema a ser solucionado. A escolha deve ser feita considerando-se vários aspectos, tais como a família a qual o elemento pertence, graus de liberdade, número de nós e, principalmente, a adequação do elemento à análise desejada (CAVALCANTE,2016).

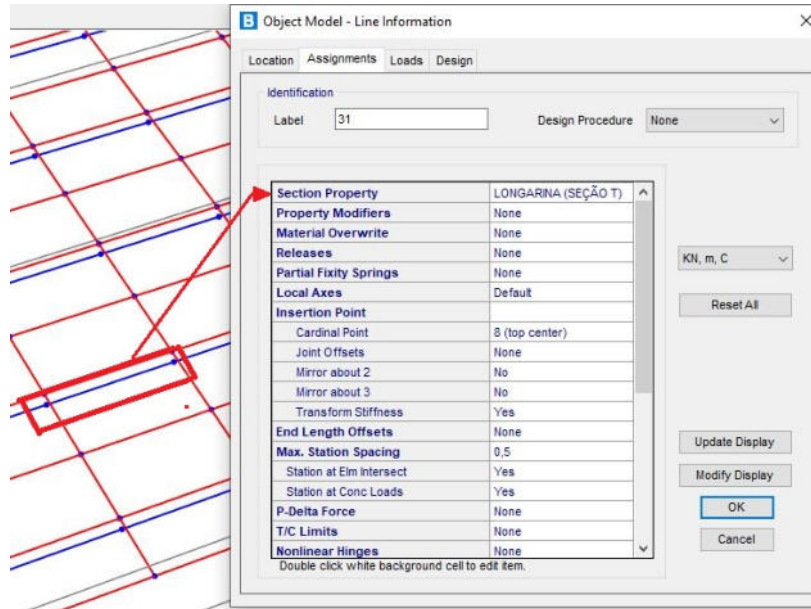
Segundo o Csi Analysis Reference Manual (2013), pode definir os elementos como:

- Pontuais (nós): criados automaticamente nas extremidades dos elementos e podem ser adicionados em locais específicos, afim de se capturar esforços localizados;
- Lineares (elementos de barra): utilizados como elementos de pórtico espacial para modelar vigas, pilares e treliças, e de plano para estais sob peso próprio e tração e cabos de protensão;
- Área (elementos de cascas): utilizados como chapas (teoria de membrana), placas (teoria de flexão) ou cascas (teoria de membrana e flexão) para discretizar lajes, paredes finas e sólidos bidimensionais.

Para modelar os pilares, longarinas pré-moldadas e vigas de travamento foram utilizados elementos de barras definidos na geração das geometrias dos elementos, enquanto as lajes e

transversinas foram modeladas por elementos de cascas. Na Figura 34 são apresentadas as configurações da longarina, que foi discretizada como um elemento de barra.

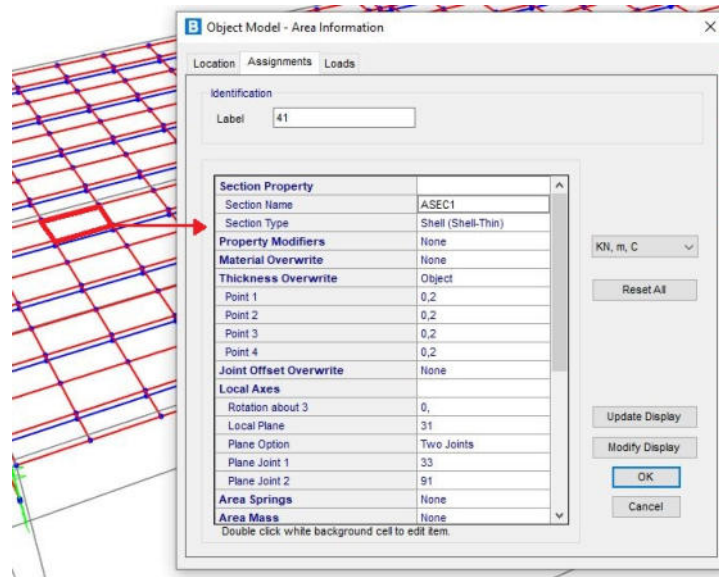
Figura 34 – Modelo de barra representando a longarina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A laje é discretizada em elementos de casca (ASEC1), visto na Figura 35. O método de cálculo utilizado para obtenção dos esforços no programa é o modelo de casca esbelta (*Shell-Thin*), logo, o fato de considerar-se uma casca esbelta (*Thin*) significa que a seção permanece plana após a deformação, não se consideram distorções na seção transversal da laje, atendendo-se às hipóteses de Euler Bernoulli.

Figura 35 – Elemento de casca representando a laja da superestrutura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Foi realizada a calibração do modelo numérico gerado pelo programa de elementos finitos Csi Bridge. A calibração do modelo é necessária para que os resultados obtidos no programa se assemelhem aos valores constantes na memória de cálculo fornecida pelo DNIT. Após realizada a verificação à torção no modelo numérico, é realizada a calibração deste com relação às suas considerações a torção. Por definição, o programa considera a rigidez à torção em todos os elementos, e à medida que se diminui o efeito da resistência à torção, aumenta-se os deslocamentos em função da perda da rigidez à torção da peça.

O autor do projeto da ponte sobre o rio Croatá informa que a discretização da estrutura para o modelo de cálculo foi realizada em elementos de barras e elementos compondo um modelo estrutural em grelha plana. Tal modelo foi gerado para determinação dos esforços nos elementos estruturais vigas, travessas e lajes. Por meio da utilização do programa de cálculo MIDAS versão 2017 (Structural Analysis Program). O software de análise estrutural, MIDAS, corresponde a um conjunto de programas destinados à geração da geometria do modelo, composição de cargas e verificação de resultados e análise estrutural (DNIT, 2018).

Para a criação do modelo da ponte, foram adotadas informações constantes no memorial de cálculo fornecido pelo DNIT, descritas a seguir.

Características geométricas:

- Tabuleiro constituído de 3 vãos;
- Viga pré-moldadas;
- Largura do tabuleiro igual a 14,15 m.

Carregamentos permanentes:

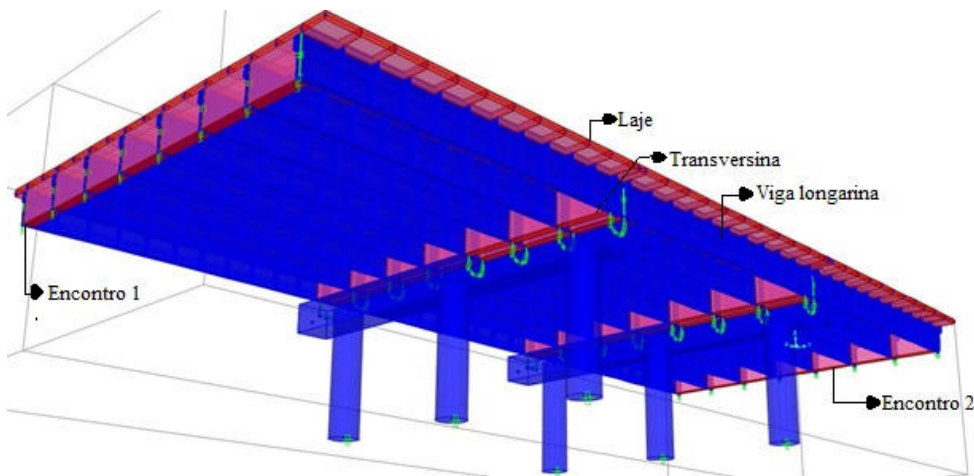
- Peso próprio da viga e do tabuleiro, o memorial de cálculo informa que o carregamento foi definido automaticamente pelo MIDAS. O valor corresponde ao peso específico do concreto admitido é igual a $\gamma_c = 2,5 \text{ tf/m}^2$ e o valor correspondente à carga da laje admitida corresponde a $0,500 \text{ tf/m}^2$;
- Cargas permanentes (G3) correspondentes à soma das cargas de pavimentação (igual a $0,120 \text{ tf/m}^2$), recapa (segundo a NBR 7187:2021 igual a $0,200 \text{ tf/m}^2$), defesa/barreira New Jersey igual a $0,603 \text{ tf/m}$.

Restrições de apoio, as rigidezes nos eixos locais utilizadas no modelo referentes as direções X, Y e Z foram calculadas de acordo com as Equações 12 e 18, detalhadas no Apêndice A.

- A superestrutura é apoiada em neoprenes fretados. A viga é ligada ao topo dos neoprenes por elementos flexíveis no modelo de cálculo;
- Rigidez do eixo local para direção vertical (Z) admitida igual a 1.10^9 tf/m, para cada aparelho de apoio;

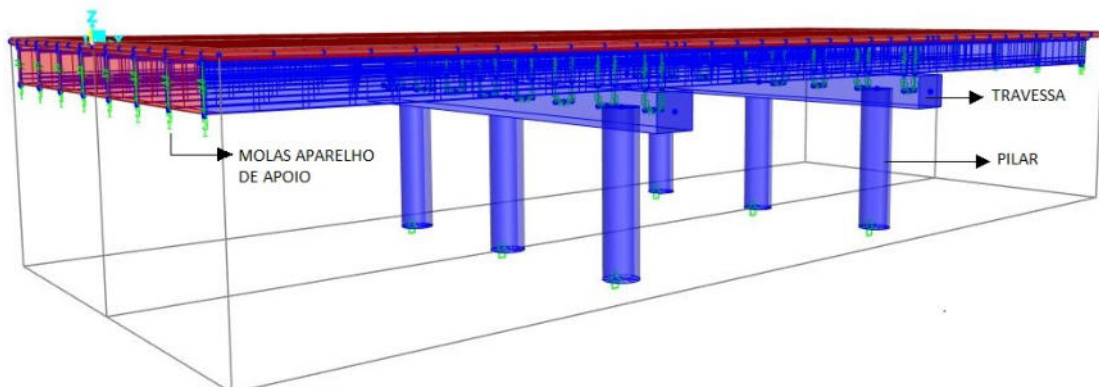
De acordo com as informações de projeto o modelo representado na Figura 36 e na Figura 37 foi obtido, onde são indicados nas figuras os elementos que compõem a estrutura, as definições da geometria da ponte. Demais informações sobre o modelo são descritas no Apêndice A.

Figura 36 – Modelo de cálculo da ponte sobre o rio Croatá, vista inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 37 – Modelo de cálculo da ponte sobre o rio Croatá, vista lateral.

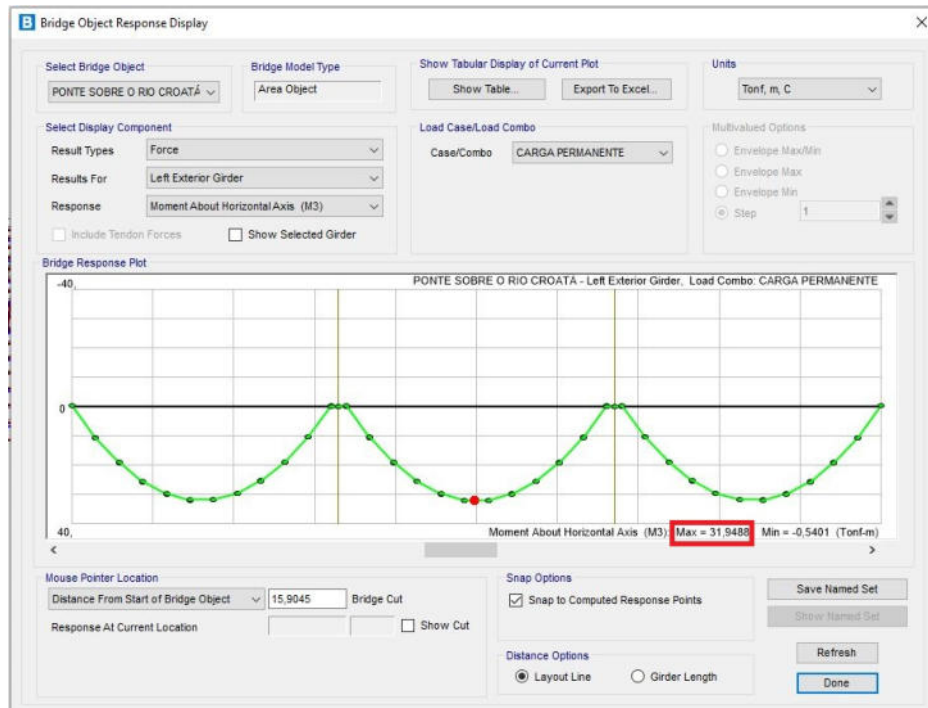


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir do modelo construído, foram obtidos os resultados de esforços máximos nas vigas longarinas devidos as cargas permanentes características, descritas a seguir. Os resultados

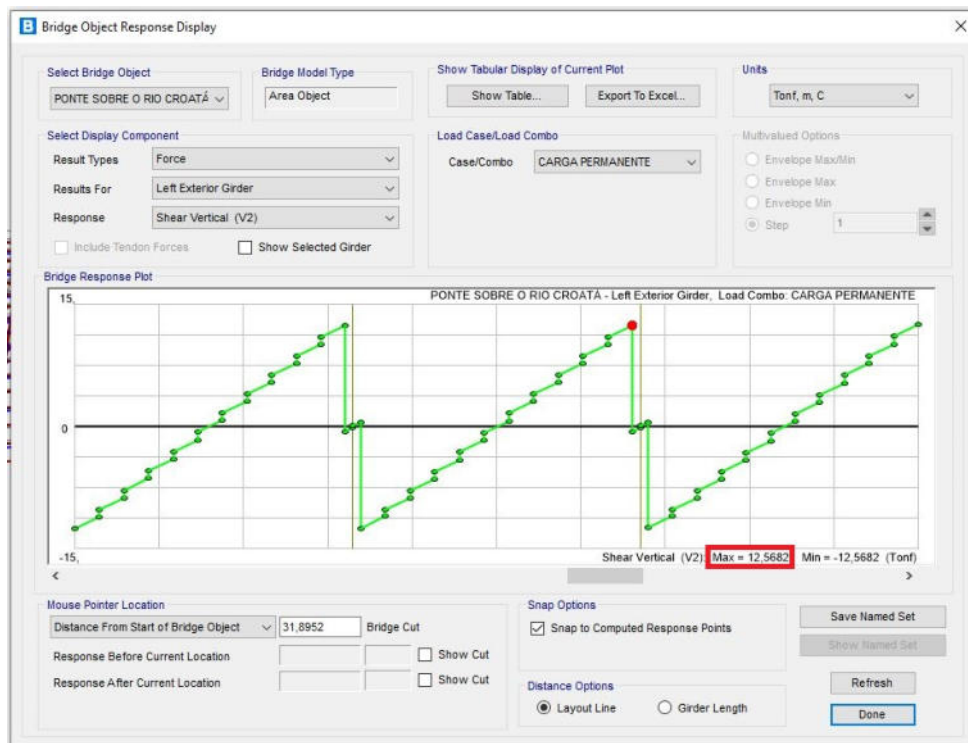
correspondentes aos esforços máximos nas vigas longarinas fornecidos pelo programa são ilustrados na Figura 38, que representa o diagrama de momento fletor, na Figura 39 o diagrama de esforço cortante e na Figura 40 o deslocamento devido aos efeitos das cargas permanentes características na viga longarina 1, respectivamente.

Figura 38 – Diagrama de momento fletor devido às cargas permanentes



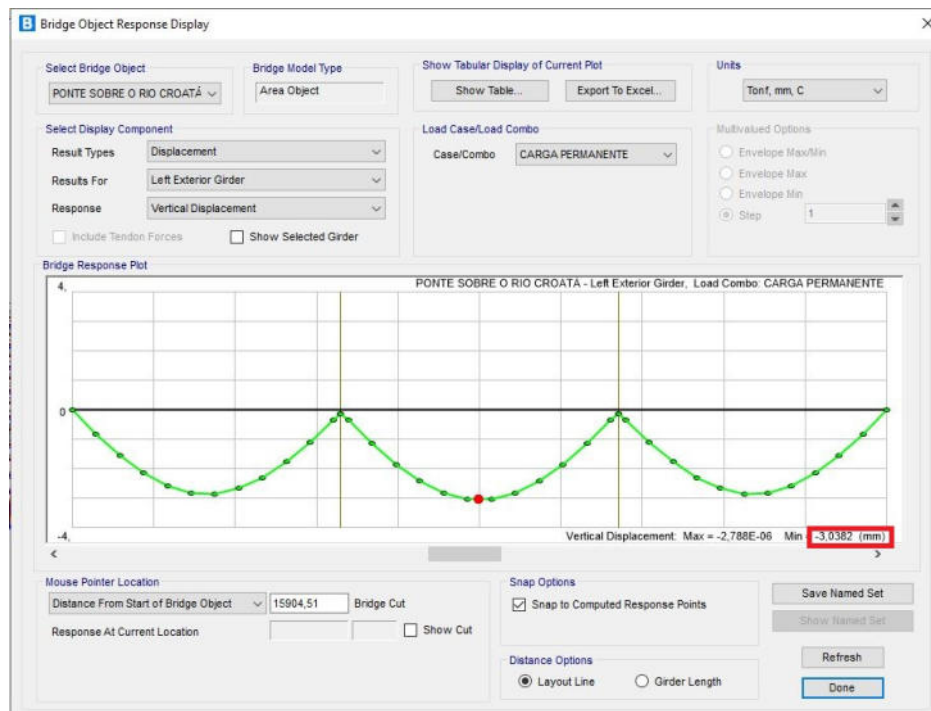
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 39 – Diagrama de esforço cortante devido às cargas permanentes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

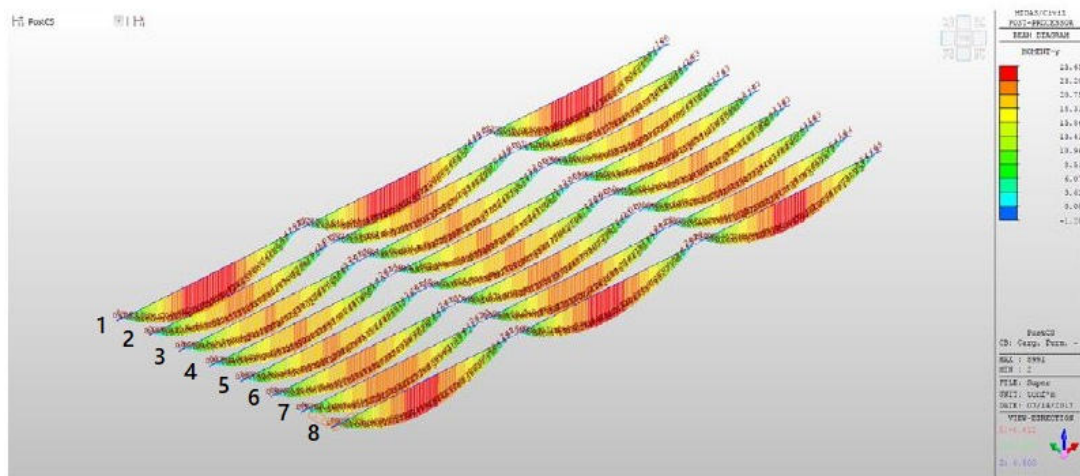
Figura 40 – Deslocamento verticais devido às cargas permanentes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

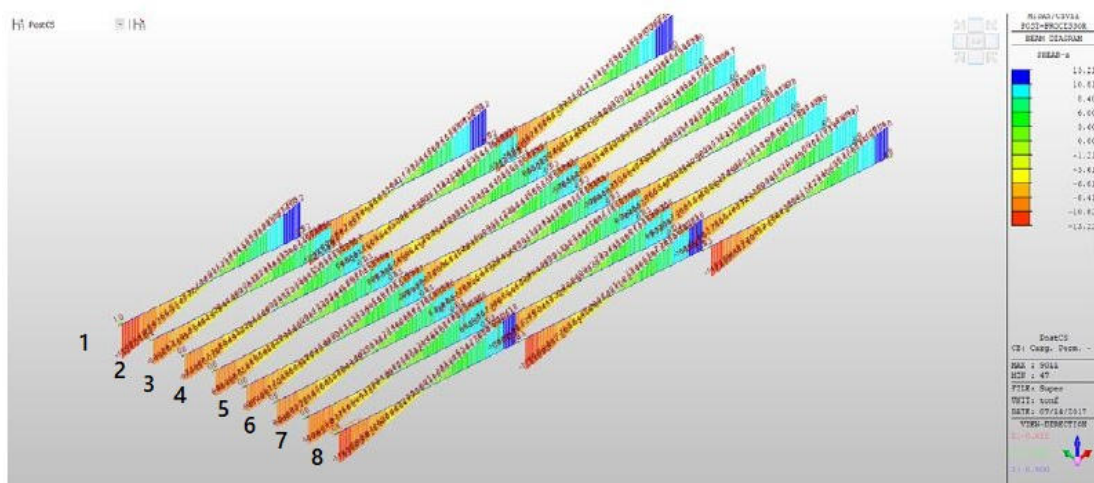
Os valores correspondentes aos esforços máximos nas vigas longarinas fornecidas no memorial de cálculo são apresentados na Figura 41, que representa o diagrama de momento fletor, a Figura 42 representa o diagrama de esforço cortante e a Figura 43 o deslocamento devido aos efeitos das cargas permanentes características, respectivamente. Destaca-se que o deslocamento máximo apresentado na Figura 43 não leva em consideração os efeitos reológicos e decorrentes de variações de temperatura.

Figura 41 – Momentos fletores devidos à carga permanente, conforme memorial de cálculo



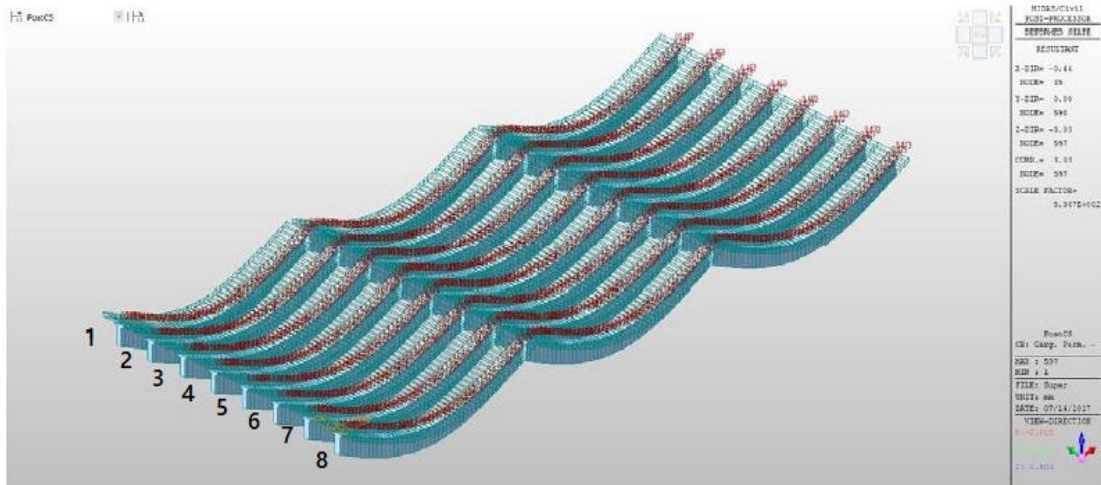
Fonte: DNIT, 2018.

Figura 42 – Esforço cortante máximo segundo memorial de cálculo



Fonte: DNIT, 2018.

Figura 43 – Deslocamento máximo segundo memorial de cálculo



$$D(x) = 0,44mm$$

$$D(y) = 0,08mm$$

$$D(z) = 3,03mm$$

Fonte: DNIT, 2018.

Para comparação dos valores gerados no modelo obtido pelo programa CSi Bridge® e os valores fornecidos por meio da memória de cálculo da superestrutura fornecido pelo DNIT, elaborou-se a Tabela 17. A Tabela 17 corresponde ao resumo dos esforços e deslocamentos máximos provenientes do modelo numérico e do projeto.

Tabela 17 – Resumo das solicitações do modelo e memorial de cálculo

	Carga permanente projeto	Carga permanente modelo	Diferença percentual (%)
Momento fletor máximo (tf.m)	26,65	31,95	19,88%
Esforço cortante máximo (tf)	13,22	12,57	5,17%
Deslocamento máximo (mm)	3,03	3,03	0%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Dos resultados obtidos na Tabela 17, observa-se que os valores correspondentes ao esforço cortante e ao deslocamento máximo obtidos no modelo de cálculo são semelhantes aos fornecidos no memorial de cálculo, para os efeitos da carga permanente. Contudo, os valores correspondentes as solicitações devido a carga permanente na estrutura para o momento fletor máximo possuem uma certa diferença. A diferença nos resultados deve-se, provavelmente, por se tratarem de modelos distintos, no qual tem-se critérios de rigidez, modelos de cálculo e elementos finitos diferentes e algumas considerações feitas pelo projetista durante a elaboração do projeto que não são fornecidas integralmente no memorial de cálculo.

É importante considerar que diferentes metodologias de cálculo correspondem a diferentes considerações e simplificações utilizadas durante o processo de obtenção dos esforços na estrutura, não sendo possível atingir valores exatos. Entretanto, é possível observar valores aproximados e comportamentos correspondentes entre os dois modelos, conforme obtido.

Os resultados apresentados na Tabela 18 resumem os valores obtidos no programa durante o processo de refinamento e calibração do modelo, esses processos são necessários para que o modelo represente bem a estrutura real. Na coluna correspondente aos resultados sem refinamento são apresentados os valores do primeiro modelo apresentado pelo programa, posteriormente tem-se a coluna dos dados com refinamento, na qual os elementos da malha da superestrutura foram representados em elementos menores que o modelo inicial. Por fim, tem-se a coluna correspondente aos valores obtidos através da calibração do modelo, onde foram realizadas as reduções da rigidez torcional, e com isso, os valores dos deslocamentos aumentaram. Observa-se que todos os resultados obtidos apresentam valores relativamente parecidos.

A Tabela 18 descreve as variações percentuais dos resultados obtidos durante o processo de refinamento e calibração do modelo da ponte com relação aos valores fornecidos na memória de cálculo. Na Tabela 18, pode-se visualizar que a medida em que o modelo de cálculo é aprimorado os seus deslocamentos vão se aproximando do valor obtido na memória de cálculo da superestrutura.

Tabela 18 – Resumo das solicitações do modelo durante refinamento e calibração

	Sem refinamento	Com refinamento	Com calibração	Memória de Cálculo
Momento fletor máximo (tf.m)	31,81	31,32	31,94	26,65
Esforço cortante máximo (tf)	12,57	12,40	12,57	13,22
Deslocamento máximo (mm)	2,47	2,25	3,03	3,03

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 19 – Variação percentual dos resultados

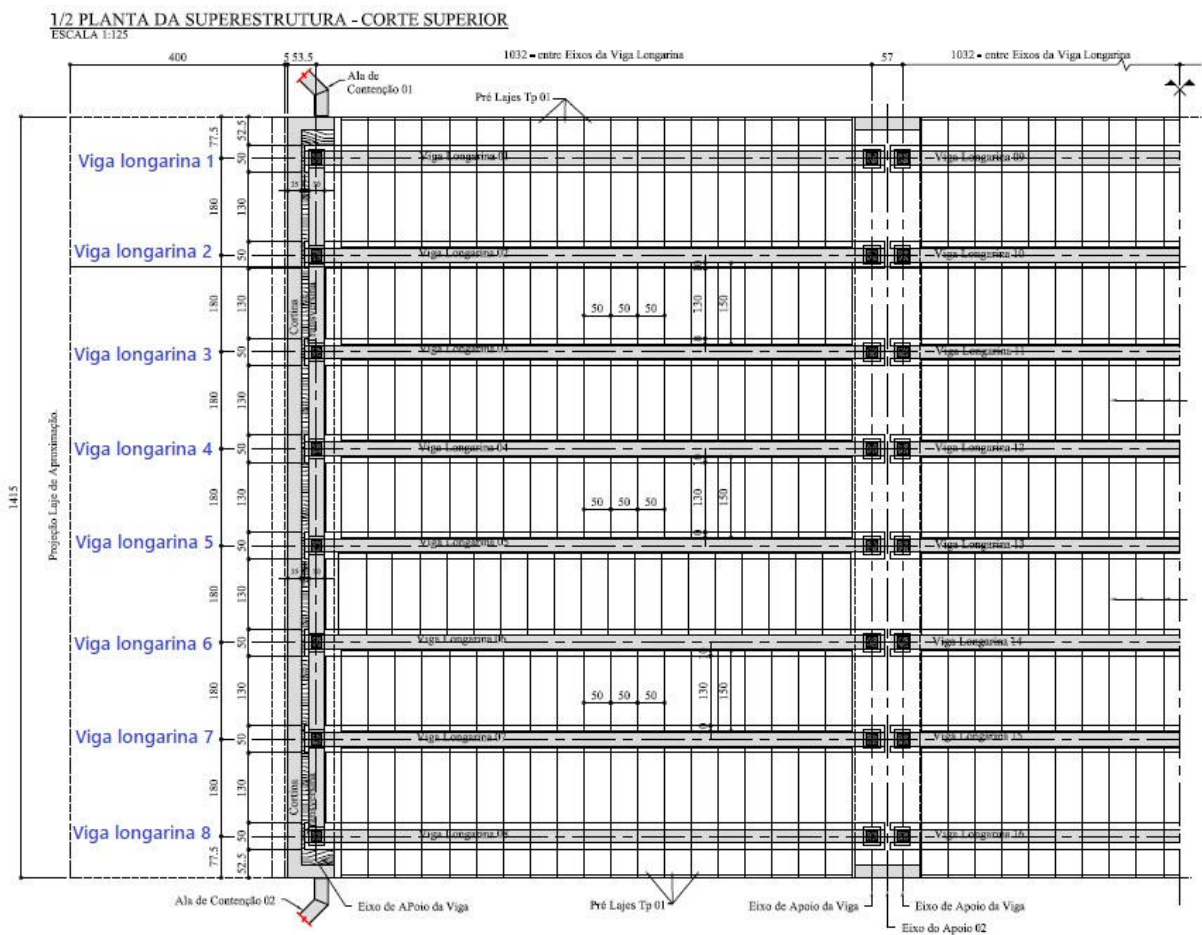
	Sem refinamento	Com refinamento	Com calibração
Momento fletor máximo (tf.m)	19,36 %	17,52 %	19,84 %
Esforço cortante máximo (tf)	- 4,92 %	- 6,20 %	- 4,92 %
Deslocamento máximo (mm)	- 18,48 %	- 25,74%	0 %

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

5 RESULTADOS

Os resultados que serão apresentados nesse capítulo decorrem da passagem dos carregamentos móveis descritos na NBR 7188:2013, AASHTO-LRFD (2020), Eurocode 1 (2003) e o carregamento especial DNIT de 312 t (TTE-312) sobre a ponte do rio Croatá, onde os resultados de esforços internos característicos nas vigas longarinas, identificadas por meio da Figura 44, são expressos na Tabela 20. Para a NBR 7188:2013 foi utilizado o veículo TB-450, e o veículo especial descrito na norma com peso total de 512 t (TTE-512), para a norma americana AASHTO-LRFD (2020) foi utilizado o caminhão HS 20-44 somado a carga distribuída (HL-93) e para o Eurocode 1 (2003) foi utilizado o modelo de carga 1 somado a carga de multidão.

Figura 44 – Meia Planta baixa da Superestrutura



Fonte: DNIT,2018 (Adaptado).

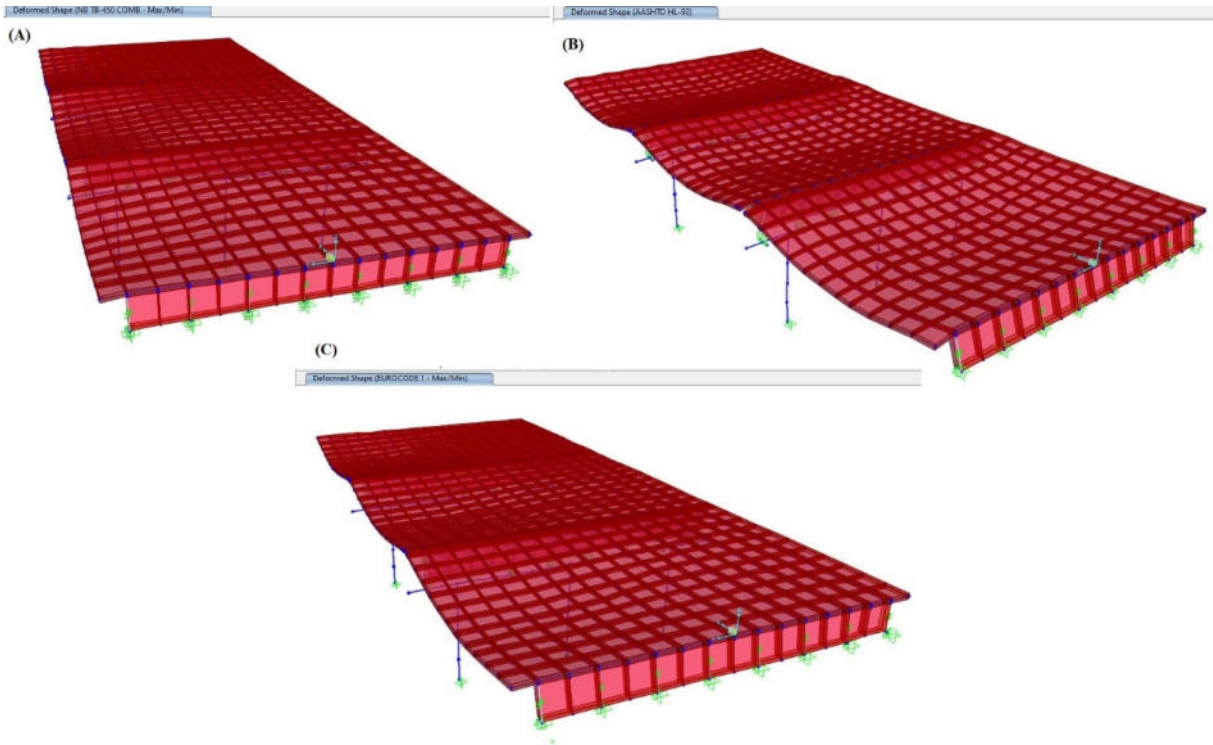
Tabela 20 – Resumo de solicitações máximas nas longarinas.

Viga	Veículos móveis						Veículos especiais			
	NBR 7188:2013		AASHTO-LRFD (2020)		Eurocode 1 (2003)		NBR 7188:2013		Trem-tipo especial DNIT	
	M _k (tf.m)	V _k (tf)	M _k (tf.m)	V _k (tf)	M _k (tf.m)	V _k (tf)	M _k (tf.m)	V _k (tf)	M _k (tf.m)	V _k (tf)
1	108,75	44,04	43,14	20,01	83,58	31,38	1,58	0,28	0,66	0,15
2	76,94	33,64	36,74	16,59	81,04	31,81	12,02	2,73	4,82	1,00
3	44,20	16,13	45,51	21,85	68,26	26,10	35,19	13,84	16,28	5,51
4	12,66	2,63	42,11	17,74	51,80	20,89	50,01	23,20	30,61	13,13
5	2,43	0,33	44,80	31,98	34,08	12,47	50,00	23,20	30,61	13,13
6	0,30	0,20	31,56	14,14	19,10	6,92	35,19	13,84	16,28	5,51
7	0,07	0,17	25,23	12,58	8,19	2,51	12,02	2,73	4,82	1,00
8	0,09	0,12	10,60	2,41	2,79	0,74	1,58	0,28	0,66	0,15

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Na Tabela 20 percebe-se que as solicitações máximas nas vigas longarinas, durante a passagem dos carregamentos móveis de projeto adotados nas normativas estudadas, estão localizadas nas vigas externas (viga 1). Isto se deve ao fato de que durante a passagem dos carregamentos na estrutura as cargas móveis são posicionados de forma a obterem as solicitações máximas na ponte, ou seja, são posicionados em locais mais desfavoráveis, o que se relaciona a uma das extremidades da estrutura, o deslocamento gerada na ponte por esses carregamentos podem ser vista na Figura 45 (A) para a norma brasileira, na Figura 45 (B) norma americana e na Figura 45 (C) norma europeia.

Figura 45 – Deslocamentos devido as cargas móveis de projeto: (A) NBR 7188:2013, (B) AASHTO-LRFD (2020) e (C) Eurocode 1 (2003).

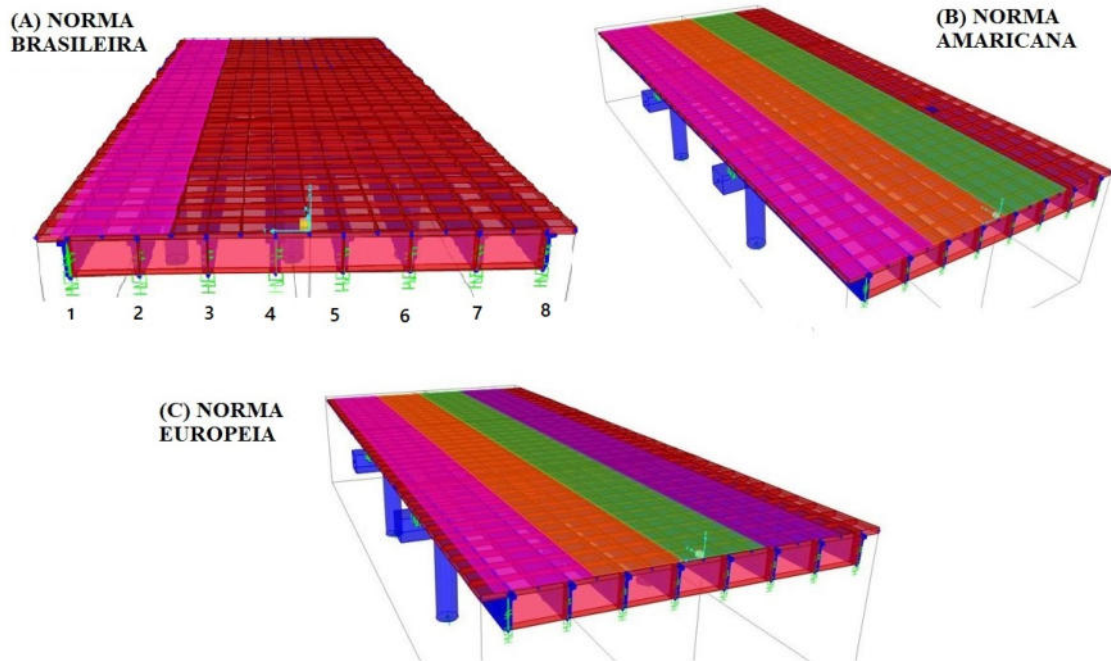


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Foi possível constatar, conforme ilustrado na Figura 45, que a deformação sofrida pela superestrutura é semelhante entre as normas americana e europeia e diferentes da norma brasileira. Nas normas internacionais a deformação imposta à estrutura se propaga em boa parte do tabuleiro a contar da extremidade, enquanto na norma brasileira a deformação concentra-se na extremidade da ponte. Essas diferenças nas deformações da estrutura relacionam-se ao posicionamento dos veículos móveis e as cargas de multidão durante as verificações de solicitações máximas na ponte, que são descritas de formas diferentes pelas normativas.

As normas americanas e europeias estabelecem os seus números de faixas e nestas devem constar carregamentos móveis e de multidão, por outro lado a norma brasileira por sua vez estabelece apenas um veículo móvel posicionado juntamente com uma carga de multidão ao longo de uma única faixa que apresente valores mais desfavoráveis, ilustrado por meio da Figura 46. Essas peculiaridades de verificações explicam as diferentes deformações impostas pelas cargas móveis no tabuleiro da ponte.

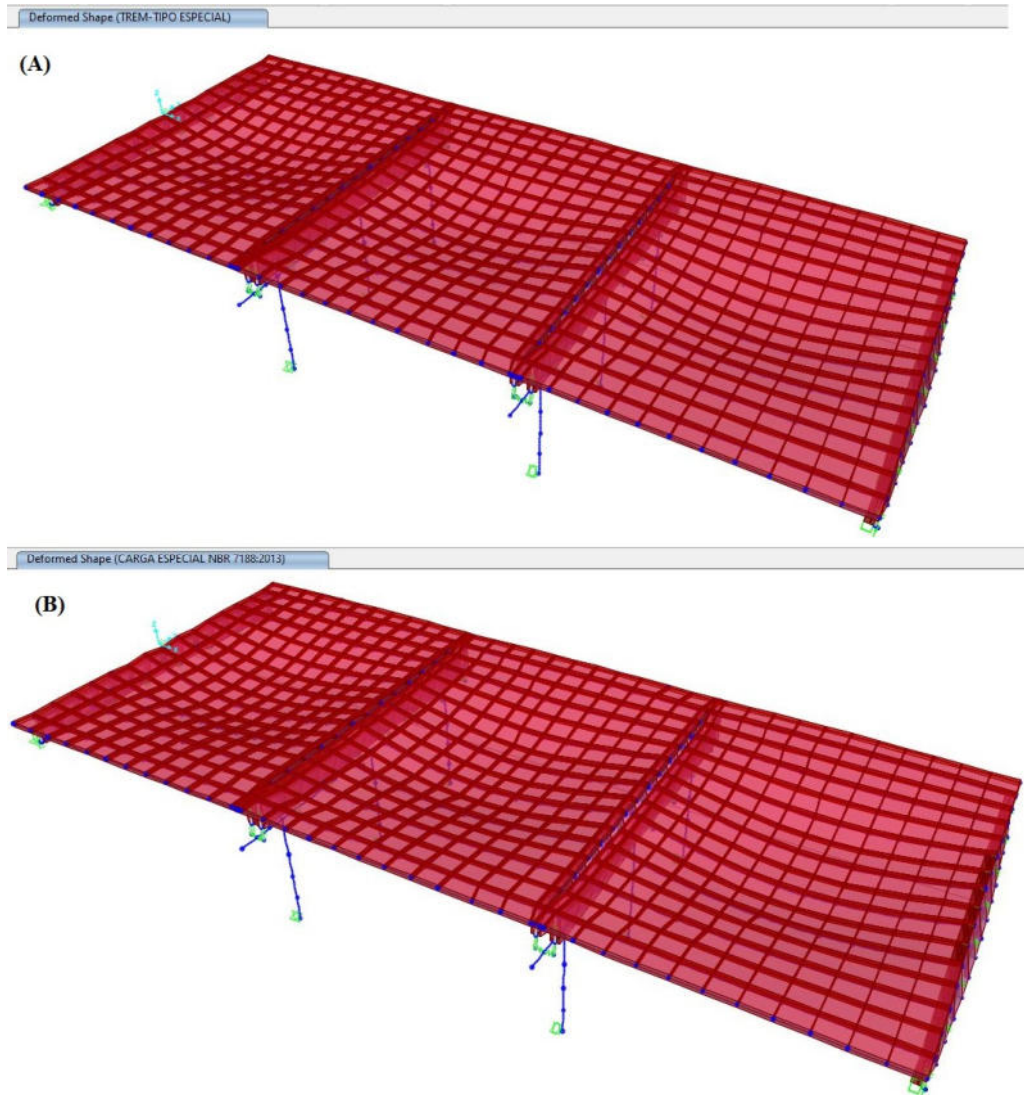
Figura 46 – Faixas de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Por outro lado, observa-se que os carregamentos especiais, tanto o descrito pela NBR 7188:2013, como o veículo especial de 362 t descrito pela carga do DNIT, geram solicitações máximas nas vigas internas, ilustradas na Figura 47. Esses resultados decorrem do fato de que durante a passagem dos veículos especiais, a fim de gerarem situações menos desfavoráveis a estrutura, esses carregamentos são posicionados no meio da ponte, para promover uma melhor distribuição de esforços.

Figura 47 – Configuração deformada do tabuleiro: (A) Trem-tipo especial DNIT; (B) Trem-tipo especial NBR 7188:2013



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se ainda, que os carregamentos móveis de projeto, descritos nas normativas, exercem solicitações superiores aos dos veículos especiais. Essas solicitações superiores estão relacionadas aos coeficientes de impacto que majoram o efeito das solicitações, associados a outros fatores como por exemplo, a distância dos eixos de aplicação dos carregamentos, a carga por eixo de cada veículo e aos carregamentos de multidão associados aos veículos tipos durante a passagem sobre a estrutura.

Segundo as recomendações estabelecidas pela NBR 7188:2013, os efeitos de aceleração, frenagem e carregamento de multidão, são dispensados durante a passagem dos veículos especiais. A dispensa desses efeitos decorre de a passagem desses veículos ocorrerem

em situações mais controlada, e, portanto, diminuem esses efeitos de solicitações comparadas aos veículos móveis de projeto.

Para obtenção dos fatores de segurança fez-se uso da Equação 11 estabelecida pelo DNIT, na obtenção dos fatores de segurança no estudo de viabilidade estrutural. Esse fator estabelece, para passagem do carregamento de forma segura, que a razão entre os efeitos dos carregamentos máximos do veículo de projeto pelo veículo especial, nas combinações do estado limite último, deve ser superior a um.

Os fatores de segurança (FS) apresentados na Tabela 21 e na Tabela 22 estão relacionadas aos resultados obtidos para as combinações de ELU entre os carregamentos móveis descritos nas normativas estudadas durante a combinação de projeto, valores de solicitações máximas, pelo carregamento especial descrito pelo DNIT. Essas combinações foram efetuadas de duas formas, para os casos de aplicação do coeficiente de ponderação (CP) nas equações de combinação de ELU, representado pela Tabela 20, e para o caso da não aplicação dos CPs nas combinações, apresentado na Tabela 21.

Foram feitas duas análises com os FSs. A primeira análise é demonstrada por meio da Tabela 21, onde os fatores de segurança foram obtidos levando-se em consideração os coeficientes de ponderação estabelecidos nas normativas para ponderar as solicitações máximas durante a combinação ELUs. Os FSs da Tabela 21 são obtidos através da razão entre a combinação dos veículos tipo das normas pelo veículo especial do DNIT, para os fatores das três primeiras linhas, e pela razão do veículo especial da NBR 7188:2013 pelo veículo especial do DNIT para os FSs da última linha, todas as combinações durante o ELU. A segunda análise é demonstrada por meio da Tabela 22 para as mesmas combinações, onde os efeitos das combinações das solicitações máximas para obtenção dos fatores de segurança não levaram em consideração os coeficientes de ponderação, obtendo deste modo fatores de segurança menores.

Tabela 21 – Fatores de segurança obtidos considerando coeficientes de ponderação

Normas	Coeficiente de ponderação (C.P)	M _d (tf.m)	V _d (tf)	FS ≥ 1 considerando CP	
				M _d (tf.m)	V _d (tf)
NBR 7188:2013	1,50	163,12	66,06	4,44	4,19
AASHTO-LRFD (2020)	1,75	79,64	55,96	2,17	3,55
Eurocode 1 (2003)	1,50	125,37	47,72	3,41	3,03
Trem-tipo especial NBR 7188:2013	1,20	60,01	27,84	1,63	1,77

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 22 – Fatores de segurança obtidos sem considerar coeficientes de ponderação

Normas	M _k (tf.m)	V _k (tf)	FS ≥ 1 sem considerar CP	
			M _k (tf.m)	V _k (tf)
NBR 7188:2013	108,75	44,04	3,55	3,35
AASHTO-LRFD (2020)	45,51	31,98	1,49	2,43
Eurocode 1 (2003)	83,58	31,81	2,73	2,42
Trem-tipo especial NBR 7188:2013	50,01	23,20	1,63	1,77

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Observa-se que a presença dos coeficientes de ponderação resultou fatores de segurança mais altos, vistos na Tabela 21, para os momentos fletores e esforços cortantes, exceto para o veículo especial em que os valores de FS foram mantidos os mesmos devido ao fato dos coeficientes de ponderação para os veículos especiais serem iguais. Sendo assim, quando inseridos os coeficientes nas equações obtemos resultados a favor da segurança, visto que a razão da resistência, correspondente as combinações de projeto, e a solicitação, corresponde as cargas especiais, apresentam valores superiores de FS.

Os resultados obtidos sem os CPs, vistos Tabela 22, resultaram FSs superiores a um demonstrando que mesmo sem a presença dos coeficientes a passagem do carregamento especial seria possível. Portanto, se o carregamento especial descrito pelo DNIT tivesse que transpor a ponte sobre o rio Croatá, a sua passagem poderia ser efetuada com segurança estrutural, segundo o que estabelece a metodologia do DNIT para verificação estrutural de obras de arte especiais. Infere-se que os FSs obtidos por meio da norma brasileira são superiores aos das normas internacionais utilizadas, demonstrando que, durante a concepção das solicitações das pontes a norma nacional se comparada as normativas internacionais trabalhadas é mais conservadora.

A análise relacionada à Tabela 23 corresponde aos FSs obtidos entre a razão da combinação no ELU dos veículos móveis descritos na NBR 7188:2013. Nesta combinação foi estabelecido o FS entre o veículo de projeto e o veículo especial descritos pela NBR 7188:2013. Com isso foi possível observar que a norma prevê um carregamento especial, para verificação da passagem de cargas especiais, que apresenta um FS superior a um mesmo sem a aplicação dos CPs, sendo considerado favorável, segundo a metodologia do DNIT para verificação estrutural de OAE.

Tabela 23 – Fatores de segurança obtidos pelos veículos estabelecidos pela NBR 7188:2013

Norma	M _k (tf.m)	V _k (tf)	FS ≥ 1 sem considerar CP	
			M _k (tf.m)	V _k (tf)
NBR 7188:2013	108,75	44,04	2,17	1,90

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

As solicitações máximas decorrentes da passagem dos carregamentos dos veículos móveis de projeto, segundo as prescrições de verificação estabelecidos pelas normativas, foram avaliadas comparativamente. As duas primeiras comparações, Tabela 24 e Tabela 25, foram estabelecidas entre a razão da solicitação máxima do veículo de projeto da norma brasileira e os veículos de projeto das normas internacionais. Seus resultados são apresentados na Tabela 24, entre as solicitações máximas de projeto e, na Tabela 25, entre as solicitações máximas características das distintas normas. As duas últimas comparações, Tabela 26 e Tabela 27, foram estabelecidas entre a razão da solicitação máxima dos veículos de projeto da norma europeia pelo da norma americana. Seus resultados são apresentados na Tabela 26, entre as solicitações máximas de projeto e, na Tabela 27, entre as solicitações máximas características.

Tabela 24 – Razões entre as solicitações máximas de projeto da norma brasileira e internacionais

Norma	M _d (tf.m)	V _d (tf)
AASHTO-LRFD (2020)	2,05	1,18
Eurocode 1 (2003)	1,30	1,38

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Tabela 25 – Razões entre as solicitações máximas características da norma brasileira e internacionais

Norma	M _k (tf.m)	V _k (tf)
AASHTO-LRFD (2020)	2,39	1,38
Eurocode 1 (2003)	1,30	1,38

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Tabela 26 – Razões entre as solicitações máximas de projeto das normas internacionais

Norma	M _d (tf.m)	V _d (tf)
Eurocode 1(2003) / AASHTO-LRFD (2020)	1,57	0,85

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Tabela 27 – Razões entre as solicitações máximas características das normas internacionais

Norma	M_k (tf.m)	V_k (tf)
Eurocode 1 (2003) / AASHTO-LRFD (2020)	1,84	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Analisando a Tabela 24 e a Tabela 25, pode-se constatar que diante da norma americana as solicitações para o momento fletor de projeto e momento fletor característico máximos obtidos para a norma brasileira, apresentam resultados com variações em termos de FS superiores se comparado aos demais resultados. Entretanto, ao observar os resultados obtidos entre as razões das solicitações de momentos fletores máximos da norma brasileira para com a norma europeia, os resultados apresentam valores mais aproximados para as quatro análises apresentadas na Tabela 24, Tabela 25, Tabela 26 e na Tabela 27. Os resultados obtidos entre a norma nacional em relação a norma europeia, Tabela 24 e Tabela 25, para este exemplo apresentam razões de FS menores se comparadas aos demais FSs obtidos nesta análise. Os resultados observados explicitam uma maior aproximação entre a norma brasileira e a norma europeia em se tratando dos momentos fletores máximos para o exemplo considerado.

Para os valores de esforços cortantes máximos, as razões da norma brasileira com as duas normas internacionais, Eurocode 1 (2003) e AASHTO-LRFD (2020), explicitam resultados iguais quando comparamos os resultados de FSs obtidos para os esforços cortantes das cargas características, valores aproximados quando comparamos os FSs das cargas de projeto. Os valores das razões entre as solicitações características e as solicitações de projeto tanto para momentos fletores como para esforços cortantes entre a norma brasileira e europeia foram os mesmos, devido as normas apresentarem coeficientes de ponderação semelhantes nas combinações últimas para as cargas móveis.

As normas internacionais apresentam entre si valores de esforços cortantes máximos mais aproximados. No tangente aos esforços cortantes característicos, apresentam valores quase idênticos de FS, ilustrado na Tabela 22, e suas razões de FSs, apresentados na Tabela 26 e na Tabela 27, são as mais aproximadas de um. Em síntese os momentos fletores que mais se aproximam entre as três normas são os da norma nacional com a norma europeia, Tabela 24 e Tabela 25, e para os esforços cortantes os valores das normas internacionais são os mais aproximado, Tabela 26 e Tabela 27.

Para o exemplo considerado se definíssemos um ranque em entre as três normas, teríamos no topo a NBR 7188:2013, com valores de FSs superiores, seguida pelo

Eurocode 1:2003 e em última posição a AASHTO-LRFD (2020) com os menores valores de FSs obtidos durante as análises.

Observou-se nesse trabalho que as distâncias entre os eixos de aplicação de carga também influenciam nas solicitações máximas, vistas por meio da Tabela 28. A Tabela 28 resume os valores de momentos fletores máximos, obtidos quando o carregamento pontual do veículo tipo da norma brasileira TB-450, tem suas distâncias entre eixos variadas em 0,5 m, 1 m, 1,5 m (veículo padrão) e 2 m. Pode-se observar que os efeitos dos carregamentos aumentam conforme se aproximam os eixos dos veículos. Esse efeito se deve a maior distância das cargas em relação aos apoios e a aproximação dos efeitos gerados por essas cargas no momento em que esses eixos se aproximam, gerando conseqüentemente maiores deformações nos pontos de aplicação de carga.

Tabela 28 – Momentos fletores máximos conforme a distância de eixos de aplicação de carga

Distância (m)	Momento fletor máximo (tf.m)
0,5	83,59
1	77,24
1,5	71,06
2	64,94

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio desta pesquisa foi possível concluir que o processo de elaboração das Autorizações Especiais de Trânsito consiste em uma importante ferramenta que permite que os órgãos que possuem jurisdição sobre as vias e obras de artes, estabeleçam limites e características para o trânsito de cargas, garantindo assim a segurança e a durabilidade da infraestrutura rodoviária durante a passagem de distintos carregamentos.

A análise numérica é uma ferramenta eficiente para a avaliação das pontes, e podendo auxiliar ou substituir a análise analítica, porém é necessário cautela com as informações inseridas no modelo numérico, as quais devem ser inseridas de forma correta, uma vez que erros podem gerar resultados pouco realistas. Portanto, é necessária a validação do modelo por meio de análise crítica do comportamento da estrutura e eventuais refinamentos e calibrações efetuadas por profissionais capacitados e experientes.

Os coeficientes de impacto descritos pelas normas brasileiras NBR 7187:2021 e NBR 7188:2013 e de ponderação NBR 8681:2003, são utilizados durante a elaboração da AET a fim de realizar a verificação estrutural e estabelecer os carregamentos de cálculo para o estado limite último - ELU, ponderando os efeitos das cargas aplicadas sobre a superestrutura. Observou-se que as normas internacionais estudadas preveem coeficientes de impacto e de ponderação. Na norma europeia, o coeficiente de impacto é previsto no próprio modelo de carga, enquanto na norma americana é determinado por meio de uma carga dinâmica.

A fim de se obter fatores de segurança mais restritivos durante as análises, os coeficientes de ponderação foram desconsiderados nas combinações, e com isso obteve-se fatores de segurança menores para as combinações das razões dos ELUs das cargas de projeto (resistência) pelas cargas especiais (solicitação). Quando da desconsideração dos coeficientes de ponderação nas análises, foram obtidos fatores de segurança menores, se comparados às análises feitas utilizando os coeficientes de ponderação - CP, o que demonstra que a inserção dos CPs torna a verificação mais segura por obter valores de FSs mais elevados.

Observa-se que a análise estrutural das obras de artes especiais, estabelecida pela metodologia DNIT, é eficiente na avaliação estrutural, uma vez que relaciona as combinações dos efeitos máximos de estado limite último das solicitações de projeto com as solicitações que serão exercidas na estrutura durante a passagem dos carregamentos especiais.

Concluiu-se ainda que os efeitos na superestrutura decorrentes da passagem dos carregamentos móveis também podem ser maximizados ou minimizados, a depender das distâncias entre eixos de aplicação de carga dos veículos. Desse modo, pode-se observar que,

para diminuir os efeitos de deformações ocasionadas pelos carregamentos aplicados durante a passagem dos veículos, uma alternativa seria aumentar a distância entre os eixos de aplicação de carga dos veículos especiais, o que acarretaria a redução das solicitações nos pontos de aplicação de carga dos eixos.

Tomando-se como base as análises realizadas para obtenção de fatores de segurança por meio da metodologia descrita pelo DNIT. Neste trabalho, observou-se para elaboração de autorizações especiais de trânsito que a norma brasileira é mais conservadora que as normas internacionais estudadas, constatando-se que os fatores de segurança para o momento característico chegaram nesta análise a valores 239% superiores à da norma americana e 130% superiores em relação à norma europeia.

Por fim, foi possível constatar que a ponte sobre o rio Croatá se encontra em condições estruturais para a passagem do carregamento especial proposto pela NBR 7188:2013, e do veículo especial de 362 t.

Como futuros desenvolvimentos do tema abordado sugere-se a incorporação da análise das deformações decorrentes de efeitos reológicos acoplados com efeitos de gradientes térmicos, bem como uma avaliação dos efeitos da interação solo-estrutura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications**. Washington DC, 2012. 6th Edition. Disponível em: <<http://mirjalili.net/download/uploads/Codes/American/AASHTO.pdf>>. Acesso 22 de agosto de 2020.

_____. **AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications**. Washington DC, 2020. 9th Edition.

_____. **AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges**. Washington DC, 2002. 17th Edition. Disponível em: <<https://baixardoc.com/documents/aashto-standard-specifications-for-highway-bridges-17th-edition--5d0fe1d616e4f>>. Acesso 22 de agosto de 2020.

ALBANO, J. F. **Efeito dos Excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. 232 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003 a.

_____. **ABNT NBR 7188: Cargas móveis rodoviárias e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003 b.

_____. **ABNT NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NB6: Cargas móveis em pontes rodoviárias.** Rio de Janeiro, 1960.

_____. **ABNT NBR. Normalização.** 2014. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>>. Acesso 22 de junho de 2020.

BARROS, F. B. **Métodos Sem Malha e Método dos Elementos Finitos Generalizados em Análise Não-Linear de Estruturas.** 221p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

BRASIL. (Setembro de 1997). Lei nº 9.503 de 23 de Setembro de 1997. *Institui o Código de Trânsito Brasileiro.*

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias.** 2. Ed. Rio de Janeiro. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação do Instituto de pesquisas rodoviárias. IPR, Publicação 709. 2004, 253 p.

BRASIL. Diário Oficial da União. Resolução n.º 1, de 06 de janeiro de 2020. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, p.76 09 de janeiro de 2020. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-1-de-6-de-janeiro-de-2020-237206893> >. Acesso 07 de março de 2020.

BRASIL. Diário Oficial da União. Resolução n.º 11, de 25 de outubro de 2004. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, 24p.

BRASIL. Diário Oficial da União. Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC. Resolução CONTRAN n.º 211, de 13 de novembro de 2006. Código de Trânsito Brasileiro-CTB. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=104237>>. Acesso 02 de janeiro 2020.

CAVALCANTE, G H. F. Contribuição ao estudo da influência de transversinas no comportamento de sistemas estruturais de pontes. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, 2016.

CAVALCANTI, P. S. P. **Pontes: trens tipo de projeto AP-02**. Sorocaba. Faculdade de Engenharia de Sorocaba. 2004. 14 p.

Computer & Structures, INC. **CSI Analysis Reference Manual**. USA. 2013.

DER. Departamento de Estradas e Rodagem. **Aprova a Norma para Concessão de Autorização Especial de Trânsito para Veículos ou Combinação de Veículos utilizados no transporte de carga indivisível e veículos especiais. Anexo III – Estudo de Viabilidade Estrutural**. Portaria n. 64, de 21 de dezembro de 2016. Disponível em: <<http://200.144.30.104/der/portarias/webportarias/HTML/PRT064-16.ASP>>. Acesso 22 de junho de 2020.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Curso: Obras de Arte Especiais Rodoviárias**. Coordenação de Estrutura/CGDESP/DNIT. Brasília. 2014. 390 slides.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Avaliação Estrutural de uma Obra de Arte Especial - OAE com o objetivo de viabilidade de Autorizações Especiais de Trânsito - AET. Nota Técnica: 0026/2016- CGDESP/DPP/DNIT**. Brasília. 2016, 14 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema de Gerenciamento de Autorização Especial de Trânsito-SIAET, Manual do usuário externo**. 2020. Disponível em: < <https://siaet.dnit.gov.br/manual/Manual%20Externo.pdf>>. Acesso 22 de junho de 2020.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Projeto: Ponte sobre o Rio Croatá – km 47,1**. 2018.

DuPontTM Neoprene. Types of Neoprene - Dry Rubber Applications, 2010.

ELDEBS, M.K.; TAKEYA, T. **Introdução às Pontes de Concreto**. Notas de Aula. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, Brasil. 2009.

ENGETI. Consultoria e Engenharia S/S Ltda. **Relatório de Viabilização TRANSPESA. RL_1322_01_02 TRANSFORMADOR**. São Paulo. 2017, 76p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN. **Eurocode 1: Actions on structures- Parte 2: Traffic loads on bridges.** EN 1991-2. Brussels, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN. **Commission Recommendation 2003/887/EC.** 2003. Disponível em: < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0887&from=EN>>. Acesso em 27 de agosto de 2020.

FERREIRA, L. M. **Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para peso de veículos de carga em pontes de concreto.** 288 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FISH, J.; BELYTSCHKO T. **Um primeiro curso em elementos finitos.** 1 ed. Tradução LTC. Rio de Janeiro. 2009.

GIL, F. S. L. **Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga biapoiada.** 68p. Trabalho De Conclusão De Curso: Bacharelado em Engenharia Mecânica- Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

HOEL, L. A.; GARBER, N. J.; SADEK, A. W. **Engenharia de infraestrutura de transportes: uma integração multimodal.** Tradução All Tasks; revisão técnica Carlos Alberto Bandeira Guimarães. São Paulo. Cengage Learning, 2011, 598 p.

JRC. JOINT RESEARCH CENTRE. European Commission. **Bridge Design to Eurocodes Worked examples.** Luxemburgo. 2012.

KELLY, J. M. **Earthquake – Resistant Design with Rubber.** Springer Verlag London. 2 ed. London, England.1997.

LUCHI, L. A.R. **Revalidação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras.** 257p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 2006.

MARCHETTI, O. **Pontes de Concreto Armado.** 2. ed. São Paulo. Blucher, 2018. 246 p.

MICRO RIO. O que é uma análise por elementos finitos. 2019. Disponível em: < <https://www.microrio.com.br/analise-por-elementos-finitos.html> >. Acesso 20 de outubro 2020.

RAO, S. S. *Vibrações Mecânicas* 4. Ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008.

REIS, N. G. **Legislação brasileira de pesos e dimensões**. Guia do transportador São Paulo, 2014. Disponível em: < <http://www.guiadotrc.com.br/lei/compendioleidabalanca.pdf>>. Acesso 06 de fevereiro 2020.

REZENDE, P.G.; MALITE, M.; NETO, J. M. Análise numérica de ligações parafusadas em chapas finas e perfis formados a frio. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 27, p. 23-27. 2006.

SANTOS, M. F. **Contribuição do efeito de combinação de veículos de carga sobre pontes rodoviárias de concreto**. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SANTOS, I. C.; NUNES, F. P. S.; SANTOS, T. A. C. **Retro-análise do projeto de recuperação da ponte sobre o Rio Cubículo na BR-101/sc**. CILAMCE, 18 p, 2016. Disponível em: < <https://core.ac.uk/download/pdf/231248958.pdf>>. Acesso 08 de agosto 2020.

SANTOS, P. M. S. et al. **Modelação em Elementos Finitos e Análise do Comportamento Dinâmico da Passagem Superior de Peões 3141**. Universidade nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

SOUZA, V. J. L. **Contribuição ao projeto e dimensionamento da superestrutura de pontes rodoviárias em vigas mistas de aço e concreto**. 166 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

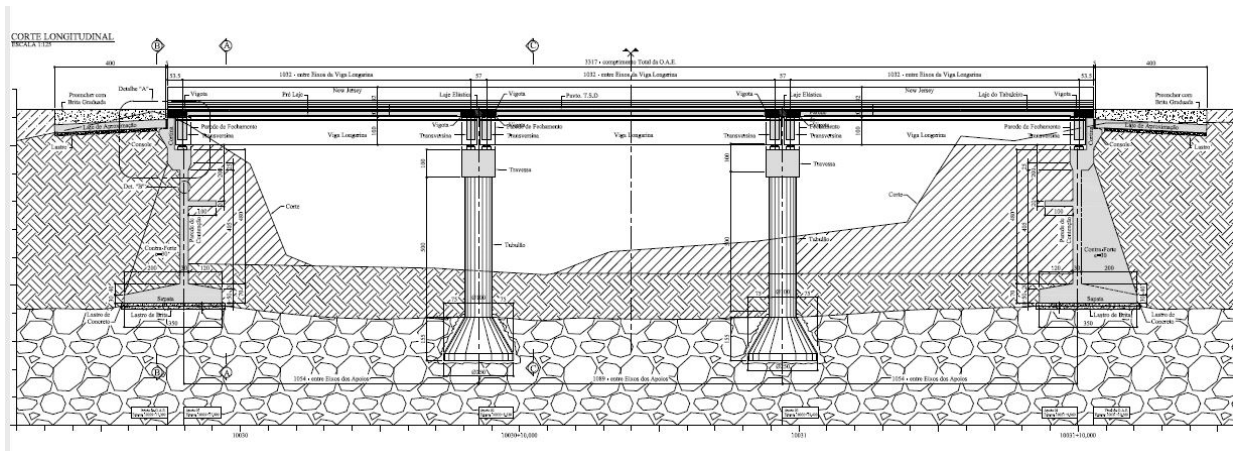
VIEIRA, M. I. D. **Tipologia, instalação, funcionamento e manutenção dos diversos tipos de aparelhos de apoio em Obras**. 226 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA MODELAGEM

A1.DADOS DA PONTE

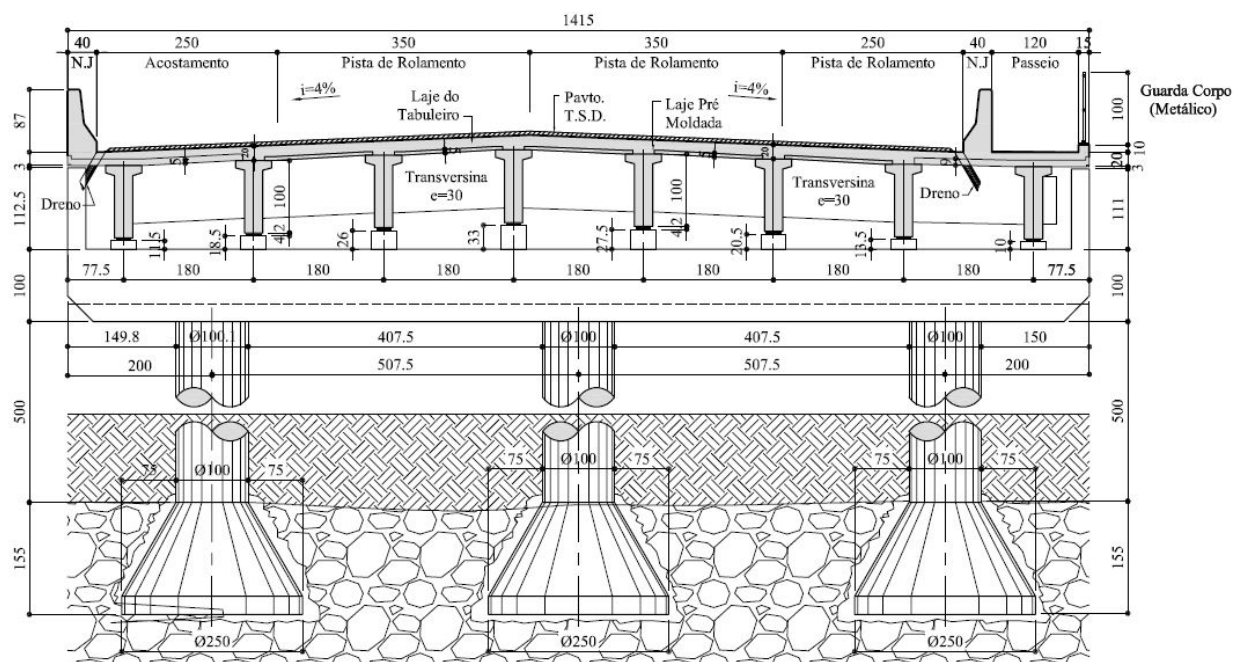
A ponte sobre o rio Croatá refere-se a uma estrutura de concreto armado, a qual possui um total de 31,97 m de comprimento longitudinal, e um vão transversal de 14,15 m. O vão transversal é composto por duas defensas de New Jersey, um passeio, dois acostamentos e duas faixas de tráfego, com 3,5 m de extensão cada, a Figura A. 1 e a Figura A. 2 ilustram algumas dessas características.

Figura A. 1 – Vista longitudinal da Ponte sobre o rio Croatá



Fonte: DNIT,2018.

Figura A. 2 – Vista transversal da Ponte sobre o rio Croatá



Fonte: DNIT,2018.

A2.CRIAR UM ARQUIVO NOVO

O processo de modelagem inicia-se com a criação de um arquivo novo, com a seleção das opções *File* → *New Model*, localizadas na barra de ferramentas superior do programa Csi Bridge®.

Cria-se um arquivo em branco (*blank*), a fim de que se possa inserir as características da ponte a ser analisada. Seguindo das unidades de medida que serão trabalhadas, neste exemplo utilizou-se as unidades referentes a peso em toneladas (tonf), comprimento em metros (m) e temperatura em graus Celsius (C°), por fim, define-se o material como *united state*.

A3.DEFINIR AS PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS

As propriedades básicas são aquelas que definem o material que compõe os elementos constituintes da estrutura da ponte e suas características, definidas a partir da sequência das opções *Components* → *Materiais* → *Add new material*, localizadas na barra de ferramentas superior do programa.

O material utilizado para o processo de modelagem da estrutura da ponte é o concreto, com as características para cada elementos da ponte expressos na Tabela A. 1.

Tabela A. 1 – Materiais constituintes dos elementos da Ponte

Elemento	Pilar	Travessa	Transversina	Longarina
Peso específico (ρ) – Tonf/m ³	2,5	2,5	2,5	2,5
Coefficiente Poisson (ν)	0,2	0,2	0,2	0,2
Resistência a compressão (Fck) – MPa	30	30	25	30
Módulo de Elasticidade secante (Esc) – kN/m ²	26072000	26072000	25492905	26072000

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Não se considera a armadura passiva no modelo como componente da estrutura, a rigidez trabalhada é elástica linear, logo independe da armadura passiva adotada (CAVALCANTE, 2016). A Figura A. 3 e a Figura A. 4 ilustram a entrada de dados no programa e a definição dos materiais para os elementos constituintes da ponte, expressos na Tabela A. 1.

Figura A. 3 – Definindo o material 1 constituente da ponte

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: C25

Material Type: Concrete

Material Grade: fc 4000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2,5

Mass per Unit Volume: 0,2549

Units

Tonf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2426924,5

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 1011218,6

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, fc: 2549,2905

Expected Concrete Compressive Strength: 2549,2905

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 4 – Definindo o material 2 constituinte da ponte

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: C30

Material Type: Concrete

Material Grade: fc 4000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2,5

Mass per Unit Volume: 0,2549

Units: Tonf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2658604,1

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 1107751,7

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, fc: 3059,1486

Expected Concrete Compressive Strength: 3059,1486

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A4.DEFINIR AS PROPRIEDADES DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A seção transversal é constituída pelos elementos que compõem a estrutura da ponte transversalmente, conforme ilustrado na Figura A. 2. Segundo El Debs e Takeya (2009), podem aparecer os seguintes elementos:

- Pista de rolamento - largura disponível para o tráfego normal dos veículos, que pode ser subdividida em faixas;
- Acostamento - largura adicional à pista de rolamento destinada à utilização em casos de emergência, pelos veículos;
- Defesa - elemento de proteção aos veículos, colocado lateralmente ao acostamento;
- Passeio - largura adicional destinada exclusivamente ao tráfego de pedestres;
- Guarda-roda - elemento destinado a impedir a invasão dos passeios pelos veículos;
- Guarda corpo - elemento de proteção aos pedestres.

Propriedades da Seção (*Frame sections*)

O acesso às propriedades da seção transversal é definido com base nas sequências das opções *Components* → *Sections properties* → *Frame sections*, localizadas na barra de ferramentas superior do programa.

Nesta etapa são definidas as características geométricas e o material utilizado para cada elemento constituinte da ponte. A Tabela A. 2 demonstra um resumo dos elementos constituintes da estrutura, suas respectivas características geométricas e seus materiais.

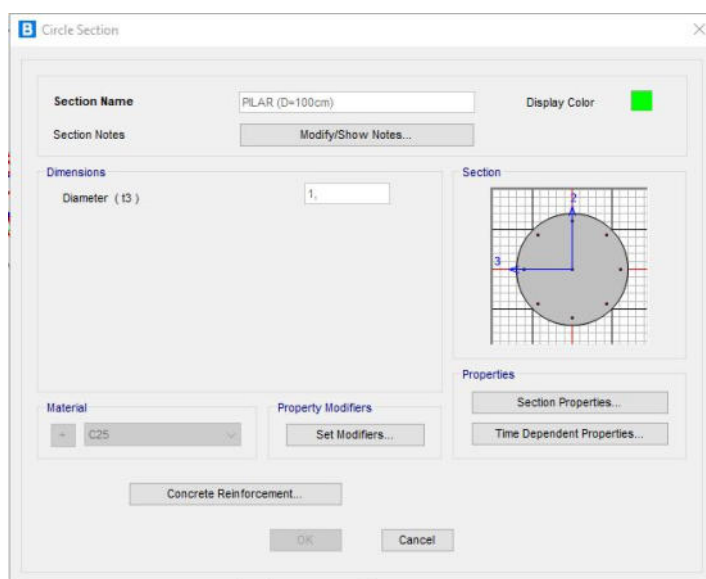
Tabela A. 2 – Materiais de cada elemento da ponte

Elemento	Pilar	Travessa	Transversina	Longarina
Material	C25	C30	C30	C40
Seção	Ver Figura A. 5.	Ver Figura A. 7.	Ver Figura A. 6.	Ver Figura A. 8.
Resistência a compressão (Fck) – kN/m ²	25000	30000	30000	30000
Módulo de Elasticidade secante (E _{sc}) – kN/m ²	26072000	26072000	26072000	30105000

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

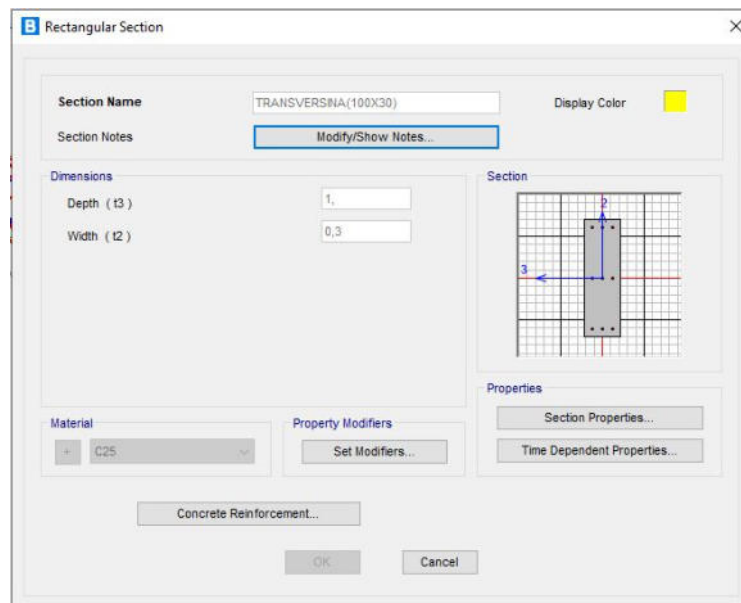
As janelas de entrada de dados relativos a geometria dos elementos da estrutura no programa, são exibidas na Figura A. 5, Figura A. 6, Figura A. 7 e na Figura A. 8, correspondente aos seguintes elementos, respectivamente: pilar, travessa, transversina e longarina.

Figura A. 5 – Seção do pilar



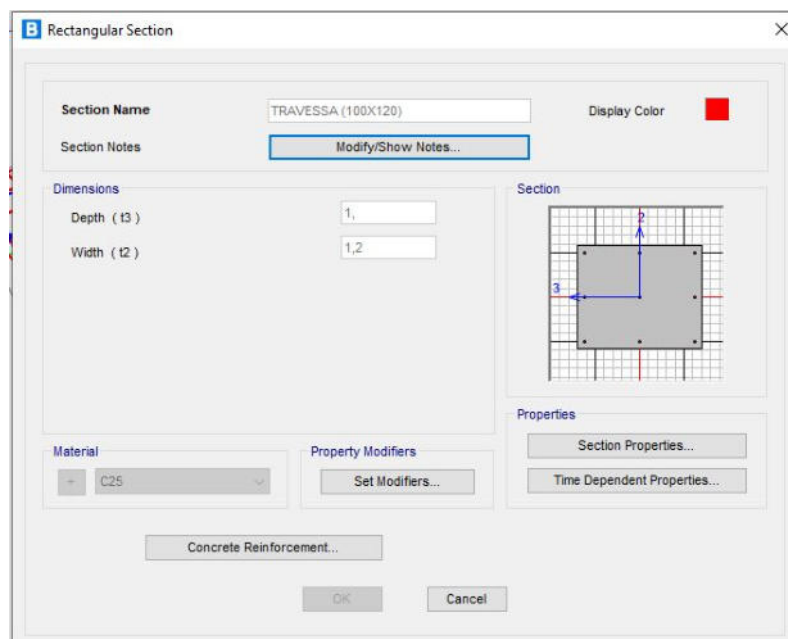
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 6 – Seção da transversina



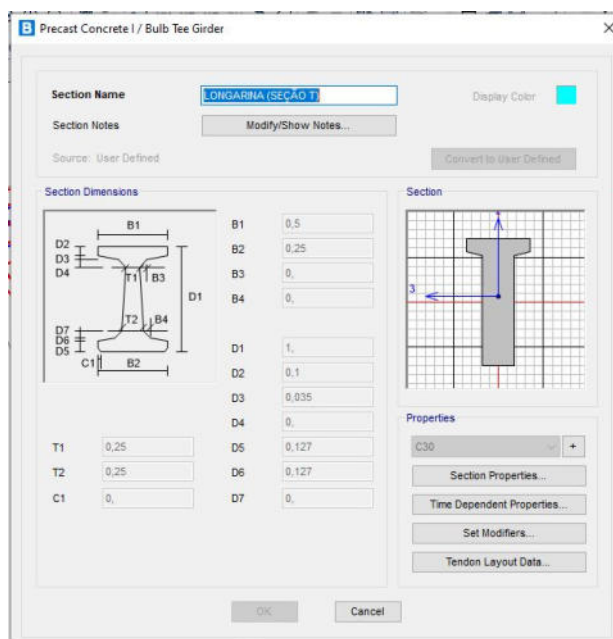
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 7 – Seção da travessa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 8 – Seção da longarina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

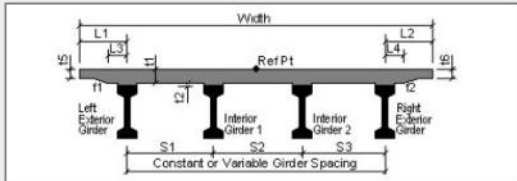
- Definir a seção transversal do Tabuleiro (*Deck Sections*)

A seção transversal do tabuleiro da ponte é definida a partir da sequência das seguintes opções: *Components* → *Deck sections* → *Add new section*.

Nessa etapa se define o tipo de tabuleiro a ser trabalhado, para este caso se tem um tabuleiro pré-moldado seção I (*precast I girder*). Determina-se a seção transversal de todo o tabuleiro, laje e longarina por meio da aba *Definitions*, como demonstrado na Figura A. 9 e na Figura A. 10. Nesta janela é definido o material da laje, número de longarinas internas, comprimento do tabuleiro, espessura da laje e outras informações necessárias durante o processo de modelagem.

Figura A. 9 – Definição das propriedades do tabuleiro 1

B Define Bridge Section Data - Precast Concrete I Girder



Section Data

Definition Loads

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	TABULEIRO
Slab Material Property	C30
Number of Interior Girders	6
Total Width	14,15
Girder Longitudinal Layout	Along Layout Line
Constant Girder Spacing	Yes
Constant Girder Haunch Thickness (t2)	No
Constant Girder Frame Section	Yes
Slab Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0,2
Haunch Height for Left Exterior Girder (t2)	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Right Exterior Girder (t2)	0,

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

Materials Frame Sects Units

Tonf, m, C

Modify/Show Tendons

Tendon Layout Data...

Modify/Show Load Patterns

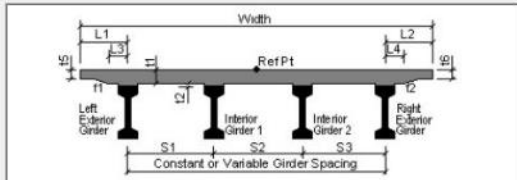
Load Patterns...

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 10 – Definição das propriedades do tabuleiro 2

B Define Bridge Section Data - Precast Concrete I Girder



Section Data

Definition Loads

Item	Value
Haunch Height for Interior Girder	0,
Haunch Height for Right Exterior Girder (t2)	0,
Girder Section Properties	
Girder Section	LONGARINA (SEÇÃO...
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0,
f2 Horizontal Dimension	0,
Left Overhang Data	
Left Overhang Length (L1)	0,775
Left Overhang Distance to Fillet (L3)	0,775
Left Overhang Outer Thickness (t5)	0,2
Right Overhang Data	
Right Overhang Length (L2)	0,775
Right Overhang Distance to Fillet (L4)	0,775
Right Overhang Outer Thickness (t6)	0,2
Insertion Point Location	
Offset X From Reference Point To Insertion Point	0,
Offset Y From Reference Point To Insertion Point	0,

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

Materials Frame Sects Units

Tonf, m, C

Modify/Show Tendons

Tendon Layout Data...

Modify/Show Load Patterns

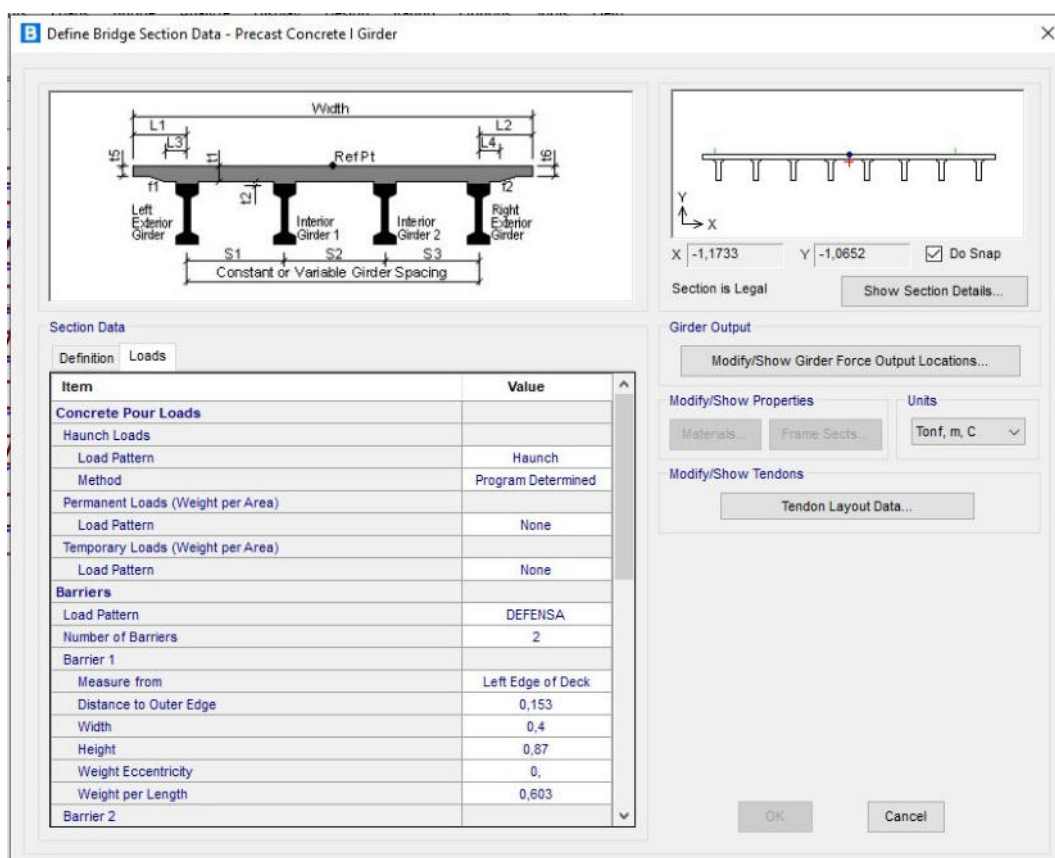
Load Patterns...

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na aba *Loads*, faz-se a inserção dos carregamentos mais usuais da estrutura os *load patterns*, estes entram de forma relativamente automática na estrutura durante a modelagem do tabuleiro. Trata-se de cargas correspondentes às defensas (*barriers*), pavimentação (*wearing surface loads – DW*) e passeio (*sidewalk*). São definidas as características desses carregamentos, como o número e as cargas correspondentes, entre outras características que podem ser observadas na Figura A. 11, Figura A. 12 e na Figura A. 13.

Figura A. 11 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 12 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 2

Section Data

Item	Value
Load Pattern	DEFENSA
Number of Barriers	2
Barrier 1	
Measure from	Left Edge of Deck
Distance to Outer Edge	0,153
Width	0,4
Height	0,87
Weight Eccentricity	0,
Weight per Length	0,603
Barrier 2	
Measure from	Right Edge of Deck
Distance to Outer Edge	1,503
Width	0,4
Height	0,87
Weight Eccentricity	0,
Weight per Length	0,603
Sidewalks	
Load Pattern	PASSEIO
Number of Sidewalks	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 13 – Definição dos carregamentos usuais do tabuleiro 3

Section Data

Item	Value
Weight per Length	0,603
Sidewalks	
Load Pattern	PASSEIO
Number of Sidewalks	0
Live Load Curb Locations	
Method	Program Determined
Distance to Inside Edge of Left Live Load Curb	0,553
Distance to Inside Edge of Right Live Load Curb	1,903
Distance to Centerline of Median Live Load Curb	0,
Width of Median Live Load Curb	0,
Wearing Surface Loads	
Load Pattern	PAVIMENTAÇÃO
Weight per Area	0,32
Temperature Loads	
Load Pattern (Positive)	Temperature Pos
Temperature Change (Positive)	30,
Load Pattern (Negative)	Temperature Neg
Temperature Change (Negative)	-40,

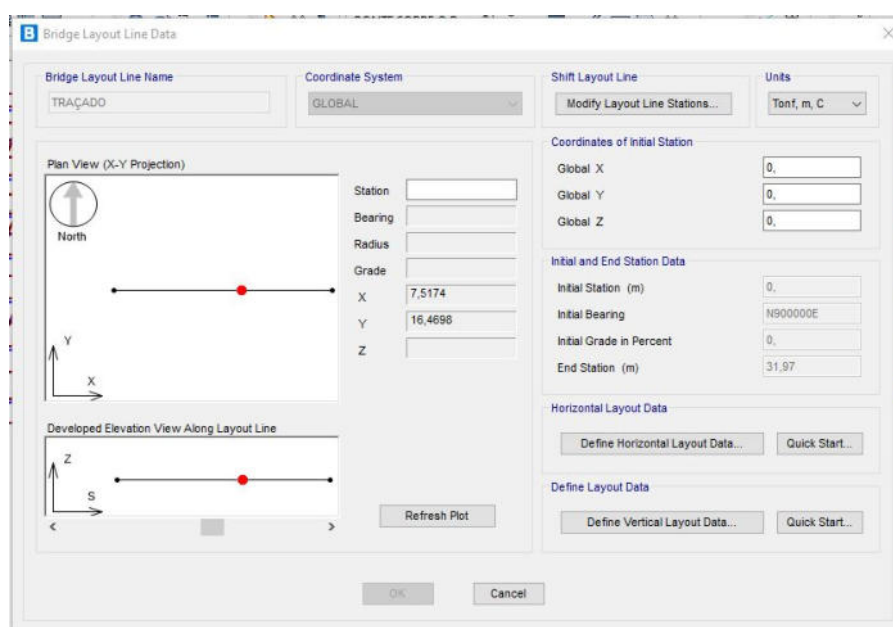
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

- Definir o traçado da ponte (*Layout line*)

As linhas de *layout* são linhas de referência utilizadas para definir o alinhamento horizontal e vertical da ponte e das faixas dos veículos. Para isso se deve seguir as opções *Layout* → *Layout Lines* → *Add new Line*, localizadas na barra de ferramentas superior do programa.

Essas linhas podem ser retas, dobradas ou curvas, tanto horizontalmente quanto verticalmente. Nelas define-se as faixas que correspondem as linhas em que vão atuar os veículos. Neste modelo há uma faixa de 31,97 m, correspondente ao comprimento longitudinal da ponte. A Figura A. 14 ilustra a janela onde são inseridas as informações de início (*inicial station*) e fim (*end station*) da linha de *layout line*.

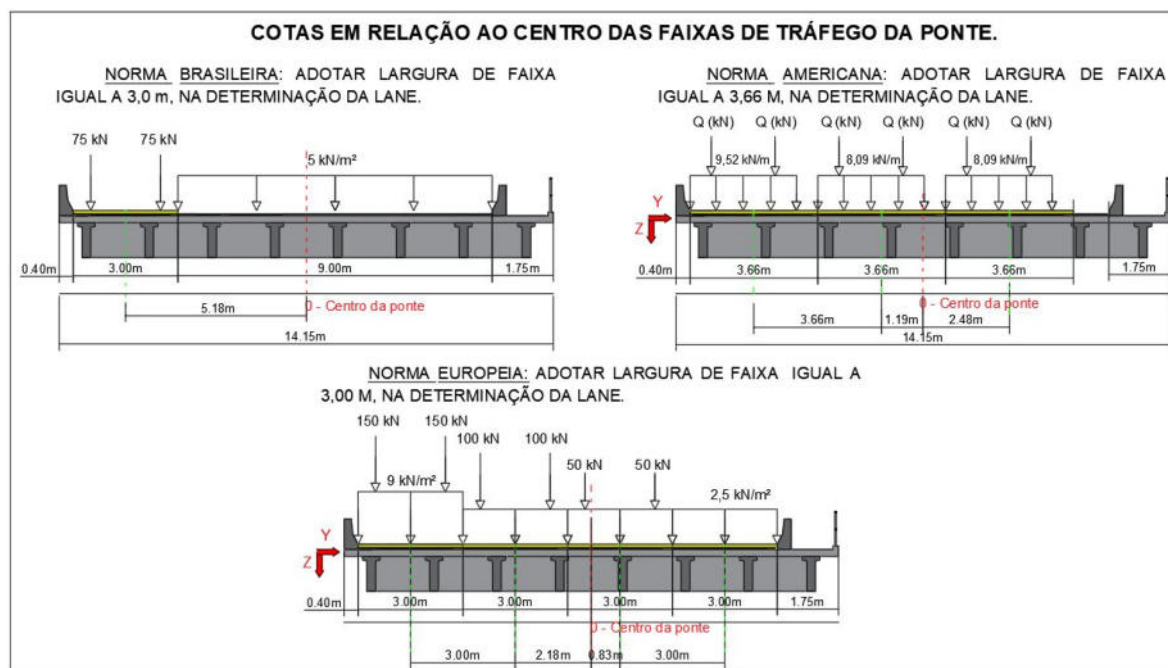
Figura A. 14 – Definição de layout line, alinhamento da ponte



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Posteriormente, é definida a faixa de rolagem, *lane*, local de posicionamento da faixa, lugar em que o veículo tipo deve trafegar para obtenção das solicitações máximas, segundo especificações das normativas em estudo. As cotas do tabuleiro da ponte em relação ao centro da ponte, são representadas transversalmente na Figura A. 15. Pode-se observar na Figura A. 15 barras em amarelo sobre o tabuleiro da ponte, que representam a localização da faixa onde o veículo tipo será posicionado para as verificações de carga.

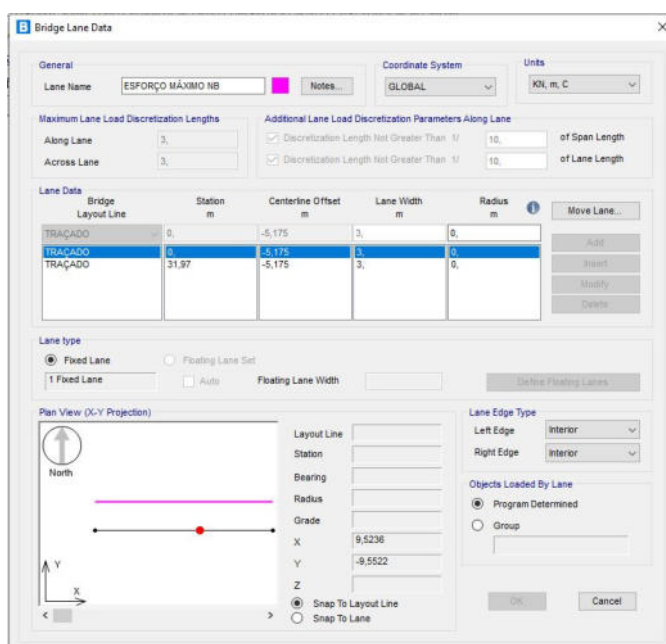
Figura A. 15 – Faixas de rolagem para obtenção de solicitações máximas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para que se possa inserir as *lanes* deve-se seguir as opções *Layout* → *Lanes* → *Add new from Layout Line*, localizadas na barra de ferramentas superior do programa. O modo de entrada das informações no programa relativa a faixa de tráfego é representada na Figura A. 16. Observa-se na Figura A. 16 uma tabela central, onde são inseridas as informações de início e fim de faixa (*station*), centro da faixa em relação ao centro da ponte (*centerline offset*) e a largura da faixa (*lane width*).

Figura A. 16 – Definição da lane, para norma brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Verifica-se para o vão dois se as definições do aparelho de apoio também foram definidas.

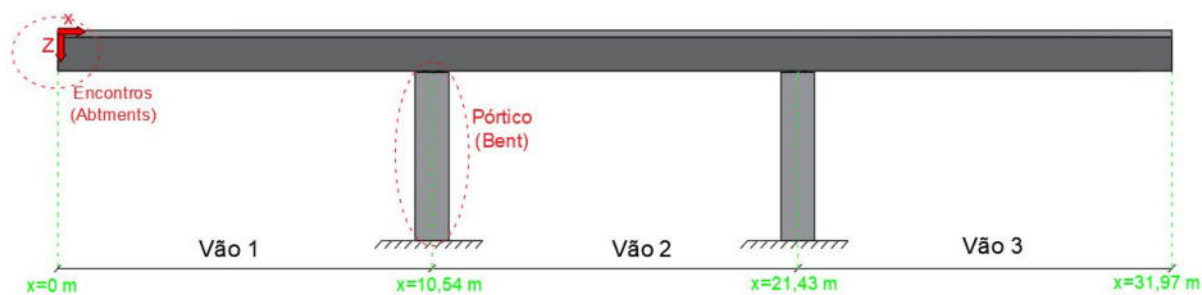
A5.CRIAÇÃO DA PONTE

As definições da ponte que foram estabelecidas anteriormente, referentes as etapas descritas nos itens A1, A2, A3 e A4, serão neste item introduzidas no modelo. Essas definições tratam das propriedades geométricas e características do material da ponte sobre o rio Croatá.

- Criar os vãos

Os três vãos da ponte e seus respectivos pontos de início e fim, devem ser inseridos no programa. As cotas dos vãos longitudinais da ponte são descritas na Figura A. 17. Para criação dos vãos da ponte deve-se seguir as opções *Bridge* → *Bridge objects* → *Add new bridge object*, disponíveis na barra de ferramentas superior.

Figura A. 17 – Cotas longitudinais da ponte



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

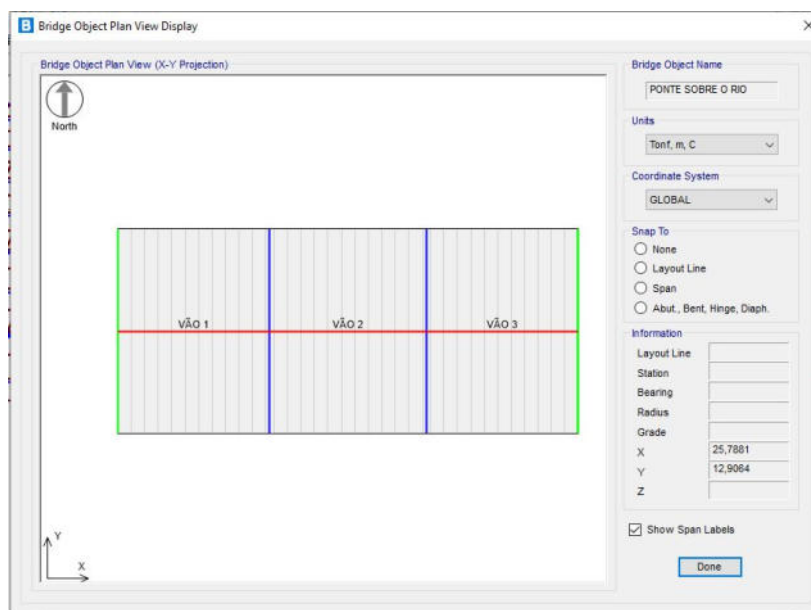
O comprimento de cada vão inserido no programa é ilustrado na Figura A. 18, onde observa-se uma tabela central indicando os respectivos pontos de início (*star station*), comprimento (*length*) e ponto final (*end station*) da ponte. A Figura A. 19 ilustra os vão com mais detalhes, cujas faixas em verde representam os encontros e as faixas em azul os pórticos.

Figura A. 18 – Criação dos vãos da ponte

Span Label	Start Station m	Length m	End Station m	Start Support	End Support
VÃO 1	0	10,54	10,54	RESTRIÇÃO DO	PÓRTICO
VÃO 2	10,54	10,89	21,43	PÓRTICO	PÓRTICO
VÃO 3	21,43	10,54	31,97	PÓRTICO	RESTRIÇÃO D...

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A. 19 – Vãos da ponte



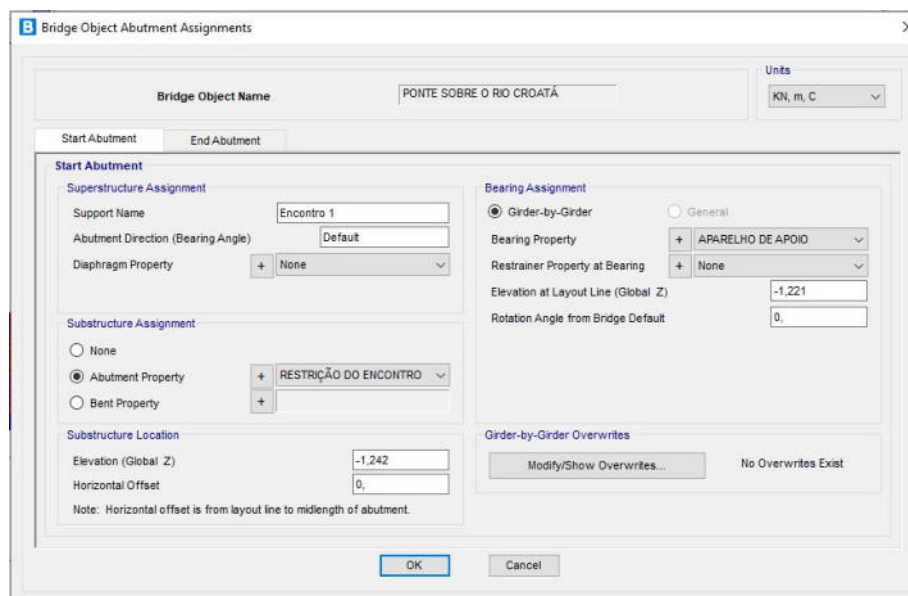
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

- Definir os encontros (*Abutments*)

A definição dos encontros é realizada na janela representada na Figura A. 18, nota-se na parte inferior direita uma aba chamada *Modify/Show assignments*. Nesta aba há várias opções, entre elas a referente aos encontros denominados *abtments*, basta selecionar esta opção e clicar em *Modify/Show*.

Seguida a seleção da opção referente aos encontros (*abtments*), a janela seguinte é representada pela Figura A. 20, onde são definidas as características dos encontros. Para o exemplo, têm-se transversinas localizadas nos encontros final (*end abutment*) e inicial (*start abutment*), assim como aparelhos de apoio. Nesta janela também são definidas as restrições dos encontros.

Figura A. 20 – Determinação dos encontros

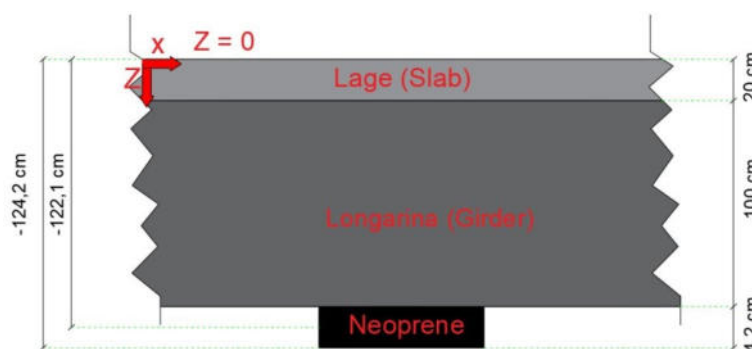


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

- Adicionar os pórticos (*Bents*) e os aparelhos de apoio (*Bearing assignment*)

Inicialmente as cotas verticais dos aparelhos de apoio devem ser definidas. As duas cotas verticais do aparelho de apoio em relação à cota superior da laje são ilustradas na Figura A. 21. A primeira cota, equivalente à distância da cota superior da laje até o centro do aparelho de apoio correspondente a -122,1 cm. A segunda cota, equivalente à distância da cota superior da laje até o fundo do aparelho de apoio a correspondente -124,2 cm.

Figura A. 21 – Cotas verticais do aparelho de apoio



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Deve-se retornar à janela *bridge object abutment assignments*, representado pela Figura A. 18. Na aba *Modify/Show assignments*, seleciona-se a opção *bents*, relativa à pórticos, basta selecionar a opção e clicar em *Modify/Show*. Desta forma tem-se a janela ilustrada na Figura A. 22.

No lado superior esquerdo da janela representada por meio Figura A. 22, informa-se a primeira cota correspondente a -122,1 cm. Na mesma janela, no lado inferior direito informa-se a segunda cota correspondente a -124,2 cm. Essas mesmas informações devem ser inseridas para o vão dois, definindo-se deste modo as cotas do aparelho e apoio.

Figura A. 22 – Inserindo os pórticos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

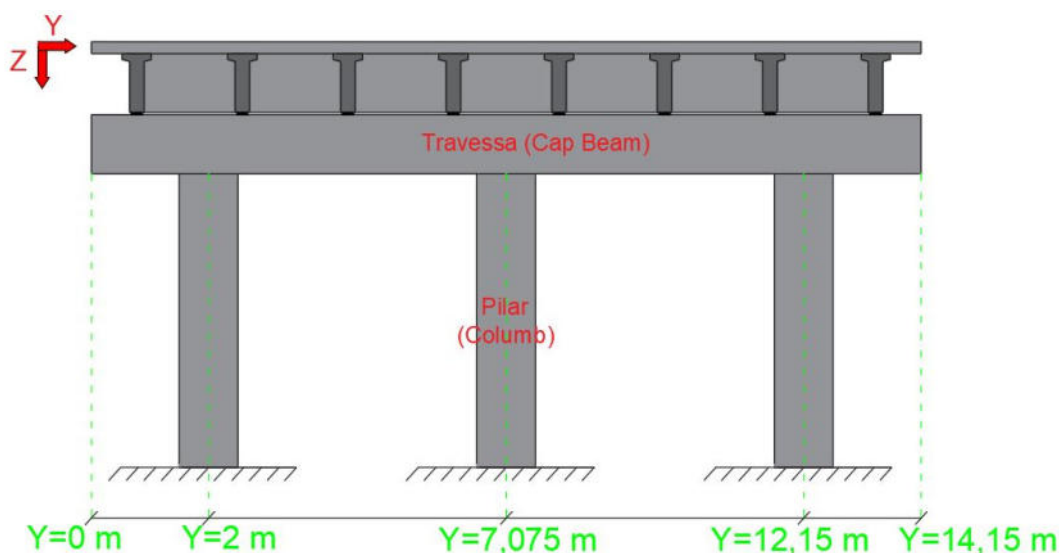
Para definir as dimensões do pórtico, deve-se permanecer na janela representada pela Figura A. 22. Nesta no canto inferior esquerdo, há a opção propriedades do pórtico, *bent property*. Ao selecionar esta opção, tem-se então janela representada pela Figura A. 23, nesta janela as características dos pórticos como o elemento de travessa, comprimento transversal, número de pilares e ligação do pórtico com o aparelho de apoio serão definidas.

Figura A. 23 – Dimensões pórtico

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para inserir as dimensões do pórtico é importante conhecer seus elementos, a Figura A. 24 representa as características transversais da ponte, tais como a travessa, número de pilares e suas cotas, a partir dela define-se as informações a serem inseridas na janela representada na Figura A. 23.

Figura A. 24 – Elementos transversais



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

A aba *Bent data* é ilustrada na Figura A. 23, nela são inseridas as seguintes informações do pórtico, composto de uma viga travessa, cujas dimensões são definidas em etapas anteriores, com comprimento do elemento travessa correspondente a 14,15 m e número de pilares igual a três. Na mesma aba seleciona-se a opção *Modify/show column data*, onde são definidas as características dos pilares, que podem ser vistas na Figura A. 25. Nesta aba é definido o

elemento pilar caracterizado em etapas anteriores, delineando a distâncias entre os eixos dos pilares, se há alguma rotação e seu tipo de fundação.

Figura A. 25 – Características dos pilares

Bridge Bent Column Data

Bridge Bent Name: PÓRTICO

Units: KN, m, C

Column Data

Column	Section	Distance	Height	Angle	Foundation
1	PILAR (D=100cm)	2,	5,	0,	Fixed
2	PILAR (D=100cm)	7,075	5,	0,	Fixed
3	PILAR (D=100cm)	12,15	5,	0,	Fixed

Seismic Hinge Data

Column	RH Long	RH Trans	Hinge Prop. Top	Hinge Prop. Bottom
1	1,	1,	Auto	Auto
2	1,	1,	Auto	Auto
3	1,	1,	Auto	Auto

Moment Releases at Top of Column

Column	R1 Release	R2 Release	R3 Release	R1 Stiffness	R2 Stiffness	R3 Stiffness
1	Fixed	Fixed	Fixed			
2	Fixed	Fixed	Fixed			
3	Fixed	Fixed	Fixed			

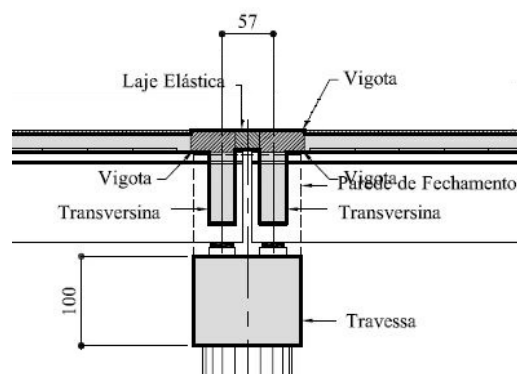
OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É importante definir como o aparelho de apoio se encontra na estrutura. Este pode ser contínuo (*single bearing line*), quando o tabuleiro da ponte é contínuo, ou seja, há transferência de esforços entres as lajes, ou o aparelho de apoio pode ser descontínuo (*double bearing line*), desse modo, não há transferência de esforços entre as lajes, sendo este o caso da ponte sobre o rio Croatá.

O detalhe da descontinuidade das lajes na ponte sobre o rio Croatá é ilustrado na Figura A. 26, onde é observada a presença de uma junta de dilatação. A ligação entre o pórtico e a longarina é realizado por meio de aparelhos de apoio. A distância longitudinal do eixo do aparelho de apoio e o eixo do apoio vertical, travessa ou pilar, neste caso a travessa, correspondente a metade da distância entre os eixos das travessas, equivalente a 28,5 cm.

Figura A. 26 – Detalhe Aparelhos de apoio descontinuo

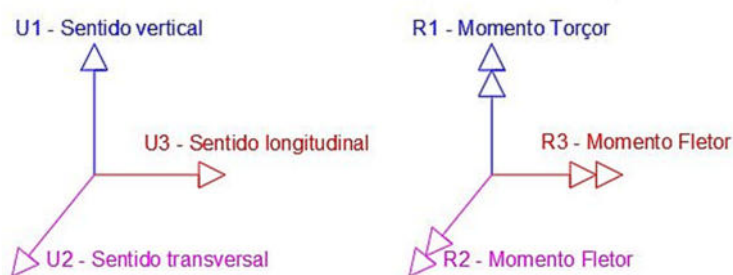


Fonte: DNIT, 2018 (adpatado).

As informações anteriores devem ser inseridas para o vão dois, definindo-se deste modo as dimensões dos pórticos localizados no final dos vãos um e dois.

As propriedades do aparelho de apoio são definidas em *bearing property*, esta opção está localiza na parte esquerda superior da janela *bridge object abutment assignments*, representada pela Figura A. 22. Os graus de liberdade do aparelho de apoio são definidos na Figura A. 27. A identificação dos graus de liberdade é necessária para que se possa inserir corretamente as propriedades do aparelho de apoio no programa.

Figura A. 27 – Graus de liberdade do aparelho de apoio

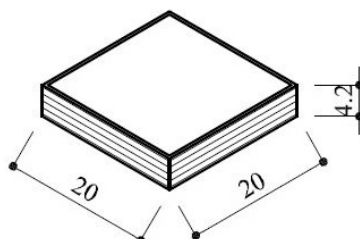


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Seis graus de liberdade são possíveis em qualquer apoio, três dos quais referem-se às translações nas direções U1, U2 e U3, sendo os restantes as rotações em torno desses três eixos R1, R2 e R3. Desde os primeiros aparelhos de apoio utilizados em obras de arte até os dias atuais, a tecnologia presente demonstra uma tipologia variada, podendo ser agrupada de acordo com os materiais que compõem os aparelhos de apoio ou em função dos movimentos permitidos por cada um, nas variadas direções consideradas, ou seja, o seu grau de liberdade (VIEIRA, 2013).

O aparelho de apoio presente neste modelo é ilustrado na Figura A. 28, constituído por neoprene e chapas de aço unidas por vulcanização, comumente chamado de aparelhos de apoio de neoprene fretado, cintado ou laminado, com dimensões de 20 cm x 20 cm, altura de 4,2 cm e módulo de elasticidade transversal de 0,1 kN/cm².

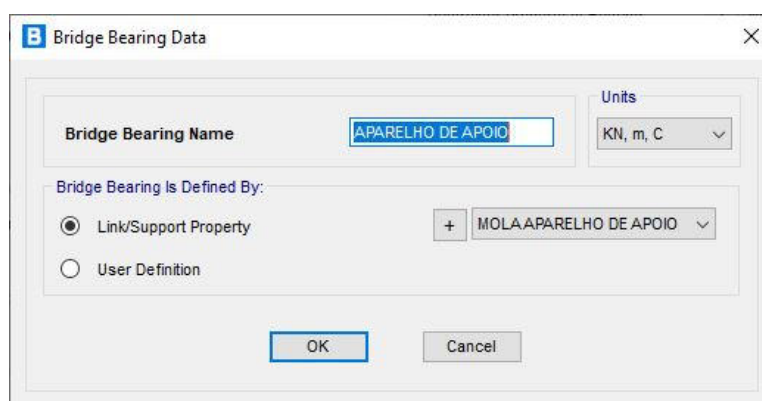
Figura A. 28 – Dimensões do aparelho de apoio, em cm.



Fonte: DNIT, 2018 (adaptado).

As definições do aparelho de apoio são introduzidas na janela representada pela Figura A. 22. Nessa janela, na aba localizada na parte superior direita há a opção das propriedades do aparelho de apoio, *Bearing Property*. selecionando esta opção surge a janela ilustrada na Figura A. 29, na qual é definida o nome do aparelho de apoio. Na opção *Link/Support Property*, são definidas as características do aparelho de apoio da estrutura de forma manual.

Figura A. 29 – Definições do aparelho de apoio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Quando selecionada a opção *Link/Support Property*, representada pela Figura A. 29, surge a janela representada pela Figura A. 30, na qual é definida as restrições dos aparelhos de apoio.

Figura A. 30 – Restrições do aparelho de apoio

The screenshot shows the 'Link/Support Property Data' dialog box. Key settings include:

- Link/Support Type:** MultiLinear Plastic
- Property Name:** MOLA.APARELHO DE APOIO
- P-Delta Parameters:** Shear Couple (selected)
- Total Mass and Weight:** Mass = 0, Weight = 0
- Factors For Line, Area and Solid Springs:** Length = 100, Area = 10000
- Directional Properties:**

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
- Stiffness Options:** Three input fields for stiffness and damping parameters.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para as propriedades que tornam o aparelho de apoio elástico é definido inicialmente o material que o compõe, o neoprene, este possui um comportamento elastoplástico perfeito, um comportamento elástico linear seguido de um comportamento plástico. A partir de então, na opção *Link/Support Type*, ilustrada na Figura A. 30, define-se o material como *MultiLinear Plastic* e denomina-o como Mola aparelho de apoio.

Neoprene é o nome comercial do elastômero sintético policloropreno, polímero do cloropreno (*DuPont*, 2010). O elastômero é definido como um material de comportamento semelhante ao da borracha, ou seja, baixa fluência plástica, grande extensibilidade, e capacidade de recuperar rapidamente a forma original após sujeito a grandes deformações. Simplificadamente suas características principais são grandes deformabilidade e elasticidade. Apresenta um baixo módulo de elasticidade, logo conseguem atingir grandes deformações mesmo para um nível baixo de tensões (SANTOS et al., 2013).

Os elastômeros são substâncias quase incompressíveis que se deformam mais por alteração da forma do que propriamente pela variação de volume. A relação tensão-deformação de um bloco de elastômero depende muito da sua forma geométrica. Se o bloco tiver uma pequena altura com grande seção transversal, a sua rigidez será muito maior do que seria se a relação entre a altura e a seção transversal fosse elevada. A rigidez de um bloco de elastômero

depende da sua forma, logo não é possível utilizar esta propriedade para classificar estes compostos independentemente da forma do bloco. As duas principais desvantagens apresentadas por estes blocos de Neoprene são o envelhecimento e o aumento da rigidez com a redução da temperatura. Quando a temperatura baixa, os elastômeros ficam com a sua capacidade de deformação limitada (SANTOS et al., 2013).

Segundo Santos et al. (2013), no que diz respeito à quantificação da rigidez horizontal deste tipo de elastômeros, esta característica física depende fundamentalmente da sua capacidade de distorção. A deformação do bloco deve-se essencialmente aos esforços de corte que o material está sujeito. A rigidez horizontal do bloco de Neoprene é expressa através da Equação 12, descrita ao longo do texto.

Os valores de rigidez transversal nos aparelhos de apoio são necessários para definição das translações nas direções U2 e U3. A translação na direção vertical U1 é dita fixa, ou seja, ela é indeformável verticalmente, considera-se uma rigidez quase infinita nesta direção. A rigidez rotacional também deve ser calculada para definição das rotações R2 e R3. A rigidez a torção R1 é livre, pois não é considerada a rigidez a torção no aparelho de apoio.

Segundo Kelly (1997), a rigidez translacional (K_h) do aparelho de apoio é dada pela Equação 12.

$$K_h = \frac{G \cdot A}{h} = 9,524 \text{ kN/cm} \quad (12)$$

onde,

A é a área;

h é a altura;

G é o módulo de elasticidade transversal, para neoprene 0,1 kN/cm²;

A rigidez translacional é estabelecida por meio da seleção da opção *Modify Show/ for U2* e *Modify Show/ for U3*, para as direções U2 e U3, respectivamente. Localizadas na aba *Directional properties*, na janela representa pela Figura A. 30. A Figura A. 31 ilustra a janela na qual essa informação é inserida, essa rigidez representa o primeiro trecho do comportamento elastoplástico perfeito do neoprene.

Figura A. 31 – Configurações de rigidez translacional na direção U2

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Considera-se a existência de esforços de rotação presentes no elemento de ligação que define o aparelho de apoio em neoprene das zonas de apoio das vigas. A rigidez à rotação é definida pela relação entre momentos e rotações em torno de um eixo horizontal, paralelo a uma das faces, no caso de blocos retangulares (SANTOS et al., 2013).

A rigidez rotacional é definida através de deduções que serão realizadas ao longo do texto. O autor Kelly (1997) elaborou um dimensionamento para apoios submetidos a ações dinâmicas, expressando a da rigidez equivalente/efetiva (EI_{eff}) para aparelhos de apoios retangulares, por meio da Equação 13.

$$EI_{eff} = \frac{G \cdot b \cdot a^6}{85,6 \cdot h^2} \left(\frac{kN}{cm^2} \right) \quad (13)$$

onde,

a é o comprimento;

b é a largura;

h é a altura;

G é o módulo de elasticidade transversal.

Porém, o EI_{eff} não representa a rigidez do elemento, para isso o aparelho de apoio é ilustrado como sendo um conjunto de molas. No qual esse conjunto de molas representa o comportamento de uma barra, a rigidez da mola (K_m) deve ser equivalente a rigidez da barra (K_b), $K_m \equiv K_b$. Desse modo, faz-se a equivalência do aparelho de apoio como um elemento, transformando-o em uma mola.

A lei de Hooke é uma lei da física que determina o alongamento (x) sofrido por um corpo elástico através de uma força (F) e é representada pela Equação 14. De forma análoga, para o momento (M) tem-se a expressão demonstrada pela Equação 15, que seria a rotação (θ) sofrida por um corpo através de um momento, onde se evidencia a rigidez k .

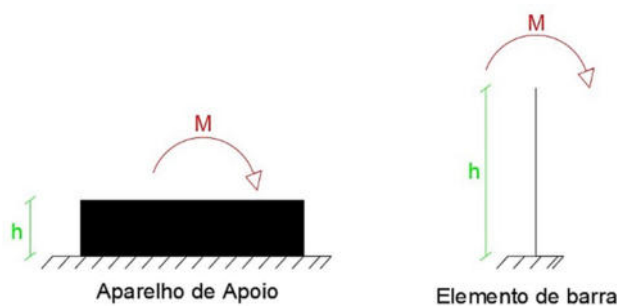
$$F = k \cdot x \quad (14)$$

$$M = k \cdot \theta \rightarrow k = \frac{M}{\theta} \left(\frac{kN \cdot cm}{rad} \right) \quad (15)$$

A partir da análise das unidades de EI_{eff} e k , percebe-se a inconsistência entre as duas expressões, uma vez que não representam o mesmo fenômeno. Sendo assim, não há como se fazer uma associação direta entre eles. Logo, para que se possa determinar a rigidez rotacional (K_r) faz-se a analogia com barras.

A equivalência do aparelho de apoio com o elemento de barra é representada na Figura A. 32. Nesta equivalência temos o aparelho de apoio travado, com um momento fletor atuando na estrutura. Este é simulado como uma barra engastada e livre, com altura h e um momento de topo M com rigidez efetiva EI_{eff} .

Figura A. 32 – Analogia de aparelho de apoio com elemento de barra



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Na resistência dos materiais a expressão correspondente a rotação nos apoios com borda livre (θ_{bl}) é dada por meio da tabela de deflexão em vigas. Neste trabalho trataremos do caso de uma viga engastada com um momento na extremidade livre, cuja expressão é representada pela Equação 16.

$$|\theta_{bl}| = \frac{M \cdot h}{EI_{eff}} \rightarrow M = \frac{EI_{eff}}{h} \cdot \theta_{bl} \quad (16)$$

Fazendo a equivalência da Equação 15 com a Equação 16, para rigidez k , tem-se expressão dada pela Equação 17.

$$k = \frac{EI_{eff}}{h} \quad (17)$$

Com esta simplificação é possível fazer a associação do EI_{eff} com a rigidez k , onde substituindo-se a parcela do EI_{eff} , dada pela Equação 13, na Equação 17 e desta forma tem-se a Equação 18. A Equação 18 é a resultante entre a simplificação dada pela tabela de deflexão em vigas, para a rotação nos apoios. Com a Equação 18 calcula-se a rigidez rotacional do aparelho de apoio quadrado (Kr).

$$Kr = \frac{G \cdot a^6}{88,6 \cdot h^3} = 1009,15 \text{ kN.cm} \quad (18)$$

onde,

a é o comprimento;

h é a altura;

G é o módulo de elasticidade transversal.

A rigidez rotacional é estabelecida por meio da seleção da opção *Modify Show/ for R2* e *Modify Show/ for R3*, para as direções U2 e U3, respectivamente. Localizadas na aba *Directional properties*, na janela representa pela Figura A. 30. A, a Figura A. 33 ilustra a janela onde essa informação é inserida.

Figura A. 33 – Rigidez rotacional, dados em kN.cm

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

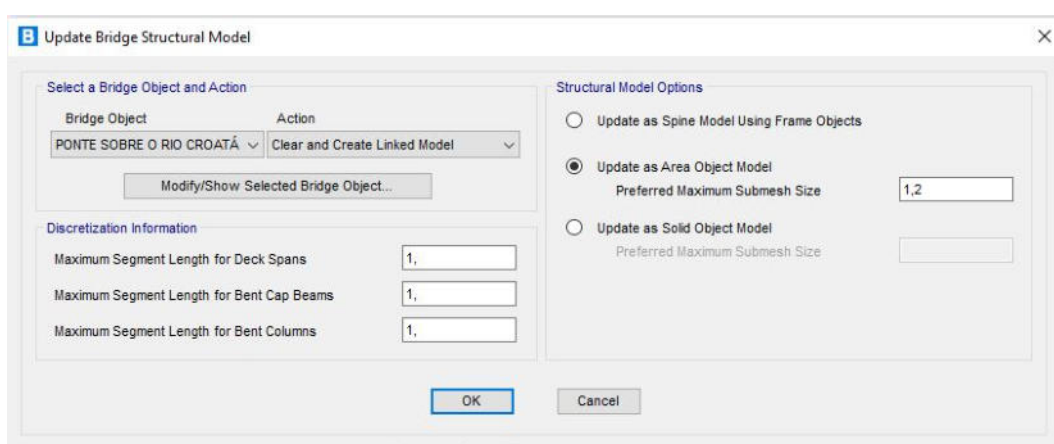
Verifica-se para o vão dois se as informações referentes ao aparelho de apoio também foram inseridas.

A6. VERIFICAÇÃO DOS NÓS

Nos processos anteriores foram definidos todos os parâmetros da ponte, suas características físicas e geométricas. Portanto, é necessário juntar todas essas informações no programa e fazer uma atualização, *Update*, da estrutura.

Inicialmente deve-se salvar o que foi definido anteriormente. Na barra de ferramentas superior seleciona-se as opções *Bridge* → *Update Bridge Objects*, desse modo tem-se a janela representada pela Figura A. 34. Nesta janela é criado o *Bridge object* Ponte sobre o rio Croatá, e determinado como a estrutura será discretizada.

Figura A. 34 – Update e discretização da estrutura



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

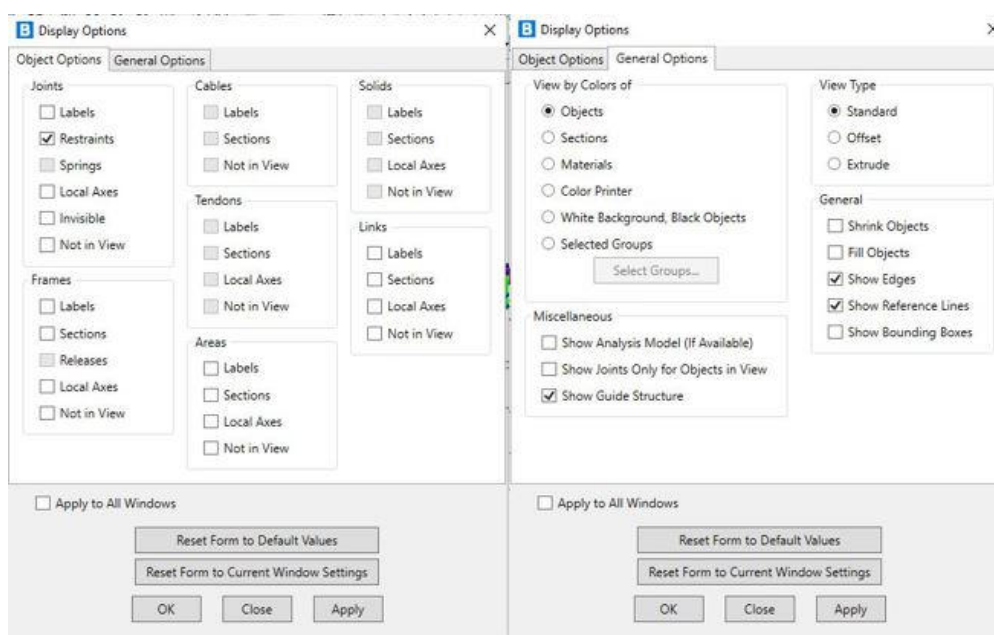
A discretização no programa consiste em definir o comprimento máximo para cada um dos elementos. Na aba *Discretization information*, localizada na parte inferior esquerda da Figura A. 34 é definido os comprimentos para os elementos do vão, travessa e pilares, o comprimento máximo adotado na discretização dos elementos de barra foi de 1 m. Em *Structural Model Options*, localizado na parte superior direita da Figura A. 34, é definido o modelo estrutural, como se trabalha com elementos de cascas o modelo é o *Update as área object model*, com objetos de área.

O método numérico faz uso do método dos elementos finitos para realizar a discretização do objeto, no programa Csi Bridge® utiliza-se a discretização para a obtenção dos deslocamentos horizontais, momentos fletores e esforços cortantes nos elementos do modelo em análise.

Seguida a realização do *Update* da estrutura o programa apresenta o modelo da ponte, habilita-se nesta visualização os nós da estrutura. A habilitação da visualização dos nós da estrutura é realizada por meio das seguintes opções: *View* → *Set display options*. A janela

ilustrada pela Figura A. 35 mostra as configurações da visualização, a esquerda tem-se a aba *Object Options*, na qual a opção *joints* deve ser desabilitado o *invisible*, a fim de que os nós sejam representados na estrutura. No lado direito da Figura A. 35, aba *General Options*, na opção *View type*, é definida a forma como a estrutura é representada. Define-se *Standard* para visualização em elementos de barras e casca, ilustrado na Figura A. 36, e *Extrude* para visualização em três dimensões, ilustrado na Figura A. 37 e Figura A. 38, nesta opção é possível verificar se as dimensões estão corretas ou não, de acordo com a representação da estrutura.

Figura A. 35 – Visualização dos nós



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

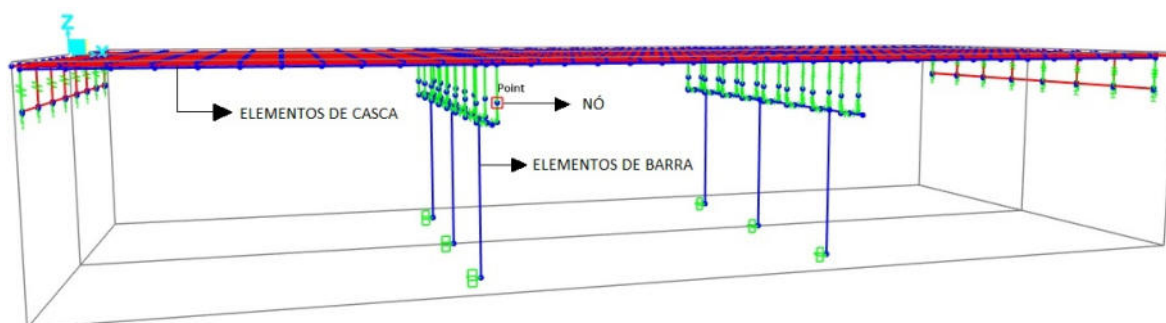
Segundo o CSi Analysis Reference Manual (2013), os objetos podem ser modelados como:

- Pontuais (nós): objetos criados automaticamente nas extremidades dos elementos e podem ser adicionados em locais específicos a fim de se capturar esforços localizados;
- Lineares (elementos de barra): objetos utilizados como elementos de pórtico espacial para modelar vigas, pilares e treliças, e de plano para estais sob peso próprio e tração e cabos de protensão;
- De área (elementos de cascas): objetos utilizados como chapas (teoria de membrana), placas (teoria de flexão) ou cascas (teoria de membrana e flexão) para discretizar lajes, paredes finas e sólidos bidimensionais.

A análise realizada no programa é elástica linear, considerando pilares, vigas de travamento e longarinas pré-moldadas como elementos de barra, enquanto lajes, transversinas

e longarinas moldadas no local como elementos de cascas. A Figura A. 36 ilustra esses elementos, em vermelho as cascas e azul as barras.

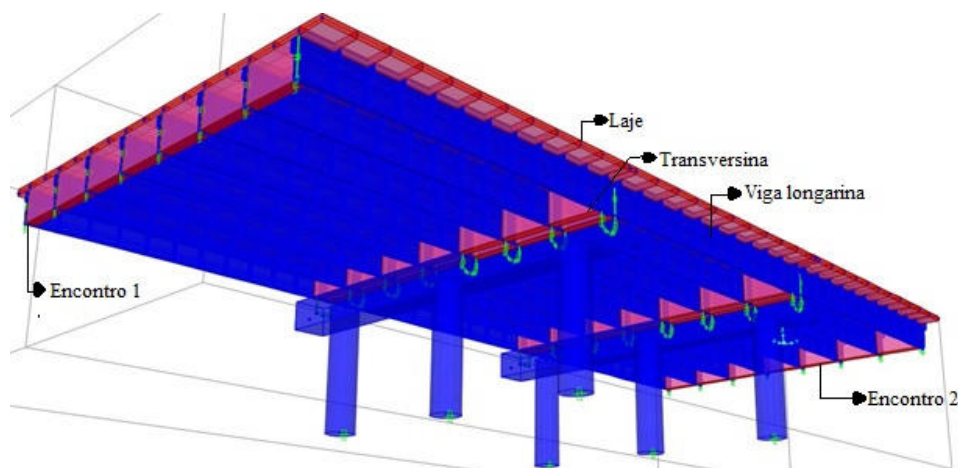
Figura A. 36 – Visualização *Standard*



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

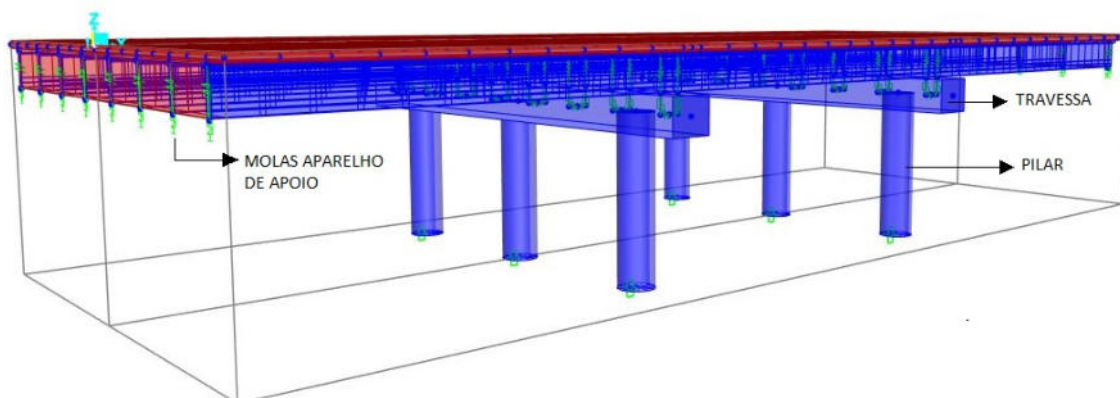
Na visualização tridimensional, ilustrada pela Figura A. 37 e Figura A. 38, é possível observar os elementos constituintes da ponte e suas dimensões, como os encontros, laje, longarinas, travessas, pilares e as molas que representam os aparelhos de apoio.

Figura A. 37 – Visualização *Extrude*, vista dos encontros, laje e longarinas.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Figura A. 38 – Visualização Extrude, vista das travessas, pilares e molas dos aparelhos de apoio.

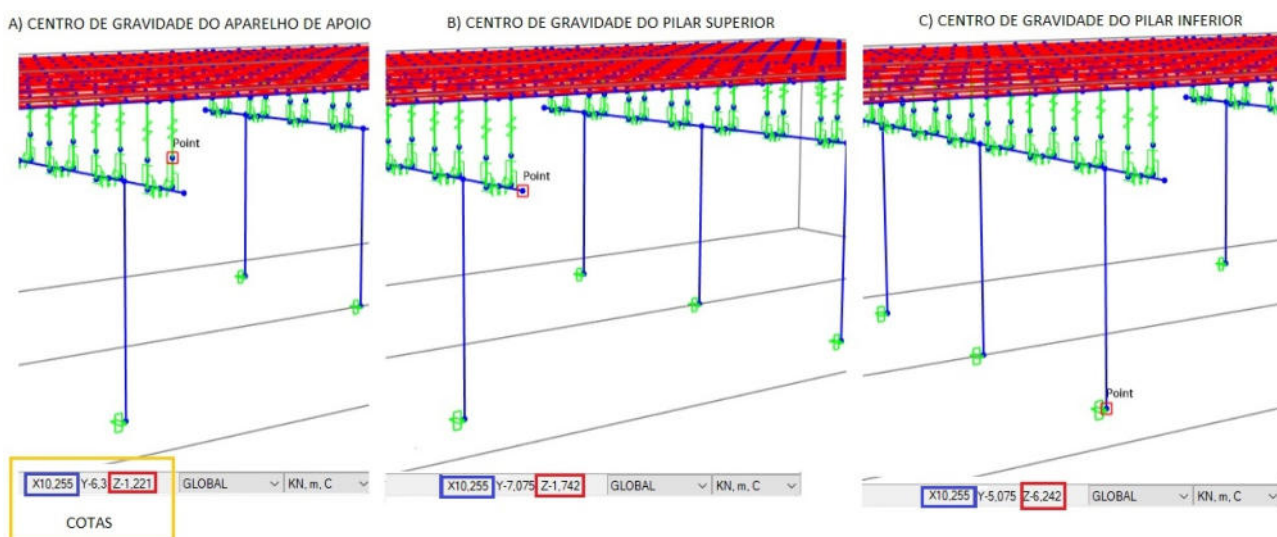


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Algumas verificações devem ser realizadas inicialmente no modelo, a fim de se evitar erros de modelagem. Deve-se conferir se todos os nós estão posicionados corretamente nos respectivos eixos X e Z.

A primeira verificação está relacionada a posição dos nós na estrutura no eixo Z. Para a cota do nó centro de gravidade do aparelho de apoio, ilustrado na Figura A. 21. Esta foi definida como cota vertical do aparelho de apoio, equivalente a distância da cota superior da laje até o centro do aparelho de apoio correspondente, igual a $Z = -122,1$ cm.

Figura A. 39 – Verificação nós e cotas.



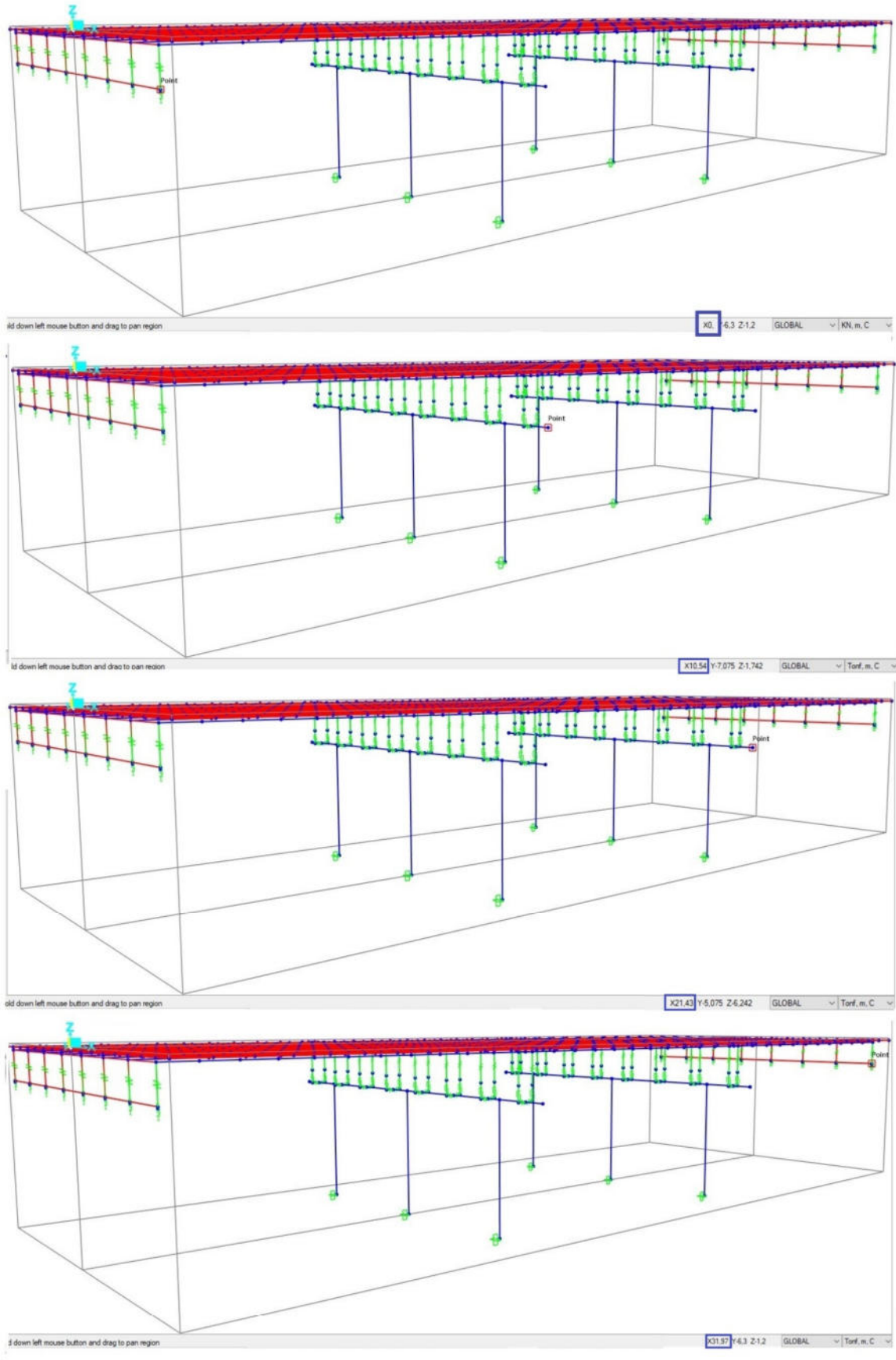
Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para o pilar, confere-se a diferença entre o centro de gravidade do pilar inferior pelo centro de gravidade do pilar superior, ilustrado na Figura A. 39 nos itens C e B,

respectivamente. Onde o valor no programa correspondente a essa diferença é de 450 cm ($624,2 - 174,2$). Sabendo que altura do pilar definida foi de 500 cm, há uma diferença de 50 cm. Essa diferença deve-se ao fato de a visualização no programa ser entre eixos. Logo, os 50 cm faltantes correspondem a altura do eixo da travessa, que possui uma altura de 100 cm ($100:2 = 50$ cm). Desse modo, com a soma dos 50 cm faltantes tem-se altura total de 500 cm.

A segunda verificação relaciona-se à distância no eixo X entre os nós. Verifica-se a posição dos nós dos encontros e pilares. Confere-se as distâncias exibidas no programa, se estas estão em acordo com as inseridas no processo de modelagem. A Figura A. 40 ilustra as cotas no eixo X em relação a cada um dos nós para os encontros e os pilares. Na seguinte ordem, $X = 0$ m para o primeiro encontro, $X = 10,54$ m para o primeiro pilar, $X = 21,43$ m para o segundo pilar e $X = 31,97$ m para o segundo encontro. Desse modo, constatou-se que todas as cotas estão em acordo com as inseridas durante o processo de modelagem.

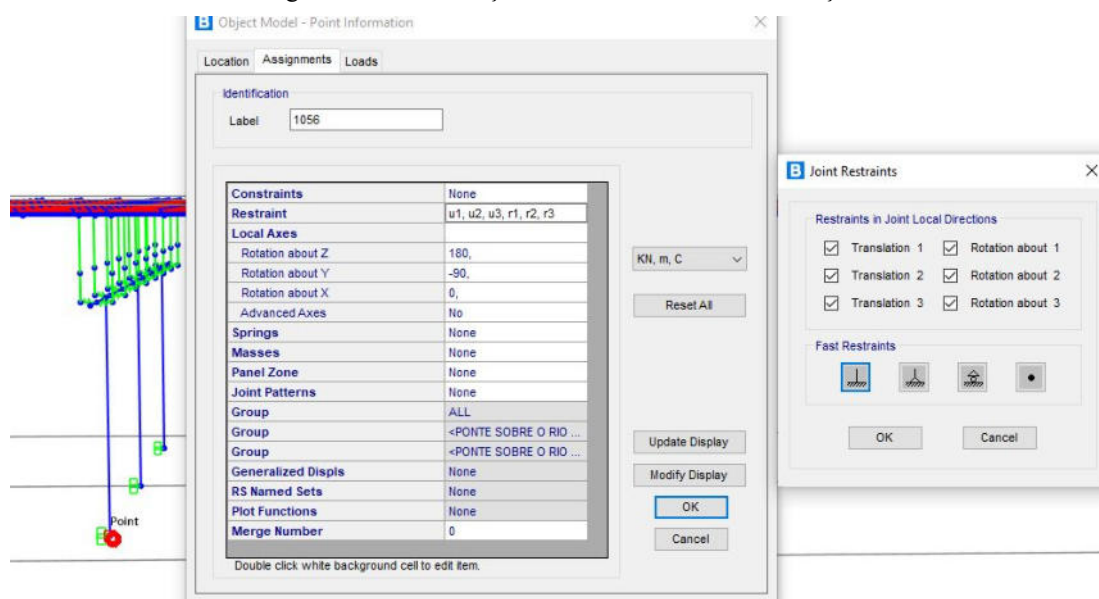
Figura A. 40 – Distâncias em X entre os nós.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

As características das fundações foram definidas fixas, *Fixed*, como observado na Figura A. 25. Este *Fixed* representa as restrições cinemáticas do nó da fundação os *Restraint*, na Figura A. 41 observa-se que foi definido como restrições nos nós do fundo do pilar nenhum deslocamento horizontal, vertical ou rotacional.

Figura A. 41 – Restrições cinemática do nó da fundação



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

A7. ANÁLISE MODAL

É necessário modelar a estrutura com base na geometria e nos parâmetros dos materiais utilizados, obtidos a partir do projeto estrutural da ponte. Com o modelo pronto e as devidas condições de contorno aplicadas, é feita a análise modal da estrutura, de maneira a se descobrir os seus primeiros modos de vibração e as respectivas frequências naturais.

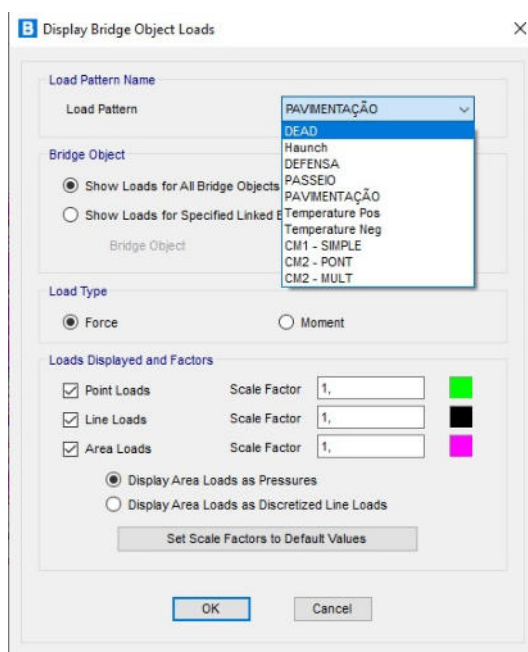
Esses resultados são consideravelmente importantes para se verificar se as frequências naturais estão próximas às frequências de excitação dos carregamentos atuantes posteriormente na estrutura, a fim de que estes não coincidam e causem efeitos de ressonância.

Segundo Rao (2008), a ressonância mecânica e a tendência do sistema físico para oscilar à sua máxima amplitude. Esta tendência depende da proximidade da frequência de excitação das frequências naturais do sistema. A estas frequências, mesmo pequenas amplitudes de excitação podem produzir elevadas amplitudes de vibração do sistema e, eventualmente, conduzir ao seu colapso. Este tema não é tratado neste trabalho, utiliza-se a análise modal apenas para verificação do modelo, se este apresenta erros de modelagem, se o sistema está conectado corretamente e coerente com a rigidez.

- Carregamentos para primeira análise

Alguns carregamentos foram definidos no processo de criação do tabuleiro e correspondem ao peso próprio (*Dead*), defensas, passeio e pavimentação. Para visualizá-los na estrutura se deve seguir as opções *Display* → *Bridge loads*, e escolher o carregamento a ser visualizado, a Figura A. 42 ilustra estes carregamentos. O programa só cria os carregamentos, é necessário aplica-los na estrutura.

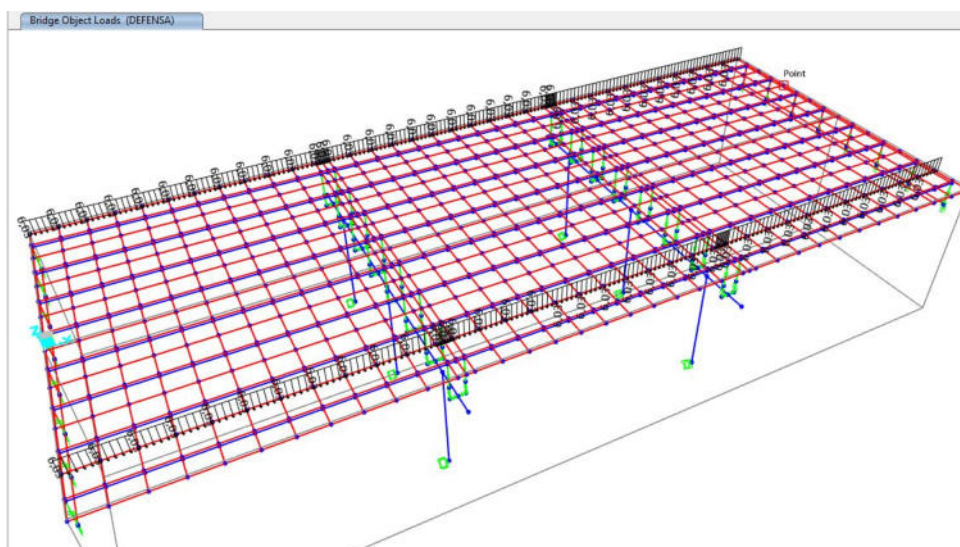
Figura A. 42 – Visualização dos carregamentos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

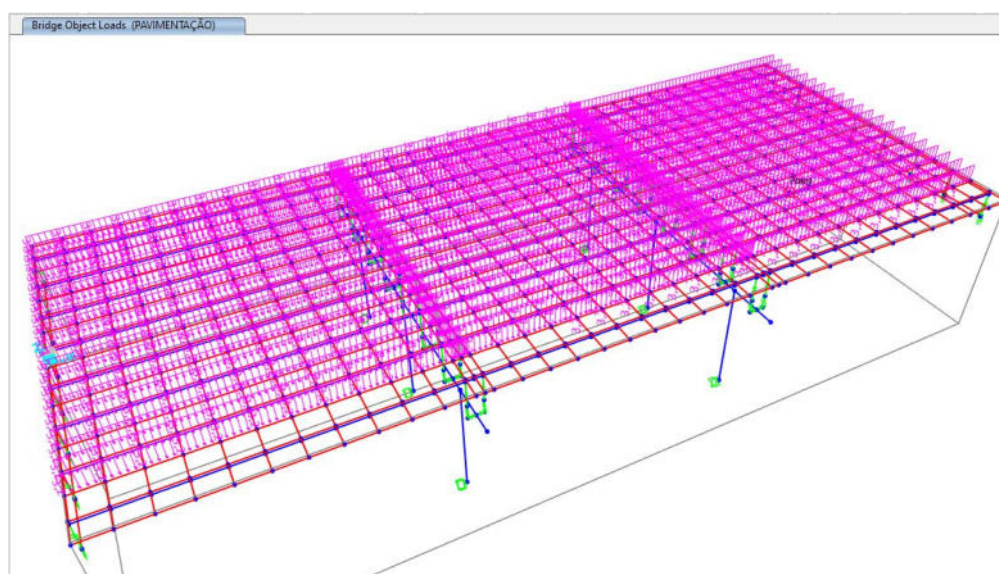
Os carregamentos relativos às defensas (6,02 kN/m) e à pavimentação (3,2 kN/m²) definidos durante o processo de criação do tabuleiro são representados na estrutura através da visualização da Figura A. 43 e da Figura A. 44, respectivamente. Não é possível visualizar o carregamento do peso próprio na estrutura.

Figura A. 43 – Carregamento das defensas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

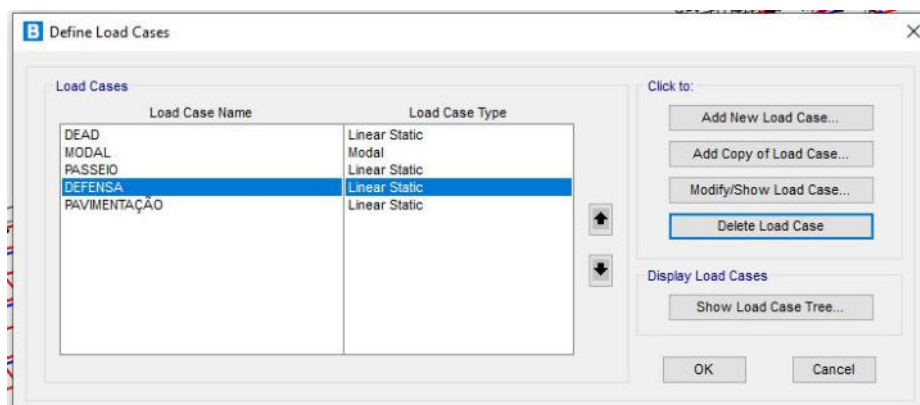
Figura A. 44 – Carregamento da pavimentação somado a recapeamento



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

O programa cria automaticamente análises com uma carga permanente e uma carga modal. A carga permanente (*Dead*) entra como uma carga linear e a carga modal entra como uma carga modal convencional. A definição dos carregamentos para que se possa aplicá-los na estrutura é realizado através das opções *Loods* → *Lood cases* → *Add new lood case*. A Figura A. 45 ilustra os dois carregamentos criados automaticamente pelo programa, *DEAD* e *MODAL*, e os carregamentos de defesa e pavimentação que serão criados.

Figura A. 45 – Definição das características dos carregamentos

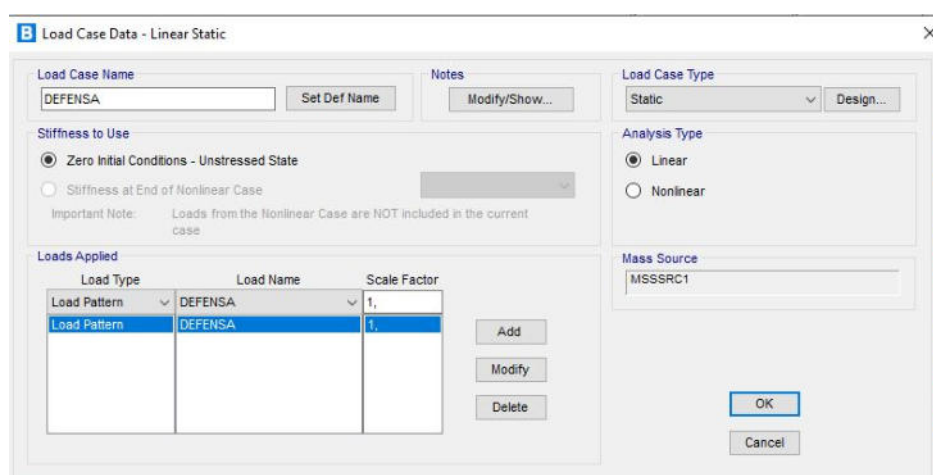


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Os *Load cases*, são os casos de carregamento, descritos pelo *CSi Analysis Reference Manual* (2013) como sendo uma ferramenta para definir como as cargas serão aplicadas na estrutura e como será a sua resposta estrutural. Nessa fase, pode-se definir se a análise será estática ou dinâmica, linear ou não linear entre outros. Como citado, toda a análise realizada é linear.

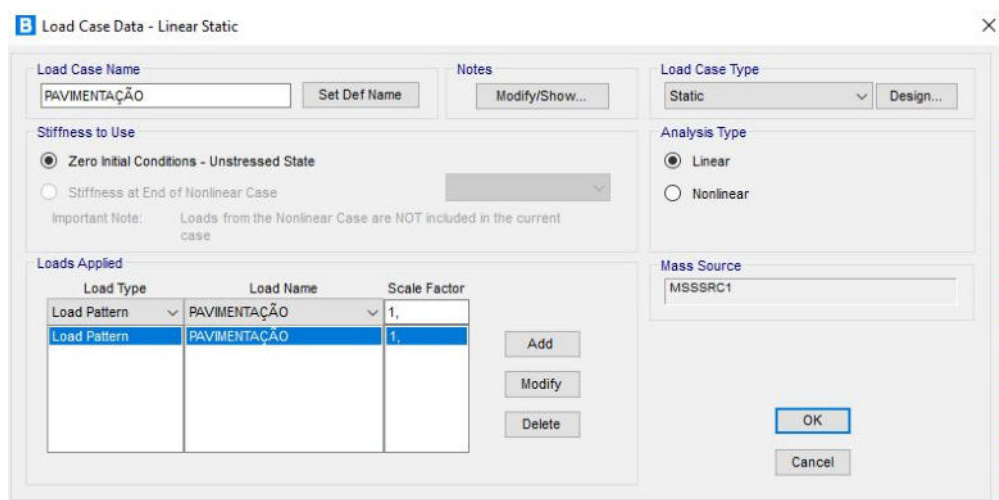
Os carregamentos das defensas e pavimentação, são definidos como cargas estáticas e a análise é definida como linear. Seus carregamentos são definidos como *load pattern*, não são aplicados fatores de ponderação e suas cargas são características. Suas definições são ilustradas na Figura A. 46 e Figura A. 47.

Figura A. 46 – Características do carregamento das defensas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Figura A. 47 – Características do carregamento da pavimentação somado ao recapeamento.

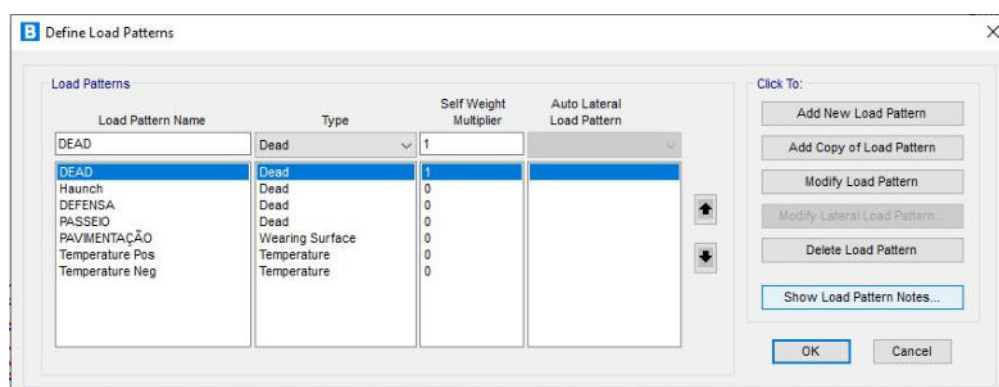


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Os *Load cases* são seguidos pelos *Load patterns*, descritos pelo *CSI Analysis Reference Manual* (2013) como padrões de carga. Estes são distribuições espaciais específicas de forças, deslocamentos, temperaturas e outros efeitos que atuam sobre a estrutura. De forma resumida, essa etapa consiste na combinação dos efeitos produzidos pelos *Load cases*.

A visualização dos carregamentos na estrutura é realizada através das opções *Load* → *Load patterns*. Os carregamentos definidos são visualizados na Figura A. 48, todas as cargas são consideradas isoladamente, por isso o *Self weight multiplier* para todas as cargas é igual zero, ou seja, não adicionam o peso próprio no seu carregamento, excerto o *Dead* que considera a carga do peso próprio da estrutura.

Figura A. 48 – Análise dos carregamentos

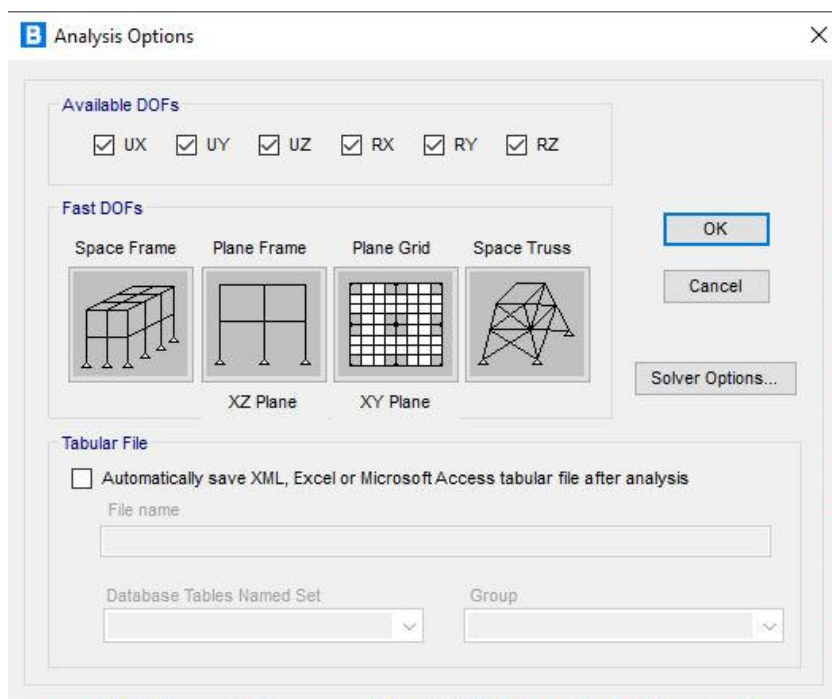


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Com as definições concluídas, segue-se a análise da estrutura. Realiza-se uma análise espacial (*Space Frame*), para a análise de pontes todos os graus de liberdade são considerados

na estrutura. Esta configuração é representada através da Figura A. 49, definida através das opções *Analyze* → *Analysis options*.

Figura A. 49 – Graus de liberdade.

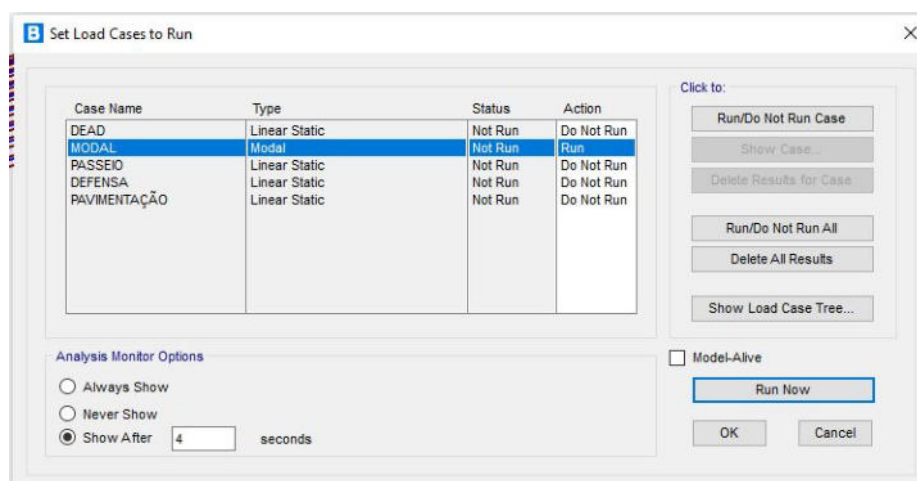


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

- Análise do modo de vibração

Para iniciar as análises deve-se seguir as opções *Analyze* → *Run Analysis*. A Figura A. 50 ilustra os carregamentos a serem analisados. Inicialmente é desconsiderada todas as cargas através da opção *Run/Do Not Run All*. A primeira análise realizada é a análise modal, onde é verificado se há barras soltas na estrutura e o seu comportamento.

Figura A. 50 – Análise modal



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

As propriedades da análise modal são visualizadas em *Load cases*, representadas pela Figura A. 51. Tem-se definidos os modos de vibração, *number os modes*, com no máximo 12 modos de vibração e no mínimo 1; tolerância de convergência de 1.10^{-9} ; sua metodologia de cálculo é de auto vetores e autovalores e tipo de análise definida como modal. A estrutura na análise modal é utilizada no estado elástico linear, ou seja, qualquer comportamento não-linear não é absorvido.

Figura A. 51 – características do carregamento de análise modal.

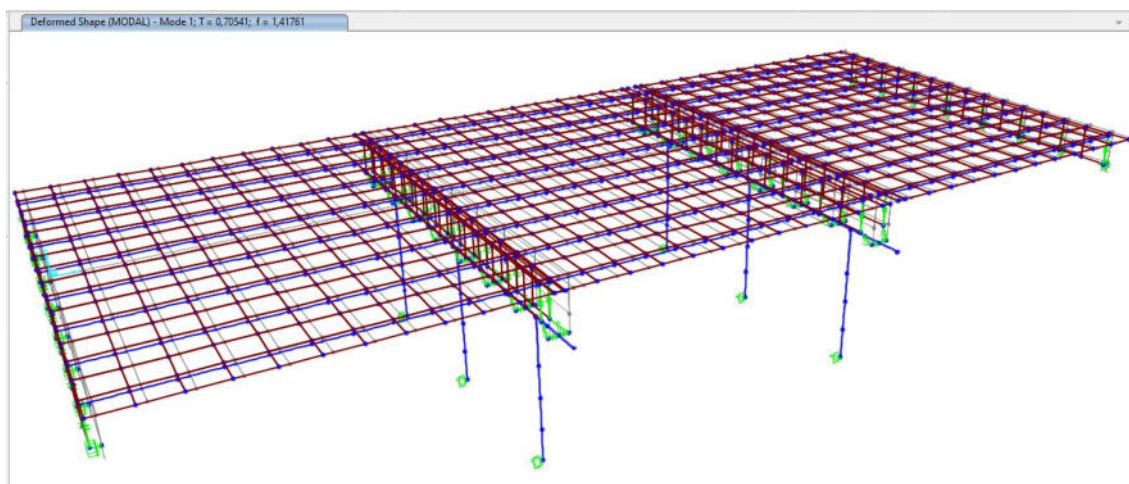
Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Utiliza-se a análise modal para verificação do modelo, se este apresenta erros de modelagem, e se tudo está funcionando de acordo, pois, caso haja alguma viga ou barra solta na análise modal é possível verificar.

Para a primeira análise modal, seleciona-se análise modal e a opção *Run Now*, representada na Figura A. 50, onde é realizada a verificação inicial pelos seus modos de vibração. Em seguida adiciona-se à análise modal os carregamentos do peso próprio, defensas, pavimentação e passeio. Dessa forma, tem-se o módulo de vibração, representado pela Figura A. 52, onde é verificado o período e frequência da estrutura.

Verifica-se se o período e a frequência apresentados pelo programa na primeira análise estão coerentes. O programa fornece o período (T) igual a 0,70541 s e a frequência (f) igual a 1,41761 Hz. Estas informações são visualizadas na Figura A. 52.

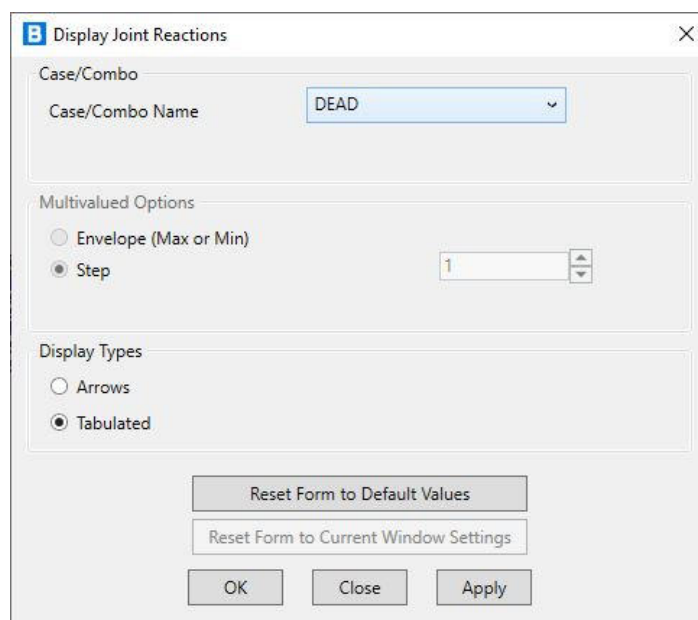
Figura A. 52 – Análise modal, primeiro módulo de vibração



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para a verificação do T e f, é necessária a obtenção das forças, reações da estrutura. As reações são obtidas a partir das opções *Display* → *Member forces/stresses* → *Joint reactins*, ilustrada através da Figura A. 53. Nesta é selecionada a representação das forças devido ao peso próprio da estrutura (*Dead*).

Figura A. 53 – Representação das forças devido ao peso próprio.

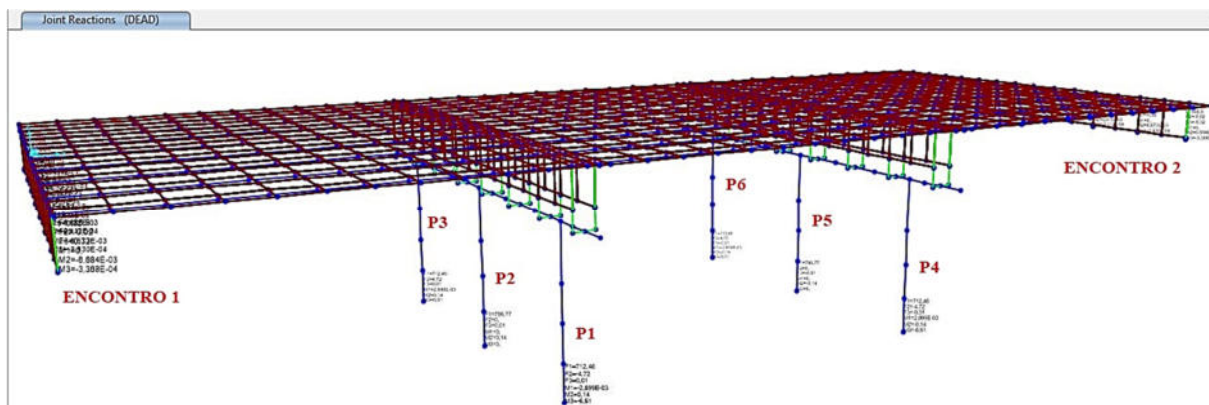


Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Os esforços relativos ao peso próprio da estrutura são representados pela Figura A. 54, e são os seguintes, para os encontros 1 e 2 cuja soma das reações é igual a 1.455,12 kN, pilares

externos 1,3,4, e 6 a reação total é de 2.849,84 kN e para os pilares internos 2 e 5 a reação total é de 1.573,54 kN.

Figura A. 54 – Reações devido ao peso próprio.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

O somatório das forças de reação devido ao peso próprio para os deslocamentos verticais, nos encontros e pilares, é igual a 5.878,5 kN. Aplicando a segunda lei de Newton, lei da superposição de forças, expressa pela Equação 19, obtém-se a massa total da ponte.

$$F = m \cdot a \rightarrow m = 599.846,94 \text{ kg} \quad (19)$$

onde,

a é o módulo da aceleração gravitacional, 9,8 m/s²;

m é a massa do corpo (kg);

F é o módulo da força (N ou kg.m/s²).

A partir da análise modal da estrutura observou-se que seu modo de vibração é horizontal. Logo, a rigidez do sistema será a rigidez horizontal equivalente a rigidez dos aparelhos de apoio e a rigidez horizontal dos pilares, uma vez que estes elementos trabalham em série. A rigidez dos pilares é muito maior que a rigidez dos aparelhos de apoio. Por este fato e como forma de simplificar os cálculos, para determinação da rigidez horizontal do sistema utilizada para cálculo analítico da frequência, será adotado apenas o valor da rigidez translacional do aparelho de apoio (Kh), que possui a menor rigidez entre os dois elementos.

A rigidez translacional (Kh) de cada aparelho de apoio, obtida na Equação 12, é igual a 952.400 N/m². Os aparelhos de apoio da estrutura trabalham em paralelo, logo, as rigidezes são somadas de forma direta. O número de aparelhos de apoio (NAp) na estrutura é igual a 48. Deste modo, a rigidez translacional do sistema (Khs) é dada pela Equação 20.

$$Khs = Kh \cdot NAp = 45.715.200 \text{ N/m}^2 \quad (20)$$

De posse da rigidez do sistema e da massa da ponte, aplica-se a fórmula da frequência natural (f) expressa pela equação 21, obtendo-se a frequência natural da ponte.

$$f = \sqrt{\frac{Khs}{m}} = 8,7299 \text{ rad/s} \quad (21)$$

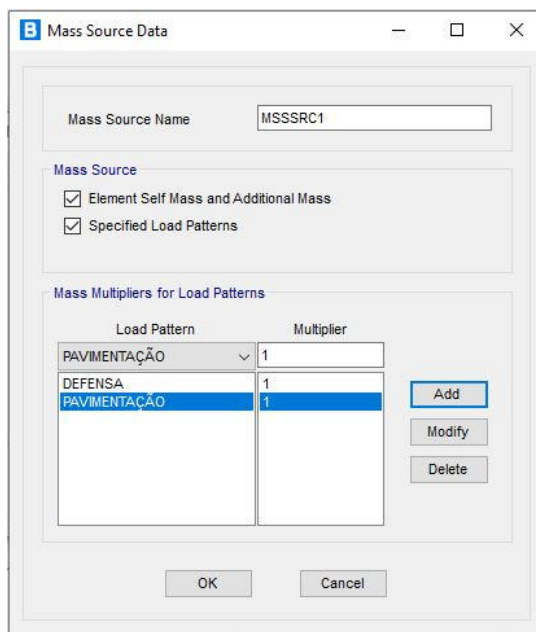
Com a frequência é possível a obtenção do período (T), expresso pela Equação 22.

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{f} = 0,71937 \text{ s} \quad (22)$$

Sabe-se que quanto maior o período (T), menor a rigidez (k), logo, a estrutura será mais flexível. O período obtido na Equação 22 é igual a $T = 0,71937 \text{ s}$, esse valor é maior que o período apresentado pelo programa, igual a $T = 0,70541 \text{ s}$, exibido na Figura A. 52. Esta diferença de valor é devida as considerações feitas pelo programa com relação a massa da estrutura e as considerações feitas durante o cálculo analítico da rigidez k.

Para corrigir a massa da ponte deve-se seguir as seguintes opções: Loads → Mass Source → Modify/Show Mass Source, onde é adicionado a massa das defensas, passeio e pavimentação, ilustrado na Figura A. 55, que foram desconsideradas pelo *default* do programa.

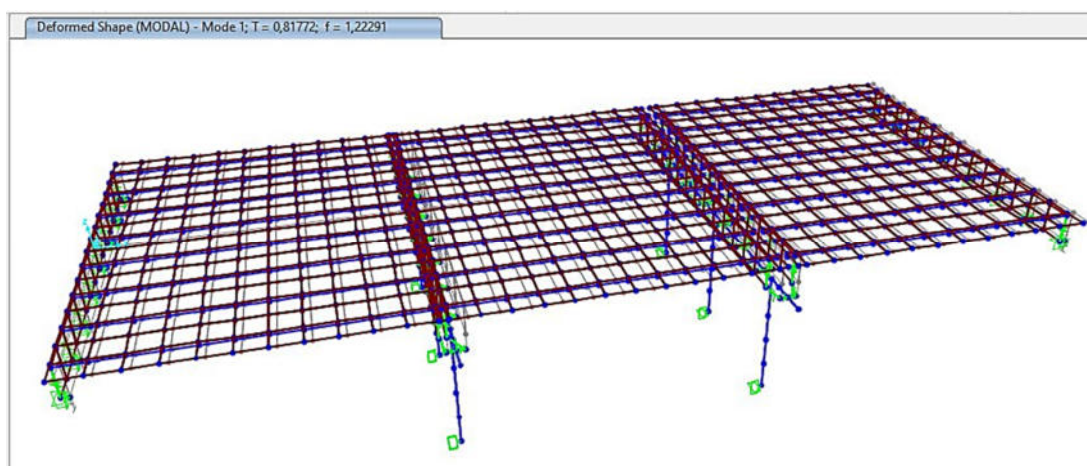
Figura A. 55 – Correção da massa da ponte.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Feita a correção da massa tem-se novos valores de frequência e período, representados na Figura A. 56, com valor de $T = 0,81772$ s. Este novo valor obtido através das correções é mais coerente que o anterior de $T = 0,70541$ s, uma vez que a rigidez obtida pelo programa deve ser maior que a obtida no cálculo analítico, pois, este considera a rigidez total do elemento durante as suas verificações o que resulta em uma rigidez um pouco menor do sistema, e com isso um período maior. Este menor valor obtido de rigidez, deve-se ao fato de que quando somados elementos que trabalham em série, a rigidez equivalente da mola obtida no sistema é menor que o menor valor de rigidez. Diferente das considerações adotadas para os cálculos analíticos, onde foi desconsiderado a rigidez dos pilares por ser muito maior que a rigidez do aparelho de apoio, o que resulta em uma rigidez um pouco maior no cálculo analítico e um valor menor de T obtido na equação 22, com relação ao T do programa corrigido.

Figura A. 56 – Valores de período e frequência com massa corrigida.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

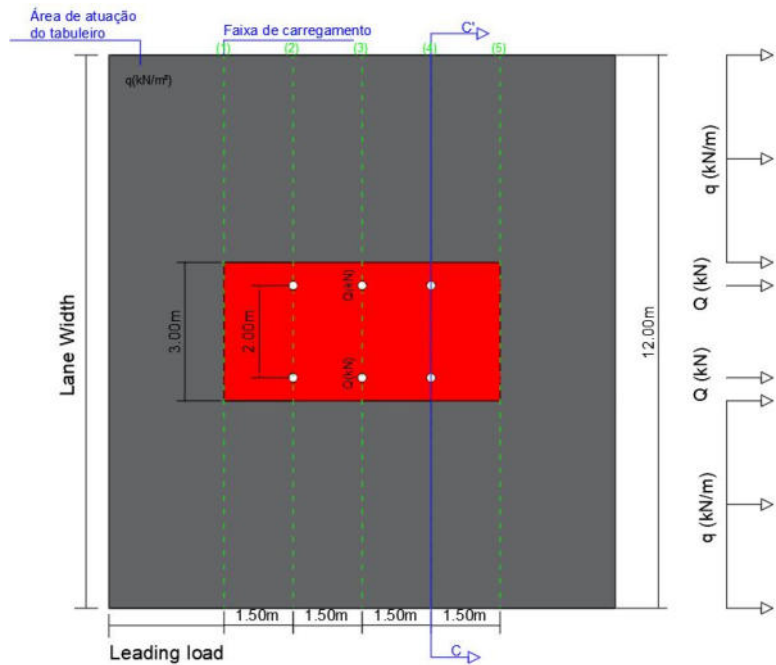
A8. CRIAÇÃO DOS CARREGAMENTOS MÓVEIS

Nessa fase define-se o trem-tipo, incluindo a carga de multidão. Pode-se fazer uso do trem-tipo homogeneizado ou do trem-tipo não homogeneizado. Para isso, deve-se seguir as seguintes opções: Lood → Vehicles → Add vehicle.

O Csi Bridge[®] não consegue criar um carregamento do tipo ilustrado pela Figura A. 57, representado pelo carregamento correspondente ao corte CC', onde tem-se simultaneamente o carregamento distribuído (q), carga de multidão, com seus carregamentos pontuais (Q), do trem-tipo TB-450. O programa não consegue remover o carregamento distribuído correspondente ao intervalo de aplicação apenas do carregamento pontual do veículo tipo, ou

ele aplica por todo corte/faixa ou ele não aplica o carregamento distribuído. Portanto, cria-se dois modelos de carregamento e combina-se os dois.

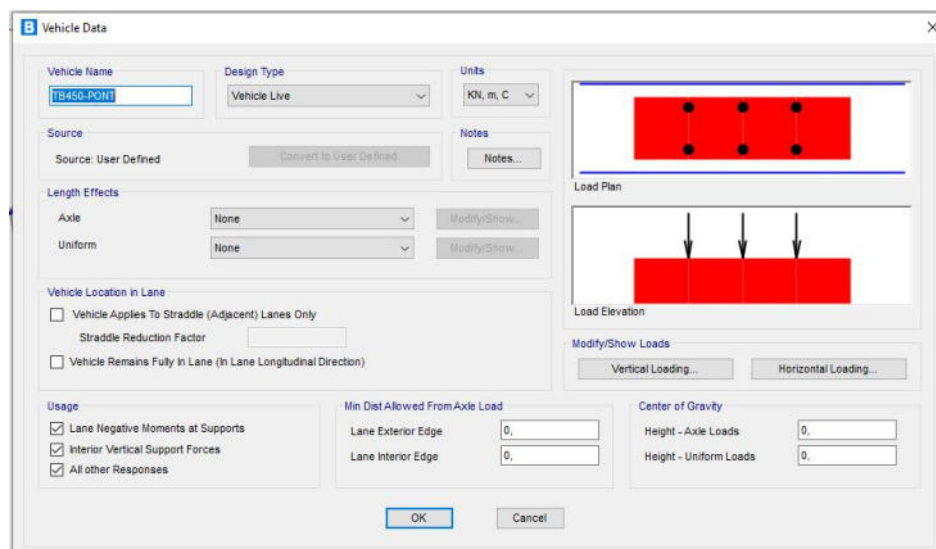
Figura A. 57 – Modelo de carregamento do trem-tipo TB-450.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

O primeiro carregamento criado para representar o trem-tipo TB-450, descrito pelo NBR 7188:2013, é o TB450-PONT refere-se as cargas pontuais do carregamento móvel, ilustrado na Figura A. 58. A Figura A. 58 explicita os carregamentos relativos aos três eixos do veículo e uma carga distribuída negativa, apenas dentro do veículo.

Figura A. 58 – Carga pontual do TB-450



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para acessar as configurações do carregamento seleciona-se a opção *Vertical Loading*, vista na Figura A. 58, na parte inferior direita. A janela de configurações do carregamento TB450-PONT é representada pela Figura A. 59. O dimensionamento da carga é realizada para a componente das longarinas, onde tem-se um fator de escala obtido por meio da multiplicação dos coeficientes estabelecidos pela NBR 7188:2013, coeficientes de impacto vertical (CIV), número de faixas (CNF) e de impacto adicional (CIA), equivalentes respectivamente a 1,35/1,00/1,00, onde por meio da multiplicação destes temos um fator de escala correspondente a 1,35.

As definições dos carregamentos ilustrados na tabela da Figura A. 59, são especificados a seguir:

Para o primeiro carregamento correspondente a *Leading load* (carga principal), é definido uma distância (*Minimun distance*) infinita, correspondente à faixa de atuação da carga principal (*leading load*) definida como faixa 1, vista na Figura A. 57. A carga distribuída (*Uniform load*) nesta combinação é considerada zero, pois nessa primeira faixa não será representada nenhum carregamento. O tipo de largura uniforme (*Uniform width type*) é definido como a largura da pista (*lane width*). A carga por eixo (*Axle load*) é definida como zero, e o tipo de largura do eixo (*Axle width type*) é definido como um ponto.

Para o segundo, terceiro e quarto carregamentos, correspondentes as faixas 2, 3 e 4, respectivamente, é realizado uma combinação de carga distribuída e carga pontual. Para carga distribuída é definido um comprimento de 1,5 m, correspondente a distância da faixa 1-2, 2-3 e 3-4, respectivamente para cada faixa. Na qual é inserida uma carga distribuída com sinal negativo (q_{l1}), para contrapor a carga distribuída (q_{l2}) que é inserida na faixa de atuação dos carregamentos móveis, quando definido o carregamento de multidão posteriormente. A carga q_{l1} é obtida por meio da Equação 23.

$$q_{l1} = q \cdot l_{gc} = -15 \text{ kN/m} \quad (23)$$

onde:

q é o carregamento de multidão, 5 kN/m^2 - NBR 7188:2013;

l_{gc} é a largura da faixa de atuação do carregamento móvel TB-450 (*Lane width*), correspondente a 3 m, visto na Figura A. 57;

q_{l1} é o carregamento distribuído em linhas (*Uniform load*) (kN/m).

O Csi Bridge[®] requer que os carregamentos correspondentes a carga distribuída, correspondente a carga de multidão (q), que é distribuída em área, seja inserido no programa

como cargas distribuída em linha. Por isso, é necessária a multiplicação do carregamento de multidão pela largura da faixa de atuação do carregamento.

Logo, nesta combinação é considerada a carga distribuída igual a $q_{l1} = -15\text{kN/m}$, o tipo de largura uniforme é definido como a largura fixa (*fixed width*), com largura uniforme (*Uniform width*) igual a 3 m, correspondente a largura de atuação do veículo tipo. A carga por eixo (*Axle load*) é definida como 150 kN, o tipo de largura do eixo (*Axle width type*) é definido como dois pontos, duas rodas, e a largura do eixo (*Axle width*) igual a 2 m.

O quinto carregamento correspondente à faixa 5, equivale aos carregamentos 2, 3 e 4, excerto pela presença da carga pontual.

O sexto carregamento *Trailing load* (carga final) tem suas configurações equivalente a primeira carga.

Figura A. 59 – Configurações de carga pontual do TB-450

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite	0,	Lane Width		0,	One Point		
Loading Load	Infinite	0,	Lane Width	3,	0,	One Point		
Fixed Length	1,5	-15,	Fixed Width	3,	150,	Two Points	2,	
Fixed Length	1,5	-15,	Fixed Width	3,	150,	Two Points	2,	
Fixed Length	1,5	-15,	Fixed Width	3,	150,	Two Points	2,	
Fixed Length	1,5	-15,	Fixed Width	3,	0,	Two Points	2,	
Trailing Load	Infinite	0,	Lane Width		0,	Two Points		

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para a definição do carregamento de multidão TB450-MULT, ilustrado na Figura A. 60, onde o carregamento é distribuído ao longo de todo o tabuleiro. O processo é semelhante aos detalhados para o carregamento pontual do TB-450, descrito anteriormente.

Figura A. 60 – Carga de multidão TB-450

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Para acessar as configurações do carregamento de multidão seleciona-se a opção *Vertical Loading*, onde obtém-se a janela ilustrada através da Figura A. 61. Neste carregamento apenas é definido as cargas distribuídas equivalentes a carga de multidão definidas pela NBR 7188:2013.

O carregamento distribuído (q) é considerado como um carregamento distribuído em linhas (q_{l2}), logo o valor correspondente a q_{l2} é expresso através da Equação 24.

$$q_{l2} = q \cdot l_{gp} = 60 \text{ kN/m} \quad (24)$$

onde:

q é o carregamento de multidão, 5 kN/m^2 - NBR 7188:2013;

l_{gp} é a largura da faixa de atuação do carregamento de multidão na ponte (*Lane width*), correspondente a 12 m, visto na Figura A. 57;

q_{l2} é o carregamento distribuído em linhas (kN/m).

Figura A. 61 – Configurações do carregamento de multidão do TB-450

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Definidos os carregamentos pontual e multidão, a próxima etapa é definir os *Load patterns*, carregamentos padrões analisados segundo as recomendações da norma brasileira. Para isso se segue as seguintes opções: *Loads* → *Load Patterns*, com isso tem-se a janela representada na Figura A. 62. Nesta é adicionado carregamento referente a carga móvel pontual e carga móvel de multidão, definidos como CM_P e CM_M, respectivamente, para as análises devido ao carregamento móvel, *Vehicle Live*.

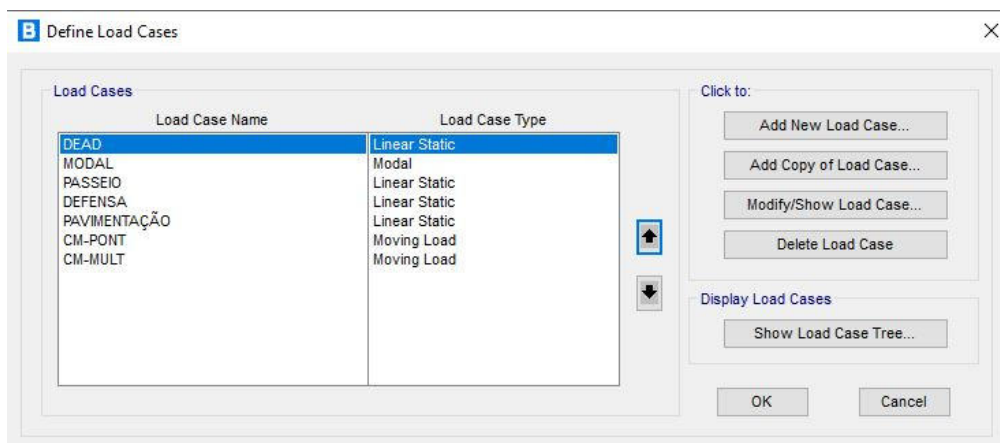
Figura A. 62 – Definição de Load patterns

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Após a criação do carregamento móvel, é criado os casos desses carregamentos. Para isso se segue as seguintes opções: *Loads* → *Load Case*. Logo, tem-se a janela representada pela

Figura A. 63, onde é adicionado dois novos *Load cases* chamados CM-PONT, devido a carga pontual e CM-MULT, devido a carga de multidão.

Figura A. 63 – Criando os Load Cases



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

As definições da casos de carregamento pontual, CM-PONT, e carregamento de multidão, CM-MULT, são ilustradas na Figura A. 64 e na Figura A. 65, respectivamente. Tem-se a carga pontual (TB450-PONT) e a carga de multidão (TB450-MULT) dentro de cada *Load case*.

O módulo *Moving-load* apresentado pelo software para as análises, é uma ferramenta para análise dos carregamentos móveis, na qual se determinam as respostas da superestrutura da ponte devido ao peso dos trens-tipo. Dessa forma, o CSi Analysis Reference Manual (2013) afirma que é considerado a rigidez da estrutura para se determinar envoltórias de deslocamentos, forças e tensões para múltiplas pistas de rolamento (*lanes*), podendo ser resolvidas a partir de combinações estáticas ou dinâmicas.

Figura A. 64 – Característica da carga pontual

The screenshot shows the 'Load Case Data - Moving Load' dialog box. The 'Load Case Name' is 'CM-PONT'. The 'Load Case Type' is 'Moving Load'. Under 'Stiffness to Use', 'Zero Initial Conditions - Unstressed State' is selected. The 'Loads Applied' table is as follows:

Assign Number	Vehicle Class	Scale Factor	Min Loaded Lanes	Max Loaded Lanes	Lanes Loaded
1	TB450-PONT	1	0	0	All

The 'MultiLane Scale Factors' table is:

Number of Lanes Loaded	Reduction Scale Factor
1	1

The 'Mass Source' is 'MSSSRC1'. The 'Selected Lane Definitions' list includes 'PISTA DE ROLAMENTO'.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Figura A. 65 – Característica da carga móvel

The screenshot shows the 'Load Case Data - Moving Load' dialog box. The 'Load Case Name' is 'CM-MULT'. The 'Load Case Type' is 'Moving Load'. Under 'Stiffness to Use', 'Zero Initial Conditions - Unstressed State' is selected. The 'Loads Applied' table is as follows:

Assign Number	Vehicle Class	Scale Factor	Min Loaded Lanes	Max Loaded Lanes	Lanes Loaded
1	TB450-MULT	1	0	0	All

The 'MultiLane Scale Factors' table is:

Number of Lanes Loaded	Reduction Scale Factor
1	1

The 'Mass Source' is 'MSSSRC1'. The 'Selected Lane Definitions' list includes 'PISTA DE ROLAMENTO'.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

A9. VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS GERADOS

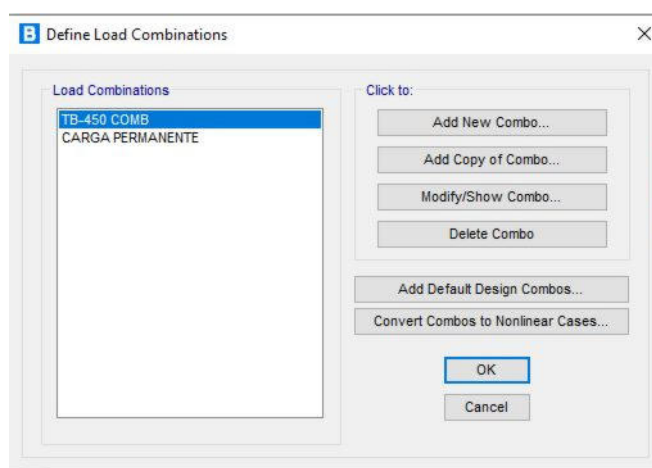
A verificação das solicitações geradas na estrutura é realizada por meio da análise das ações de todos os carregamentos inseridos na ponte. Esses carregamentos são relativos as cargas

devido ao peso próprio da estrutura, aos elementos de defesa, à carga de pavimentação, ao passeio e às cargas móveis.

É possível realizar a verificação dos esforços gerados por meio de cada carregamento de forma isolada, como também é possível verificá-los de forma conjunta. Para a análise de forma conjunta é criada combinações de carregamentos. Por meio das seguintes opções: *Loads* → *Load combinations* → *Add new combo*.

Na Figura A. 66 tem-se as combinações das cargas móveis e das cargas permanentes, representados por TB-450 COMB e CARGA PERMANENTE, respectivamente. É realizada a união dos carregamentos devido a carga pontual e a carga móvel, caracterizado na Figura A. 67 para o TB-450 COMB e a união de todas as cargas permanentes para CARGA PERMANENTE, como ilustrado por meio da Figura A. 68.

Figura A. 66 – Cargas combinadas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Figura A. 67 – Combinação das cargas do pontual e móvel.

The screenshot shows the 'Load Combination Data' dialog box. The 'Load Combination Name' is 'TB-450 COMB'. The 'Load Combination Type' is 'Linear Add'. The 'Define Combination of Load Case Results' table is as follows:

Load Case Name	Load Case Type	Mode	Scale Factor
CM-MULT	Moving Load		1,
CM-MULT	Moving Load		1,
CM-PONT	Moving Load		1,

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Figura A. 68 – Combinação de cargas permanentes.

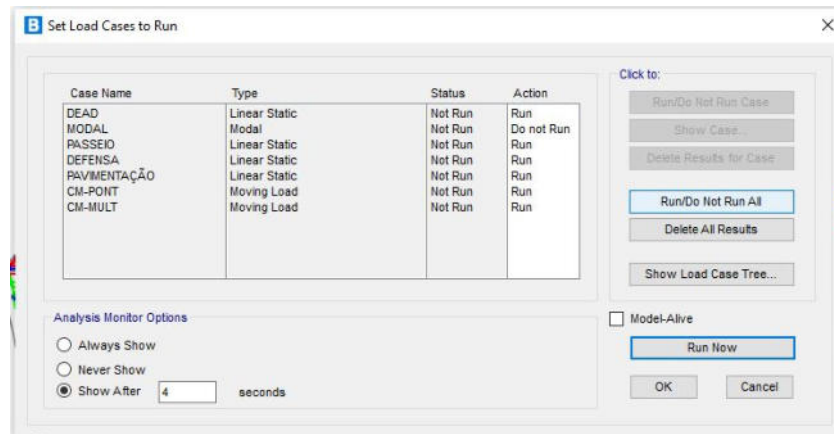
The screenshot shows the 'Load Combination Data' dialog box. The 'Load Combination Name' is 'CARGA PERMANENTE'. The 'Load Combination Type' is 'Linear Add'. The 'Define Combination of Load Case Results' table is as follows:

Load Case Name	Load Case Type	Mode	Scale Factor
DEAD	Linear Static		1,
DEAD	Linear Static		1,
DEFENSA	Linear Static		1,
PAVIMENTAÇÃO	Linear Static		1,

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

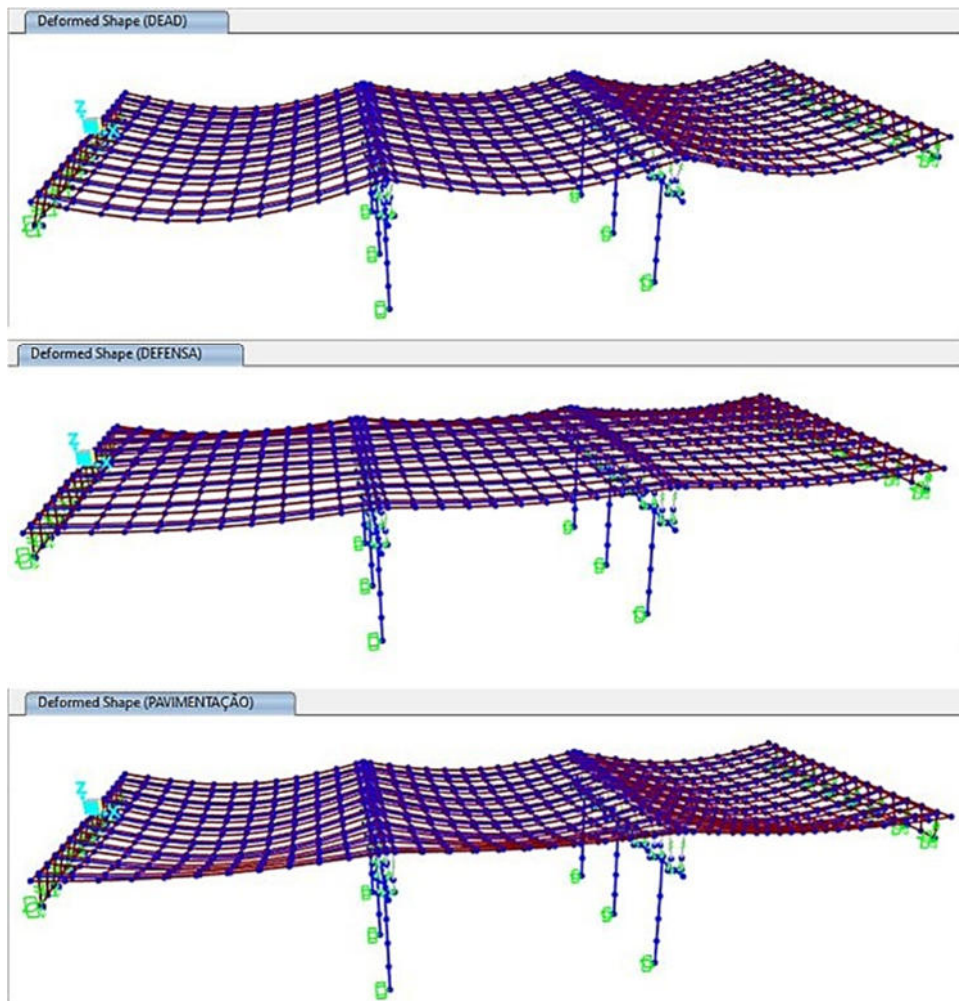
Com todos os carregamentos e casos de carregamentos definidos é realizada a análise modal devida ao efeito dos carregamentos móveis e cargas permanentes definidas atuando sobre a ponte. Nesta análise considera-se todos os carregamentos definidos, como ilustrado na Figura A. 69, com exceção do carregamento modal. As deformações sofridas na estrutura devido ao peso próprio, defensas, passeio e pavimentação são representadas na Figura A. 70.

Figura A. 69 – Análise modal com carregamento móvel



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

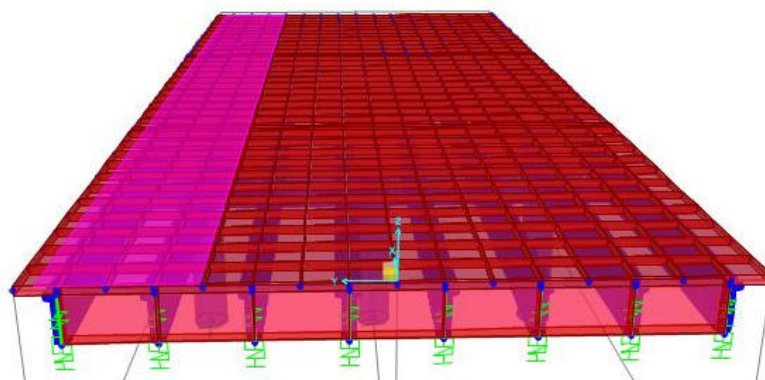
Figura A. 70 – Deformações na ponte



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

As cargas móveis são lançadas em um único *lane*, sendo este definido para representar onde as cargas podem atuar na superestrutura. Assim sendo, a pista de rolamento foi adotada no lado esquerdo do tabuleiro, a fim de estabelecer as solicitações mais desfavoráveis e possui a largura de 3 m corresponde a largura do trem-tipo de projeto da norma brasileira, como definido no item 3.4. A Figura A. 71 exibe a pista de rolamento (*lane*) utilizado para o carregamento móvel.

Figura A. 71 – Representação da pista de rolamento (*Lane*), norma brasileira



Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Os modelos dos veículos de projeto e das faixas de tráfego na ponte, estabelecidos pelas normas americanas e europeias, são ilustrados na Figura A. 72 e na Figura A. 73, respectivamente. É necessário saber que os carregamentos das distintas normas, ilustradas na Figura A. 72 e na Figura A. 73 mudam de acordo com a faixa de atuação do carregamento móvel.

Figura A. 72 – Modelo norma americana

VEÍCULO TIPO NORMA AMERICANA

Vehicle Data

Vehicle Name: AASHOT HSL-93 Design Type: Vehicle Live Units: KN, m, C

Source: User Defined Convert to User Defined Notes: Notes...

Length Effects
 Axle: None Modify/Show
 Uniform: None Modify/Show

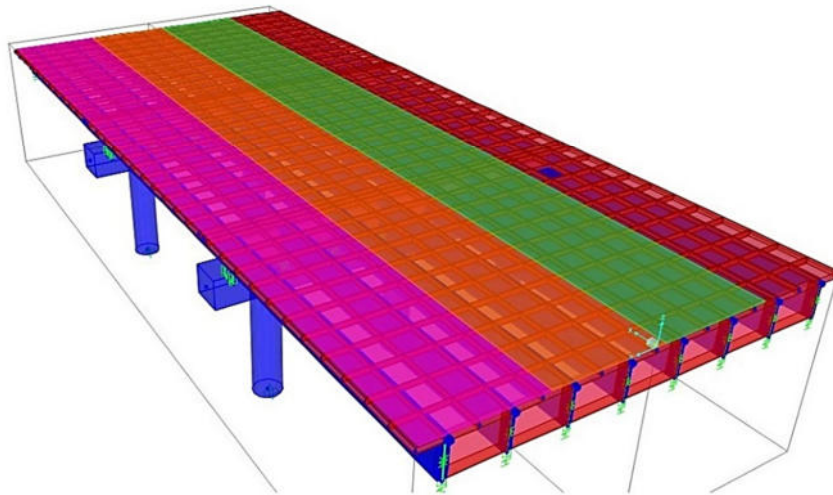
Vehicle Location in Lane
 Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only
 Straddle Reduction Factor:
 Vehicle Remains Fully in Lane (In Lane Longitudinal Direction)

Usage
 Lane Negative Moments at Supports
 Interior Vertical Support Forces
 All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load
 Lane Exterior Edge: 0,
 Lane Interior Edge: 0,

Center of Gravity
 Height - Axle Loads: 0,
 Height - Uniform Loads: 0,

OK Cancel


FAIXAS DE TRÁFEGO

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.


Figura A. 73 – Modelo norma europeia

VEÍCULO NORMA EUROPEIA

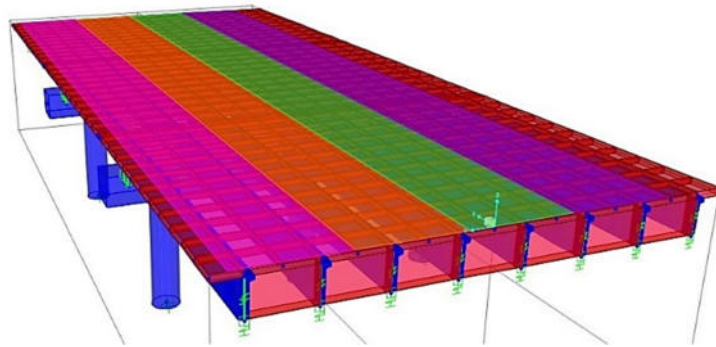
Vehicle Data

Vehicle Name <input type="text" value="L1H1 Lane 1 Char"/>	Design Type <input type="text" value="Euro Load/Model Character"/>	Units <input type="text" value="KN, m, C"/>	
Source <input type="text" value="Source: EN 1991-2.xml"/>	<input type="button" value="Convert to User Defined"/>	<input type="button" value="Notes..."/>	

Length Effects			
Axle	<input type="text" value="None"/>	<input type="button" value="Modify/Show..."/>	
Uniform	<input type="text" value="None"/>	<input type="button" value="Modify/Show..."/>	

Vehicle Location in Lane		Load Elevation 
<input type="checkbox"/> Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only		<input type="button" value="Vertical Loading..."/> <input type="button" value="Horizontal Loading..."/>
Straddle Reduction Factor <input type="text" value=""/>		
<input type="checkbox"/> Vehicle Remains Fully in Lane (in Lane Longitudinal Direction)		

Usage <input checked="" type="checkbox"/> Lane Negative Moments at Supports <input checked="" type="checkbox"/> Interior Vertical Support Forces <input checked="" type="checkbox"/> All other Responses	Min Dist Allowed From Axle Load Lane Exterior Edge <input type="text" value="0.5"/> Lane Interior Edge <input type="text" value="0.5"/>	Center of Gravity Height - Axle Loads <input type="text" value="0"/> Height - Uniform Loads <input type="text" value="0"/>
--	--	---

FAIXAS DE TRÁFEGO

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.