



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARINA CHAGAS DE MENEZES

ANÁLISE DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA OBRA DE ARTE
ESPECIAL COM ELEMENTOS FINITOS DE BARRA E PLACA

FORTALEZA

2017

MARINA CHAGAS DE MENEZES

ANÁLISE DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA OBRA DE ARTE
ESPECIAL COM ELEMENTOS FINITOS DE BARRA E PLACA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M512a Menezes, Marina Chagas de.
Análise de modelagem computacional de uma obra de arte especial com elementos finitos de barra e placa / Marina Chagas de Menezes. – 2017.
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota.
1. Ponte em concreto armado. 2. Modelos de barra. 3. Modelos de placa. 4. Análise. 5. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDD 620

MARINA CHAGAS DE MENEZES

ANÁLISE DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA OBRA DE ARTE
ESPECIAL COM ELEMENTOS FINITOS DE BARRA E PLACA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 23/11/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Hugo Campêlo Mota
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

À minha família, minha eterna fonte de
inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus que nos dá o dom da vida e a determinação para persistir nos momentos mais difíceis dos nossos caminhos.

Aos meus pais, Jeocelis e Robson, pela educação, pelo apoio, pela dedicação e pelo incentivo dados durante a minha vida e, principalmente, durante o curso de Engenharia Civil.

À minha irmã, Maria Clara, por quem tenho grande respeito, pela paciência durante esse período da graduação.

À minha família em geral, por ser origem de exímios profissionais nas áreas em que atuam e, por isso, ser minha fonte de inspiração.

À professora Magnólia Mota, por ter aceitado a orientação e tê-la feito de forma impecável e atenciosa, sem medir esforços em ajudar e dar conselhos não somente acerca do trabalho de conclusão de curso, mas também em questões pessoais e profissionais.

Ao engenheiro Hugo Mota, pelo apoio e pela colaboração nas questões técnicas do trabalho.

Aos grandes amigos que fiz na UFC, por estarem ao meu lado nos contratempos que sempre encontramos durante a graduação, em especial ao Felipe Freitas, por ser o maior companheiro que eu poderia ter em, literalmente, todos os momentos, pessoais, profissionais e acadêmicos. Que estes, além de companheiros de faculdade, sejam eternos amigos.

Aos amigos da vida, que, de alguma forma, puderam contribuir com minha jornada na graduação, seja pelos conselhos, seja pela paciência com minha ausência em muitos momentos.

“Tente mover o mundo. O primeiro passo será mover a si mesmo.” (Platão)

RESUMO

Devido à contínua evolução dos métodos computacionais de análise de estruturas, torna-se necessário realizar pesquisas mais aprofundadas acerca da modelagem dessas estruturas, visto que, para a implementação desses métodos, os modelos de análise devem ser adequados e representativos. O presente trabalho consiste, então, em uma análise comparativa entre diferentes modelos passíveis de serem utilizados na modelagem de uma ponte fictícia de concreto armado em viga reta de alma cheia. A chamada ponte-modelo foi analisada considerando que seus elementos estruturais pudessem ser representados por elementos de barra e elementos de placa. As análises foram realizadas com a mesma sendo representada por uma barra única, por uma grelha de barras, por grelha de barras e placa, e por uma grelha de placas. As análises foram feitas com o auxílio de softwares que se baseiam no Método dos Elementos Finitos (MEF). Para a análise com barra única, foi utilizado o software FTOOL, enquanto que, para a análise com grelha de barras, foi utilizado o software em linguagem *Fortran* chamado GRELHA. Já para as análises com grelha de barras e placa e placas somente, devido a algumas limitações dos programas mencionados, foi necessário utilizar um software mais complexo, o MIDAS. Os resultados de esforços de momento fletor e esforço cortante das seções determinadas como críticas obtidos com essas análises foram comparados entre si. Os resultados mostraram que há compatibilidade entre os modelos e que a inclusão de modelos de placa pode levar a um refinamento e, conseqüentemente, a uma economia com a estrutura estudada. Os resultados levaram a concluir também que modelos simplificados podem ser suficientemente representativos dos elementos estruturais da ponte-modelo.

Palavras-chave: Ponte em concreto armado. Modelos de barra. Modelos de placa. Análise. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Due to the continuous evolution of structural analysis computational methods, it is made necessary accomplish in-depth researches about structures modeling, as the analysis models must be suitable and representative for implementation. So this present study consists in a comparative analysis between different models liable to be used in an assumed solid-section beam reinforced concrete bridge. The called model bridge was analyzed considering that its structural elements could be characterized by beam elements and plate elements. The analyses were made with the bridge defined as a single beam, as a grid of beams, as a grid of beams and a plate, and as a grid of plates. The analyses were accomplished with support of Finite Element Method (FEM) programs. Concerning the analysis with a single beam, it was used the software FTOOL, whereas it was used the Fortran language software GRELHA for the grid of beams analysis. As for analysis with grid of beams and plate and analysis with plates only, due to some restrictions in these programs performance, it was necessary to use the more complex software MIDAS. The bending moment and shear force results of the sections set as critical, obtained with the analyses mentioned before, were compared to each other. The results showed that there is a compatibility between all models, that plate models inclusion can lead to a refinement and, in consequence, to an economy in the structure. The results also led to a conclusion that simplified models can be sufficiently representative of the model bridge structural elements.

Keywords: Reinforced concrete bridge. Beam models. Plate models. Analysis. Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição do trem tipo rodoviário brasileiro.....	22
Figura 2 – Posição mais desfavorável do veículo do carregamento móvel no sentido transversal da ponte	25
Figura 3 – Modelos 1D para tabuleiros de pontes	27
Figura 4 – Modelos 2D para tabuleiros de pontes	28
Figura 5 – Fluxograma de etapas metodológicas	31
Figura 6 – Seção transversal adotada para estudo de ponte (unid.: cm).....	34
Figura 7 – Dimensões adotadas para o guarda-roda tipo New Jersey (unid.: mm).....	34
Figura 8 – Ponte discretizada para análise simplificada e para análise com barra única	35
Figura 9 – Ponte discretizada para análise com grelha de barras, grelha de barra e placa, e placas	36
Figura 10 – Ponte representada como barra única.....	37
Figura 11 – Ponte representada como uma grelha de barras	38
Figura 12 – Linha de influência de momento fletor referente à seção no meio do vão	39
Figura 13 – Linha de influência de momento fletor referente à seção no apoio	39
Figura 14 – Linha de influência de esforço cortante referente à seção a 50 cm do apoio.....	40
Figura 15 – Ponte representada com vigas como grelha de barras e tabuleiro como placa	41
Figura 16 – Ponte representada com vigas e laje como placas.....	43
Figura 17 – Seção T utilizada para análise (unid.: cm)	44
Figura 18 – Diagrama de momento fletor característico devido ao carregamento permanente (valores em kNm)	48
Figura 19 – Diagrama de esforço cortante característico devido ao carregamento permanente (valores em kN)	48
Figura 20 – Envoltória de momentos fletores característicos devido à carga móvel – já majorados pelo CIV (valores em kNm).....	48
Figura 21 – Envoltória de esforços cortantes característicos devido à carga móvel – já majorados pelo CIV (valores em kN).....	48
Figura 22 – Momentos fletores característicos nas vigas devido à carga permanente	50
Figura 23 – Esforços cortantes característicos nas vigas devido à carga permanente.....	51
Figura 24 – Momentos fletores característicos nas vigas devido à carga móvel – já majorados pelo CIV	51

Figura 25 – Esforços cortantes característicos nas vigas devido à carga móvel – já majorados pelo CIV	52
Figura 26 – Tensões atuantes nas placas devido à carga permanente no sentido longitudinal da ponte	53
Figura 27 – Tensões atuantes nas placas devido à carga permanente no sentido transversal da ponte	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelos simplificado, de barra única e de grelha de barras	56
Gráfico 2 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de grelha de barras e placa	57
Gráfico 3 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado, modelo de grelha de barras e placa e modelo de placas	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das cargas móveis	21
Tabela 2 – Modelos para análise de tabuleiros de pontes.....	27
Tabela 3 – Propriedades das longarinas e das transversinas	32
Tabela 4 – Momentos fletores de cálculo (após combinação) devido ao modelo simplificado	46
Tabela 5 – Esforços cortantes de cálculo (após combinação) devido ao modelo simplificado.	47
Tabela 6 – Momentos fletores de cálculo (após combinação) devido ao modelo de barra única	49
Tabela 7 – Esforços cortantes de cálculo (após combinação) devido ao modelo de barra única	49
Tabela 8 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de grelha de barras.....	50
Tabela 9 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de grelha de barras e placa.....	52
Tabela 10 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de placas	54
Tabela 11 – Esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas.....	55
Tabela 12 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de grelha de barras e placa.....	57
Tabela 13 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo de grelha de barras e placa e modelo de placas	58
Tabela 14 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de placas.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Problema motivador	16
1.4	Questões motivadoras	17
1.5	Objetivos	17
1.5.1	<i>Objetivos gerais</i>	17
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.6	Organização do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Considerações iniciais	20
2.2	Ações em pontes rodoviárias	20
2.3	Determinação de esforços e deformações em pontes	23
2.4	Análise de pontes por modelos de barras e placas e por modelos simplificados ..	26
2.5	Método dos Elementos Finitos	29
3	MÉTODOS DE ANÁLISE E MODELAGEM	31
3.1	Critérios básicos de projeto	31
3.2	Determinação da ponte-modelo	33
3.3	Determinação do trem tipo	34
3.4	Análise da ponte-modelo	35
3.4.1	<i>Análise com modelos simplificados consagrados</i>	36
3.4.2	<i>Análise com modelo de barras</i>	37
3.4.2.1	<i>Ponte representada como barra única</i>	37
3.4.2.2	<i>Ponte representada como grelha de barras</i>	38
3.4.3	<i>Análise com modelos de placas e barras em conjunto</i>	41
3.4.4	<i>Análise com modelo de placas somente</i>	42
3.5	Comparativo dos resultados dos modelos	45
4	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Resultados do modelo simplificado	46
4.2	Resultados do modelo de barra única	47
4.3	Resultados do modelo de grelha de barras	50
4.4	Resultados do modelo de grelha de barras e placa	50

4.5	Resultados do modelo de placas	53
4.6	Discussão e análise comparativa dos resultados	55
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

No ramo da Engenharia Civil, tem-se como definição para obras de arte especiais todas aquelas construções que detêm maior especialização para a elaboração do seu projeto e para sua execução em obra, tais como as pontes, pontilhões, viadutos e passarelas.

O processo de estudo de estruturas na engenharia é constituído de três fases que se encontram intimamente relacionadas: idealização, cálculo e interpretação. Na primeira fase, é onde deve-se conceber o modelo matemático que melhor representa a estrutura em questão. Na segunda, faz-se a análise do modelo por meio de cálculos matemáticos e/ou recursos oriundos de outras ciências, como a mecânica e a ciência dos materiais. Por fim, pode-se fazer a interpretação dos resultados obtidos e verificar sua consistência e proximidade com a realidade da estrutura estudada (GAVIOLI, 1998).

Atualmente, é crescente a busca por modelos que traduzem da melhor maneira, ou seja, da forma mais realista e coerente, as propriedades do elemento estrutural. Durante o processo de validação de um novo modelo, é fundamental que o mesmo tenha seus resultados comparados com parâmetros obtidos em campo ou com modelos confiáveis e já consagrados na literatura. É o caso do estudo comparativo de análises com modelos de elementos finitos de placa e barra para pontes em concreto armado a ser realizado por este trabalho, sendo o modelo de placa objeto de contínuo estudo na atualidade, e o de barra modelo já utilizado de maneira constante no âmbito de pesquisa e projetos estruturais.

Apesar do modelo com elementos finitos de placa ter seu uso mais recente na representação das estruturas de edifícios, pontes e viadutos, alguns trabalhos acadêmicos já têm surgido com foco nesse assunto, como o realizado por Albuquerque (2014) com elementos finitos de placa e barra para análise de esforços por meio de superfícies de influência.

Uma vez determinado um modelo representativo, é fundamental a utilização de métodos de análise que também levem a resultados condizentes com a realidade da estrutura, ou seja, modelo e análise devem caminhar juntos de modo a se complementarem e gerarem resultados confiáveis. É aí onde se encaixa o Método dos Elementos Finitos (MEF), ferramenta que já vem sendo usada, de acordo com Assan (2003), desde os anos 50, período no qual teve sua formulação estabelecida, e que continua se mostrando bastante eficaz na análise de estruturas de concreto armado.

De acordo com Azevedo (2011), o MEF tem como principal objetivo determinar o estado de tensão e deformação de uma estrutura de geometria qualquer submetido a ações externas, sendo largamente utilizado em estruturas de pontes. Pode-se então, com essa ferramenta, analisar e interpretar diversos tipos de seções de pontes de concreto a partir do comportamento de finitos pontos nodais oriundos da sua discretização.

O presente estudo irá então utilizar softwares com base no MEF para analisar e interpretar o comportamento de uma ponte em concreto armado com seção pré-determinada quando seus elementos são ora representados por barras e ora por placas, havendo, assim, possibilidade de comparar ambos os modelos.

1.2 Justificativa

Tendo em vista a crescente evolução dos métodos computacionais na engenharia e o surgimento de estruturas cada vez mais complexas no âmbito da construção civil, faz-se necessário aprofundar as pesquisas relacionadas aos modelos passíveis de serem utilizados para cálculo de esforços e detalhamento de obras de arte especiais, como pontes de concreto armado. Dessa forma, é plausível fazer uma análise comparativa entre os modelos de barra, mais simples, de fácil domínio e comumente usados, e de placa, mais sofisticados e menos abordados nos cursos de graduação em Engenharia Civil, de modo a verificar as diferenças de resultados de solicitações e tensões e poder validar os diferentes modelos.

1.3 Problema motivador

Os métodos computacionais de análise de estruturas evoluem continuamente. Necessita-se cada vez mais do aperfeiçoamento desses métodos para que os modelos selecionados para representar uma estrutura e sua seção possam retratar fielmente os comportamentos reais. Inerente a esse contexto, há a busca por modelos que representem perfeitamente as estruturas estudadas, visto que, para que o método computacional retorne bons resultados, necessita-se de bons modelos, e a busca por modelos simplificados, de fácil entendimento, que possam representar essas estruturas de forma satisfatória.

Apesar da obtenção de um modelo que represente a realidade do comportamento de uma estrutura de forma perfeita ser um tarefa bastante difícil, é possível realizar estudos que possam contribuir para a determinação de modelos mais ou menos adequados e representativos para cada tipo de situação.

É baseado nessa problemática que o presente trabalho se fundamenta. Busca-se analisar e comparar modelos de pontes com elementos finitos de barra e placa, de modo a tentar verificar se modelos de barra são efetivamente passíveis de utilização nos estudos como modelos eficientes e representativos do comportamento da estrutura, e se modelos com inclusão de elementos finitos de placa podem gerar uma discrepante diferença de resultados devido ao refinamento e, conseqüentemente, uma economia considerável de recursos para a execução da estrutura. Dessa forma, é possível obter indícios de respostas acerca de quais situações tais modelos podem melhor se adequar.

1.4 Questões motivadoras

Apresentam-se os questionamentos que motivaram a realização deste trabalho:

- a) É possível analisar pontes em concreto armado quando estas possuem seus principais elementos (vigas e laje do tabuleiro) representados por elementos de barra?
- b) É possível também analisar pontes quando estas possuem vigas representadas por elementos de barra e laje de tabuleiro representada por elementos de placa?
- c) É possível também analisar pontes quando estas possuem todos os seus elementos representados por elementos de placa?
- d) Estariam os resultados obtidos da análise de cada um desses modelos compatíveis entre si e com a realidade da estrutura em questão?
- e) Quais as principais diferenças observadas entre os modelos no que diz respeito a solicitações e tensões?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos gerais

O objetivo geral do presente trabalho é realizar a modelagem computacional por elementos finitos de barras, de placas e de placas e barras em conjunto de uma ponte em concreto armado escolhida para ser a ponte-modelo.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Analisar a ponte-modelo em concreto armado quando esta possui seus principais elementos (vigas e laje do tabuleiro) representados por elementos de barra;
- b) Analisar a ponte-modelo quando esta possui vigas representadas por elementos de barra e laje de tabuleiro representada por elementos de placa;
- c) Analisar a ponte-modelo quando esta possui vigas e laje do tabuleiro representados por elementos de placa;
- d) Verificar compatibilidade dos resultados obtidos com o uso de elementos de barra e pela inclusão de elementos de placa nos modelos de análise da ponte;
- e) Verificar as principais diferenças observadas entre os modelos no que diz respeito a solicitações e tensões.

1.6 Organização do trabalho

Esta monografia desenvolve-se em seis capítulos, descritos mais detalhadamente nos parágrafos adiante.

O capítulo 1, de introdução, busca apresentar conceitos gerais acerca de obras de arte especiais, etapas do processo de estudo de estruturas, conceitos de modelagem de estruturas e uma introdução ao MEF. Além disso, o capítulo de introdução expõe a justificativa principal do trabalho, o problema e as questões que motivaram o desenvolvimento do estudo aqui apresentado. Este capítulo também é dedicado a apontar o objetivo geral e os objetivos específicos a serem alcançados no decorrer das fases do trabalho.

O capítulo 2 traz uma revisão da bibliografia, onde são apresentados conceitos detalhados acerca da determinação e da análise de esforços atuantes em uma ponte sob ação de carga permanente e carga móvel variável. Além disso, a revisão bibliográfica expõe estudos relevantes já realizados acerca do uso de modelos representativos e da modelagem computacional com elementos finitos de barra e placa.

O capítulo 3, de metodologia, apresenta, de maneira detalhada, os softwares e os procedimentos necessários para a realização da análise computacional da ponte com modelos que utilizam elementos finitos de placa e de barra.

O capítulo 4 faz uma síntese dos resultados obtidos após a realização dos procedimentos de análise propostos no capítulo anterior e apresenta uma discussão acerca do que tais resultados podem representar.

Por fim, o capítulo 5, de conclusões e sugestões, surge com as considerações finais, no qual é feito um apanhado geral dos resultados, relacionando-os com os objetivos específicos, de modo a verificar se os mesmos foram alcançados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

As primeiras pontes surgiram na antiguidade entre os povos primitivos e eram constituídas principalmente de madeira. Seguiu-se, a partir daí, uma ordem cronológica em que foram surgindo pontes formadas por outros materiais, como as de pedra, as metálicas, e as de concreto armado e protendido (LEONHARDT, 1979). Apesar de, segundo Leonhardt (1979), terem surgido em meados de 1938, pontes em concreto armado ainda são largamente utilizadas na atualidade.

Para Pfeil (1979), pontes em concreto armado são obras de arte especiais que podem ser classificadas quanto à disposição dos seus elementos, como ponte em laje, ponte em viga reta de treliça, ponte em quadro rígido, ponte em abóboda, ponte em arco superior, ponte pênsil e ponte em viga reta de alma cheia. Esta última é de geometria bastante simples, constituída, normalmente, de elementos como laje do tabuleiro, longarinas e transversinas, e pode ser encarada como uma ponte economicamente vantajosa. Ponte em viga reta de alma cheia é o tipo utilizado para presente o estudo.

A determinação dos tipos de elementos constituintes está intrinsecamente ligada ao tamanho dos vãos a serem vencidos, à esbeltez desejada para as peças, aos esforços atuantes, aos processos construtivos e aos fatores econômicos. As vigas e o tabuleiro são os elementos da superestrutura que mais variam de acordo com os fatores anteriores, uma vez que são as estruturas que recebem diretamente o carregamento. Tal fato os torna foco de diversas análises, principalmente no que diz respeito ao comportamento desses elementos estruturais. É nessa conjuntura onde se encaixa a realização de diversos tipos de estudos acerca de esforços e deformações que ocorrem na superestrutura devido a ações de diferentes naturezas.

2.2 Ações em pontes rodoviárias

Em geral, as pontes podem estar sujeitas a ações permanentes, variáveis e excepcionais, sendo estas representadas, por exemplo, pelos seguintes carregamentos:

- a) Ações permanentes: peso próprio dos elementos e da pavimentação, empuxos de terra, protensão, deformações impostas, etc.;

- b) Ações variáveis: cargas móveis, efeitos de frenagem e aceleração, variação de temperatura, ação do vento, etc.;
- c) Ações excepcionais: choques de veículos, explosões, etc.

Muitas vezes, entretanto, as cargas mais relevantes em uma ponte, e as que são normalmente consideradas para fins de projeto, são devido a peso próprio dos elementos e carregamentos móveis oriundos do tráfego de veículos.

O peso próprio da estrutura é constituído pelo peso dos elementos estruturais, que no caso do presente trabalho trata-se de concreto armado, dos guarda-rodas, também constituídos de concreto armado, e do revestimento sobre as faixas de tráfego. Segundo a NBR 7187 (2003), utiliza-se 25 kg/m^3 para o peso do concreto armado e 24 kg/m^3 , no mínimo, quando não há previsão de recapeamento, para o peso do revestimento sobre as faixas.

Para efeitos de determinação de cargas móveis, é estabelecida a divisão das pontes rodoviárias em classes 45, 30 e 12, com sistemas de carregamento baseados em um veículo tipo e cargas móveis distribuídas na pista e nos passeios, como apresentado na Tabela 1 a seguir.

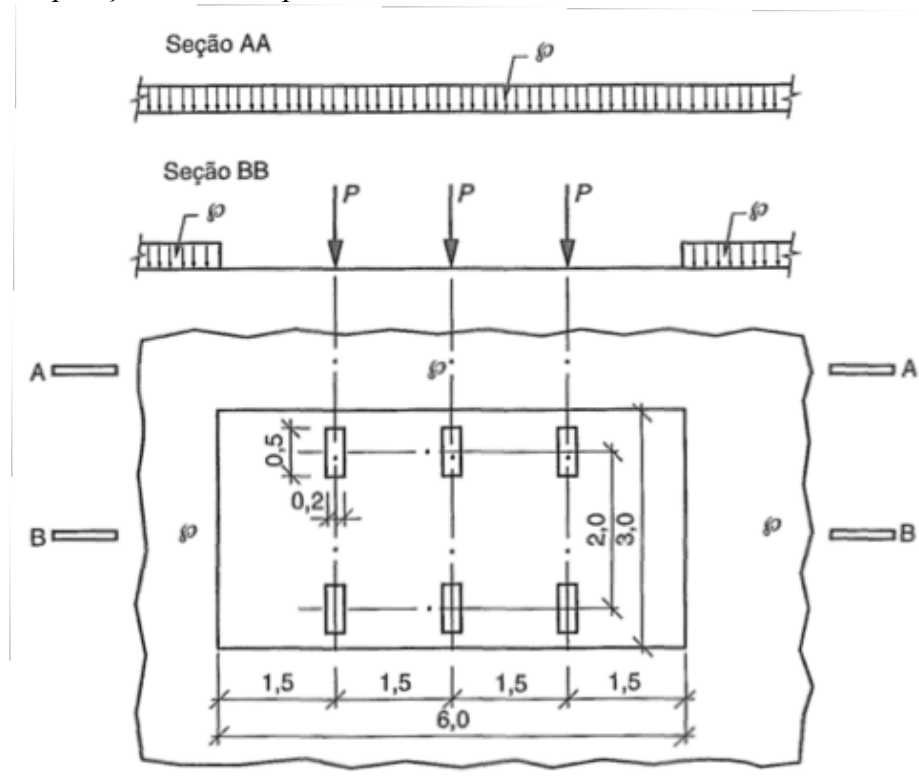
Tabela 1 – Composição das cargas móveis

CARGAS DOS VEÍCULOS								
Classe da ponte	Veículo		Cargas uniformemente distribuídas				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 a pista Carga p' nos passeios
30	30	300	30	5	500	3	300	
12	12	120	12	4	400	3	300	

Fonte: Adaptado de Marchetti (2008)

O trem tipo rodoviário brasileiro se enquadra na classe 45, sendo denominado TB-45. De acordo com a NBR 7188 (2013), o carregamento da classe TB-45 é constituído de um veículo tipo de 450 kN, com três eixos distantes 1,5 m entre si, seis rodas com carga de $P = 75 \text{ kN}$ cada distantes 2 m entre si, e projeção com área de 18 m^2 (6 m x 3 m). O carregamento desse veículo tipo, de dimensões avantajadas em relação aos veículos comuns, é circundado por uma carga móvel uniformemente distribuída de $p = 5 \text{ kN/m}^2$, que representa uma possível multidão de veículos de menor porte, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Disposição do trem tipo rodoviário brasileiro



Fonte: ABNT NBR 7188 (2013)

Uma vez que a carga distribuída de 5 kN/m^2 pode atuar sobre a área de projeção correspondente ao veículo tipo, a carga concentrada de 75 kN é passível de simplificação para 60 kN . Isto se deve ao fato de o carregamento distribuído sobre a região ocupada pelo veículo tipo resultar em um acréscimo total de 90 kN , isto é, um aumento de 15 kN em cada roda.

Ao utilizar cargas móveis na análise de pontes, deve-se considerar os efeitos dinâmicos ocasionados por elas, visto que a passagem dos veículos sobre a laje da ponte provoca a excitação dos seus modos de vibração. A desconsideração desse efeito tornaria a análise pouco precisa, já que tal situação não corresponderia ao efetivo comportamento da estrutura.

No intuito de considerar os efeitos dinâmicos, faz-se necessário utilizar coeficientes que modificam as cargas móveis estáticas verticais, tornando-as realistas o suficiente para representar as cargas móveis dinâmicas. A NBR 7188 (2013) propõe a utilização de coeficientes de impacto vertical, de número de faixas e de impacto adicional. Desse modo, as cargas móveis são, por fim, obtidas a partir das Equações 1 e 2 a seguir.

$$Q = P * CIV * CNF * CIA \quad (1)$$

$$q = p * CIV * CNF * CIA \quad (2)$$

O coeficiente de impacto vertical (CIV), segundo a NBR 7188 (2013), deve ser usado na majoração das cargas móveis de todos os elementos estruturais da ponte. Para vãos até 10 m, usa-se 1,35 para o CIV. Para vãos entre 10 m e 200 m, utiliza-se a Equação 3 abaixo:

$$CIV = 1 + 1,06 * \frac{20}{Liv+50} \quad (3)$$

Onde: *Liv* – vão em metros.

O Coeficiente de Número de Faixas (CNF) é usado para minorar as cargas móveis características e é determinado pela Equação 4 a seguir:

$$CNF = 1 - 0,05(n - 2) > 0,9 \quad (4)$$

Onde: *n* – número de faixas de tráfego a serem carregadas.

Já o Coeficiente de Impacto Adicional (CIA) é utilizado para majorar as cargas móveis próximas às juntas estruturais. Utiliza-se o CIA de 1,25 para obras em concreto ou mistas e de 1,15 para obras em aço.

À medida que se aumenta o vão da ponte, a influência do efeito dinâmico decresce consideravelmente, isso porque o peso da ponte aumenta mais rapidamente que a carga móvel nela atuante (EL DEBS; TAKEYA, 2007).

Segundo Pfeil (1979), ações horizontais, como frenagem e vento, atuam acima do tabuleiro da ponte e, por isso, transferem efeitos razoavelmente pequenos para o nível do viga. No caso do estudo aqui apresentado de análise de esforços nas longarinas, tais efeitos podem, portanto, ser desprezados do cálculo.

2.3 Determinação de esforços e deformações em pontes

O carregamento atuante em uma ponte é obtido a partir de combinações que majoram ou minoram cada tipo de ação de acordo com sua probabilidade de ocorrência. O

somatório de todas essas ações após aplicação de seus coeficientes de ponderação considera a probabilidade de haver simultaneidade entre tais ações.

Para fins de dimensionamento de obras como pontes, combinam-se os esforços devido às ações considerando o estado limite último (ELU), que representa a estrutura na situação de ruína, ou seja, na situação de esgotamento da sua capacidade resistente, e o estado limite de serviço (ELS), relacionado à durabilidade e ao bom desempenho em serviço da estrutura. Para determinação de esforços de dimensionamento, portanto, utilizam-se combinações últimas. Já para a verificação do desempenho da estrutura na situação de uso, isto é, verificação do atendimento a flechas e aberturas de fissuras máximas, faz-se uso de combinações de serviço.

A NBR 8681 (2004) propõe os devidos coeficientes de ponderação a serem usados nas combinações últimas de esforços, sendo de 1,35 o fator desfavorável e de 1 o fator favorável utilizados em ações permanentes, e de 1,5 o fator usado em ações variáveis, como cargas móveis. Tais valores são os recomendados para pontes de concreto armado em geral. As Equações 5 e 6 apresentadas a seguir resumem as possíveis combinações últimas desfavorável e favorável, respectivamente:

$$F_d = 1,35F_g + 1,5F_q \quad (5)$$

$$F_d = F_g + 1,5F_q \quad (6)$$

Onde: F_d – combinação resultante;

F_g – carga permanente;

F_q – carga variável.

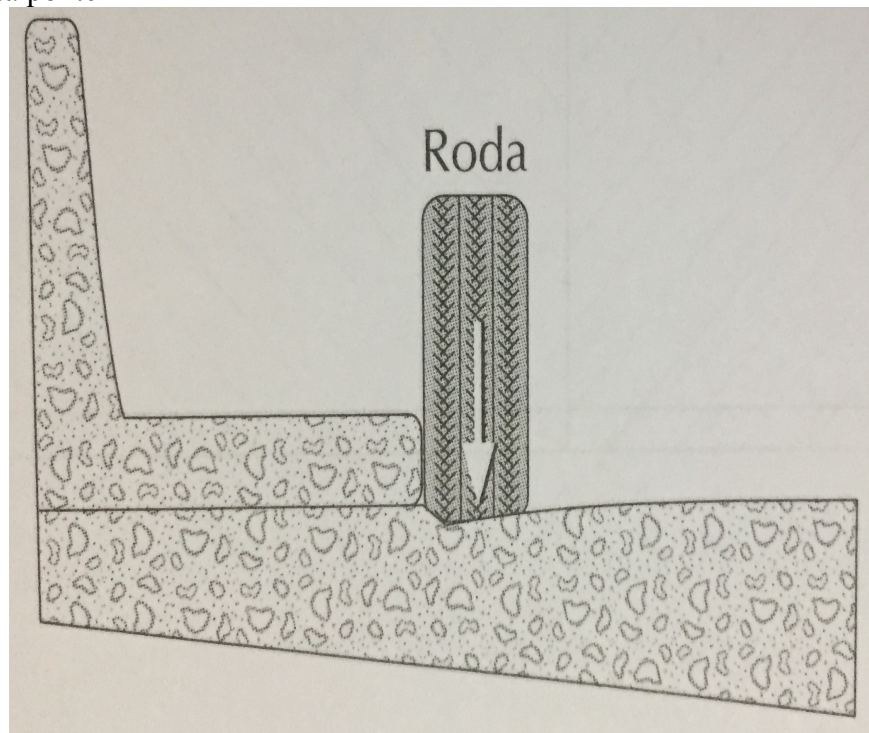
O presente trabalho, entretanto, utilizará, para as análises comparativas, apenas esforços provenientes de combinações últimas. Não serão realizadas verificações quanto ao estado limite de serviço, visto que o objetivo principal não é analisar o desempenho da ponte em seu estado de utilização.

Esforços atuantes em longarinas oriundos de ações permanentes podem ser determinados de maneira simples com base nas equações básicas de equilíbrio do sistema estrutural da ponte. O peso próprio dos elementos como tabuleiro, transversinas e guarda-ródas pode ser calculado, somado e dividido entre as longarinas da ponte.

De acordo com Pfeil (1979), para a obtenção dos esforços de ações variáveis como cargas móveis, pode-se, no caso do tabuleiro, distribuir uma carga unitária sobre diversos pontos dessa superfície, de modo a obter uma superfície de influência, sendo possível obter a solicitação multiplicando a carga pela ordenada dessa superfície. No contexto de determinação de esforços em vigas, entretanto, as superfícies de influência são pouco práticas para uso corrente. Nesse caso, utilizam-se linhas de influência, que possuem o mesmo propósito das superfícies, mas com caráter unidimensional.

Os esforços utilizados para análise da maioria das longarinas em pontes são obtidos dispondo a carga móvel na posição mais desfavorável da largura do tabuleiro, ou seja, no sentido transversal, rente ao guarda-rodas, como apresentado a seguir na Figura 2. A partir disso, pode-se obter o carregamento móvel atuante sobre a longarina, denominado como o trem tipo.

Figura 2 – Posição mais desfavorável do veículo do carregamento móvel no sentido transversal da ponte



Fonte: Marchetti (2008)

O trem tipo, então, também é alocado na posição mais desfavorável, sendo agora no sentido longitudinal da longarina. As posições mais desfavoráveis são reconhecidas a partir dos diagramas de linhas de influência de cada seção da viga para o esforço em questão.

Assim como as superfícies de influência, a carga é multiplicada pelas ordenadas da linha de influência, resultando nas solicitações atuantes.

Seguindo esse processo, é fator essencial para a realização de análises globais das vigas a determinação da envoltória de cada esforço (momento fletor, cortante ou reações de apoio) na estrutura, o que permite observar os valores máximos e mínimos atuantes devido a uma combinação de cargas móveis e permanentes. Visto que o posicionamento variado das cargas móveis sobre a ponte gera diferentes valores de esforços, devem ser tomados os máximos e mínimos para cada seção, no intuito de obter a envoltória da viga e de dimensionar a estrutura para o caso mais desfavorável.

As deformações presentes nas longarinas da ponte são avaliadas com base nas flechas oriundas das mesmas após o carregamento. A NBR 6118 (2014) especifica que flechas devem ser calculadas considerando a inércia da seção fissurada da peça, uma vez que a fissuração de vigas é inevitável e tal fato leva a uma redução da rigidez da seção. Softwares como FTOOL fundamentam-se no Método da Rigidez Direta (MRD) para determinação de deslocamentos, sendo o MRD um método que utiliza uma sistemática de obtenção de matrizes de rigidez da estrutura global. O MEF, utilizado pelos softwares GRELHA e MIDAS, tem base nos mesmos princípios do MRD para determinação de esforços e deslocamentos, entretanto possui maior refinamento de análise, visto que não se priva somente à elementos de barra, de natureza unidimensional.

2.4 Análise de pontes por modelos de barras e placas e por modelos simplificados

Segundo Cremades (2015), a determinação do estado de deformações e tensões depende do modelo estrutural adotado, a partir do qual dependerá a validade da análise e a segurança da estrutura.

Cremades (2015) afirma que é possível fazer a análise dos tabuleiros de pontes com modelos 1D, unidimensionais, e 2D, bidimensionais, ou seja, os mesmos podem ser representados por uma barra ou um sistema de barras e uma placa ou um sistema de placas, além de ser possível haver representação com um sistema híbrido de ambos elementos. A Tabela 2 apresentada adiante resume alguns conceitos relativos a possíveis modelos estruturais de tabuleiros de pontes e as teorias de estruturas que podem ser utilizadas para realizar as análises.

Tabela 2 – Modelos para análise de tabuleiros de pontes

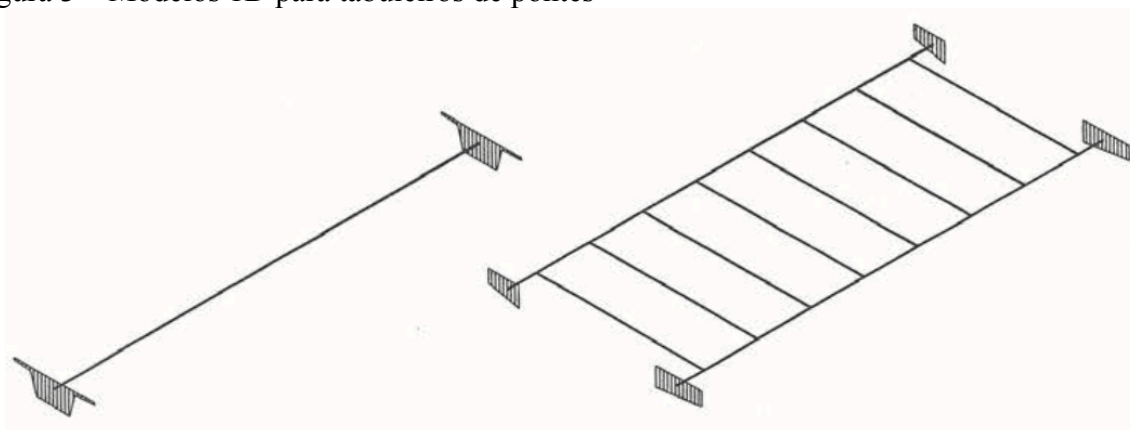
MODELAGEM DO TABULEIRO		EQUAÇÕES DE COMPORTAMENTO DO TABULEIRO
MODELO 1D	Tabuleiro como uma única barra	Teoria de vigas
	Tabuleiro como uma grelha de vigas	Sistema de barras
MODELO 2D	Tabuleiro como uma única placa	Teoria de placas
	Tabuleiro como uma lâmina dobrada	Teoria de placas e lâminas
MODELO HÍBRIDO	Tabuleiro como uma placa única e vigas como barras	Sistema de barras e placas

Fonte: Adaptado de Cremades (2015)

Os modelos 1D de tabuleiro como única barra e tabuleiro como grelha de vigas, e o modelo híbrido de tabuleiro como placa e vigas como barras serão os abordados no trabalho. Além dos mencionados, será abordado também o modelo 2D de vigas e tabuleiro como elementos de placa.

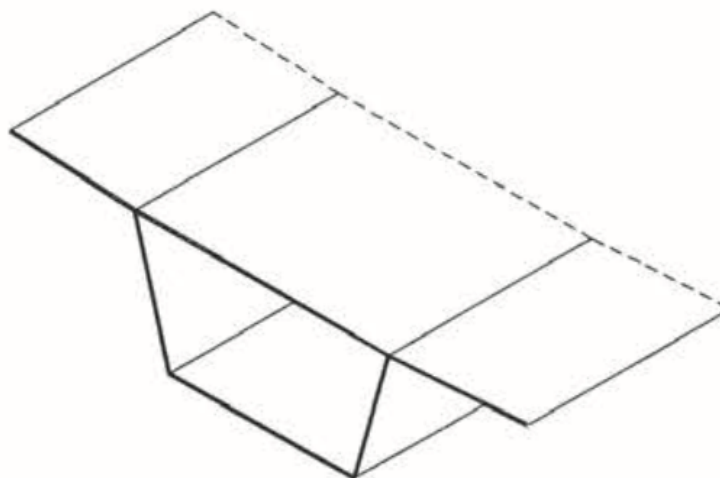
As Figuras 3 e 4 exibidas a seguir demonstram, respectivamente, de acordo com Cremades (2015), possíveis distribuições de elementos de barra (unidimensionais) e elementos de placa (bidimensionais) em modelos de análise de tabuleiros de pontes. O modelo apresentado na Figura 4, no entanto, não será o abordado neste trabalho por ser um caso mais específico, sendo mostrado apenas como representação e ilustração da modelagem de uma ponte em seção caixão com elementos de placa.

Figura 3 – Modelos 1D para tabuleiros de pontes



Fonte: Cremades (2015)

Figura 4 – Modelos 2D para tabuleiros de pontes



Fonte: Cremades (2015)

Desde os primórdios de seu uso, é corriqueira a realização de estudos de análise das estruturas de pontes. O conhecimento dos efeitos transmitidos aos seus elementos tem grande contribuição para seu adequado dimensionamento, de forma a atender a fatores econômicos e de segurança requeridos. No processo de análise de uma estrutura, são feitas considerações e simplificações de maneira a possibilitar o estudo adequado dos elementos da ponte, evitando sempre que eles percam sua devida representatividade.

Sampaio *et al.* (2010) desenvolveram um modelo numérico representativo de uma ponte ferroviária utilizando elementos finitos de barra para representar a seção transversal do tabuleiro, e outro com elementos finitos de casca com a mesma função, de modo a realizar uma análise modal da ponte. Apesar de ter sido necessário criar outros dois modelos devido à dependência do comportamento modal existente entre os vãos isostáticos, os procedimentos de modelagem desenvolvidos apresentaram resultados aproximados aos obtidos experimentalmente.

Ainda que o trabalho de Sampaio *et al.* (2010) faça um comparativo entre placas e barras, o mesmo foca no desenvolvimento de modelos numéricos para análise modal, fazendo poucas ressalvas acerca do estudo do modelo estrutural representativo da estrutura da ponte ferroviária em si.

Já Néia *et al.* (2015) fizeram uma análise de modelagem computacional de uma ponte existente utilizando o MEF por meio do software SAP 2000, de modo a verificar esforços e deformações existentes na ponte devido à ação do peso próprio e da carga móvel. Os resultados obtidos com essa análise foram comparados com os obtidos a partir do uso de modelos isolados simplificados da estrutura. Segundo Néia *et al.* (2015), o uso do modelo

computacional traz resultados representativos da realidade, uma vez que dessa forma analisa-se o sistema completo, inclusive sua assimetria, o que não é tão simples de obter por meio do uso de modelos isolados simplificados.

Distanciando-se do enfoque de análise de modelagem, Bessa e Silva (2000) utilizaram uma análise dinâmica para verificar comportamento dinâmico de cargas móveis em placas e a sua interação com o carregamento aplicado. A utilização do MEF permitiu obter um modelo matemático na forma de equação, que caracteriza o comportamento da placa de maneira global. O modelo proposto permitiu concluir que é vantajoso fazer uso de procedimentos generalizados e modulares para representar sistemas complexos.

Apesar de diversas análises terem sido feitas com placas e barras representando pontes e sofrendo ação de carregamento móvel, há poucos estudos que visem comparar os resultados obtidos pelo uso desses modelos de análise em si, de modo a direcionar as pesquisas acerca de pontes de concreto a uma linha mais precisa e confiável. É devido a isso que o presente estudo pretende dar possíveis contribuições a tais pesquisas.

2.5 Método dos Elementos Finitos

O MEF é uma metodologia numérica largamente utilizada como ferramenta computacional capaz de prover resultados aproximados de equações diferenciais, dividindo um elemento qualquer em finitas partes menores de modo a facilitar a resolução de um problema complexo.

Segundo Assan (2003), o MEF surgiu como uma possibilidade para resolver problemas de teoria da elasticidade, sendo comumente utilizado com base no método de *Rayleigh-Ritz*, o que permite prever a divisão do domínio contínuo em discreto, onde os pontos de interseção dos elementos são chamados de nós.

Em geral, elementos finitos unidimensionais, no caso os elementos de barra, têm como incógnitas nodais duas translações (vertical e horizontal) e uma rotação. Já os elementos finitos bidimensionais, no caso os elementos de placa, podem possuir como incógnitas nodais uma translação no sentido normal ao seu plano e duas rotações em torno das direções do plano. A depender do tipo de análise, é possível considerar os elementos do plano com formatos retangulares ou triangulares.

A aplicação do MEF pode ser dividida em duas importantes etapas. Primeiramente, obtêm-se as relações força-deslocamento e, conseqüentemente, a matriz de rigidez de um elemento finito a partir de equações de equilíbrio aproximadas. Em seguida, os

elementos constituintes do sistema estrutural são associados, formando equações de equilíbrio da estrutura por completo (ALVES *et al.*, 2004).

No contexto de análise de grandes estruturas, para Albuquerque (2014), o MEF mostra-se como uma ferramenta flexível no tocante à discretização dos elementos de uma ponte por elementos finitos de barras, chapas e placas. Devido a tal característica, inúmeros softwares se baseiam no MEF para fornecer soluções aproximadas de diversos problemas de engenharia relacionados a pontes de concreto, sendo o MIDAS e o GRELHA, dois dos softwares usados no desenvolvimento do trabalho, exemplos de programas de análise com MEF.

3 MÉTODOS DE ANÁLISE E MODELAGEM

Visando atingir os objetivos específicos mencionados anteriormente, foram executadas as etapas metodológicas descritas de forma resumida no fluxograma da Figura 5 a seguir e detalhadas nos tópicos subsequentes.

Figura 5 – Fluxograma de etapas metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.1 Critérios básicos de projeto

Conforme a NBR 7187 (2003), foi feito uso de 25 kg/m^3 para o peso do concreto armado e 24 kg/m^3 para o peso do revestimento, visto que, dos 25 cm de largura do tabuleiro, 7 cm são devidos ao revestimento sobre o tabuleiro da ponte, o que faz tal carga ter uma relevante parcela no cálculo de peso próprio, devendo, portanto, ser considerada.

Foi estudada apenas a superestrutura da ponte em questão, ou seja, as análises realizadas dizem respeito somente ao tabuleiro, às longarinas, e às transversinas. Pilares, fundações e a ligação destes com a superestrutura não foram abordados no estudo. No caso da superestrutura, tomou-se f_{ck} de 30 MPa e módulo de elasticidade secante de 27 MPa. O módulo de elasticidade secante foi obtido a partir dos critérios estabelecidos pela NBR 6118 (2014) para o f_{ck} de 30 MPa, no qual foi considerado o agregado granito na composição do concreto. O coeficiente de poisson foi adotado, para o concreto armado, como igual a 0,2.

Além disso, com base no capítulo 2.2, para pontes que possuem vãos até 10 m, como é o caso da presente ponte, foi utilizado 1,35 para o valor do CIV no cálculo das combinações últimas finais. Não foram considerados efeitos devido ao número de faixas e ao impacto adicional.

Para o desenvolvimento das análises, foi preciso determinar as propriedades da ponte. Foi necessário calcular a área e as inércias das longarinas e das transversinas, sendo que, no caso das longarinas, considerou-se que estas atuavam com a inércia de metade da ponte, visto que as lajes e os guarda-rodas também exercem colaboração na resistência total da peça. A Tabela 3 a seguir resume as propriedades das seções necessárias para as análises.

Tabela 3 – Propriedades das longarinas e das transversinas

PROPRIEDADES DE SEÇÃO		
	Área (m ²)	2,0902
LONGARINAS (PROPRIEDADES DE MEIA PONTE)	Inércia em relação ao eixo X no centroide (m ⁴)	0,1325
	Inércia em relação ao eixo Y no centroide (m ⁴)	7,4853
	Área (m ²)	0,21
TRANSVERSINAS	Inércia em relação ao eixo X no centroide (m ⁴)	0,008575
	Inércia em relação ao eixo Y no centroide (m ⁴)	0,001575

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Foram consideradas, como estabelecido na NBR 8681 (2004), para verificação de segurança, todas as combinações de ações que possam acarretar os efeitos mais desfavoráveis. Além disso, as cargas móveis também foram consideradas em suas posições mais desfavoráveis sobre a ponte.

A análise de esforços nas longarinas da ponte fundamentou-se em métodos simplificados, baseados em equações de equilíbrio e em princípios da Resistência dos Materiais, e nos fundamentos do MEF. Análises simplificadas foram feitas com base em métodos consagrados de cálculo de esforços, linhas de influência e envoltórias, além do uso do software FTOOL. A análise com MEF foi facilitada pelos softwares GRELHA e MIDAS.

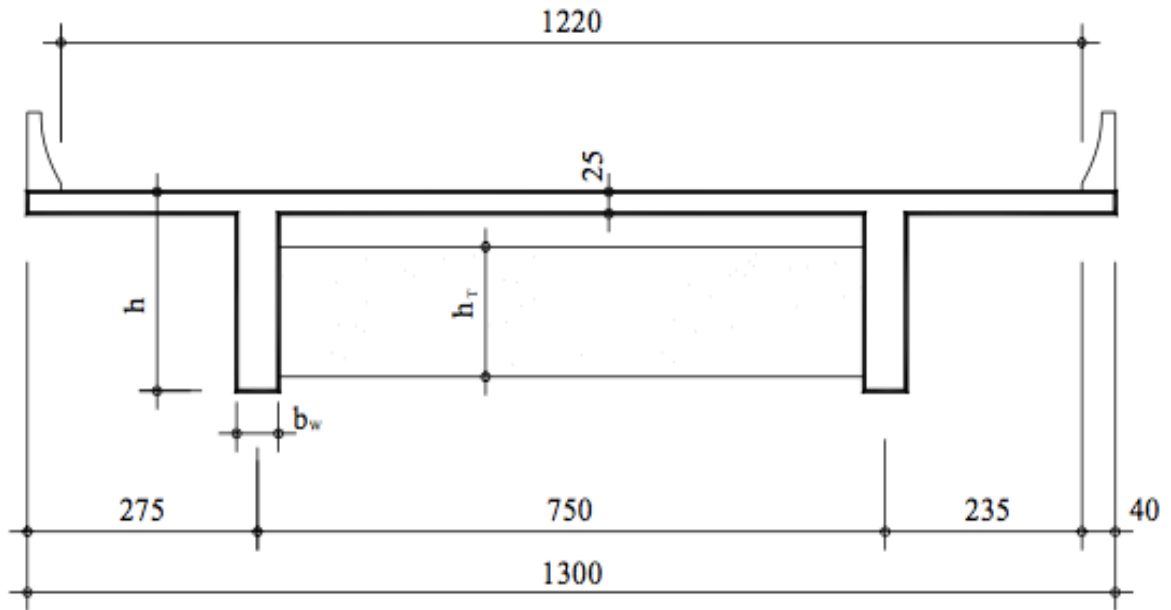
Como já mencionado anteriormente, a análise comparativa de esforços foi realizada com base nos resultados provenientes de combinações últimas. Não foram feitas análises com combinações de serviço visto que o objetivo do trabalho não foi verificar desempenho e uso da estrutura em serviço.

3.2 Determinação da ponte-modelo

Segundo Pfeil (1979), as pontes rodoviárias de Classe I, por muito tempo, foram construídas com uma largura total de 10 m, sendo 8,20 m atribuídos à pista e 0,90 m a cada um dos guarda-rodas laterais. Entretanto, tal seção provocava uma redução de cerca de 17% da capacidade da rodovia, fato comprovado pelas excessivas colisões de veículos contra os guarda-rodas. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) seguiu, então, as orientações dos estudos publicados pela Associação Americana dos Órgãos Rodoviários Estaduais (AASHO) e adotou para pontes rurais a largura total de 13 m, sendo 12,20 m para a pista e 0,40 m para cada um dos guarda-rodas.

Com base nas determinações do modelo atual do DNER, foi adotada, para este trabalho, a seção de ponte rural com 13 m de largura utilizada por Rossigali (2006) no estudo probabilístico de modelos de cargas móveis em pontes brasileiras, mostrada, com suas dimensões, na Figura 6. Além disso, adotou-se uma ponte constituída de duas longarinas biapoiadas, quatro transversinas desligadas da laje, sendo duas localizadas no centro do vão distantes 3 m entre si e duas sobre os apoios, e uma cortina em cada extremidade do balanço, considerada como de mesmas dimensões e propriedades das transversinas e também desligadas da laje. O comprimento longitudinal estipulado foi de 10 m de vão entre os pilares e 2,5 m de balanço em cada lado, totalizando 15 m. Vale ressaltar que as dimensões das transversinas não seguiram o padrão estabelecido por Rossigali (2006) de 30 m x 80 m e tiveram suas dimensões alteradas para 30 m x 70 m. O guarda-rodas considerado foi o de barreira simples do perfil tipo New Jersey, com dimensões baseadas na NORMA DNIT-PRO 109 (2009), apresentadas na Figura 7.

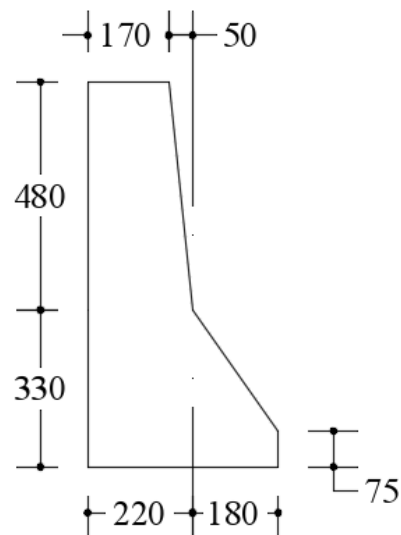
Figura 6 – Seção transversal adotada para estudo de ponte (unid.: cm)



Fonte: Rossigali (2006)

Onde: $h = 125$ cm; $h_T = 70$ cm; $b_w = 35$ cm.

Figura 7 – Dimensões adotadas para o guarda-roda tipo New Jersey (unid.: mm)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.3 Determinação do trem tipo

Em conformidade com o que é estabelecido pela NBR 7188 (2013), foi utilizada, para a realização do estudo, uma ponte rodoviária da classe 45 (a ser chamada como ponte-

modelo), na qual atua a carga móvel rodoviária padrão TB-450, ou, mais comumente chamada, TB-45. Adotou-se, então, carga distribuída sobre o tabuleiro de 5 kN/m^2 e cargas concentradas de 60 kN (valor reduzido de 75 kN , cuja razão é explicada anteriormente no capítulo 2.2) devido às rodas do veículo padrão.

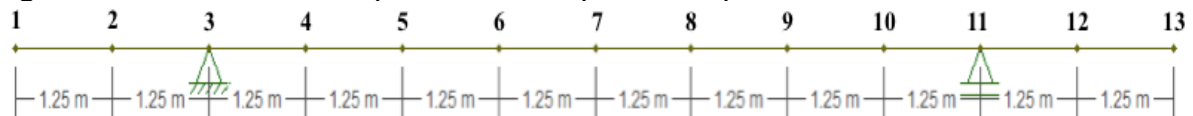
3.4 Análise da ponte-modelo

Para análise e comparação da modelagem aplicada à ponte-modelo, foi feita, primordialmente, a verificação de esforços das longarinas mais carregadas. A análise foi realizada de quatro maneiras gerais, listadas a seguir, de modo que, posteriormente, elas fossem todas comparadas entre si:

- a) Análise com modelo simplificado consagrado;
- b) Análise com barra única;
- c) Análise com grelha de barras;
- d) Análise com grelha de barras e placa em conjunto;
- e) Análise com placas.

No caso da análise com modelos simplificados e da análise com modelo de barra única, a viga foi dividida em 13 seções distantes $1,25 \text{ m}$ entre si, tanto na região de balanço como na do vão, como exibido na Figura 8. Para os dois casos foram determinadas as envoltórias de momento fletor e esforço cortante.

Figura 8 – Ponte discretizada para análise simplificada e para análise com barra única



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Já para as análises com grelha de barras, com grelha de barras e placa em conjunto, e com placas, a viga mais carregada foi analisada somente nas seções críticas estabelecidas que, no caso, são o meio do vão e a região próxima aos apoios, como apresentado a seguir na Figura 9.

Figura 9 – Ponte discretizada para análise com grelha de barras, grelha de barra e placa, e placas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

No meio do vão, foi analisado o momento fletor positivo máximo e, nos apoios, foi analisado o momento fletor negativo máximo. Ressalta-se que foi considerada uma distância de 50 cm dos apoios para as análises de esforço cortante, pois, imediatamente sobre o apoio, o esforço cortante não é representativo devido à influência do elemento de apoio.

3.4.1 Análise com modelos simplificados consagrados

Nesta análise, a ponte foi representada como uma barra única, que recebeu metade do carregamento permanente devido à existência de duas longarinas. Vale ressaltar que a carga móvel foi considerada aplicada de maneira integral sobre esta única viga representativa. Isto porque, segundo a NBR 7188 (2013), a carga móvel é constituída de um único veículo tipo que deve ser aplicado na posição que cause o efeito mais desfavorável. O posicionamento desta carga exatamente sobre a longarina de análise causaria esforços maiores.

A determinação dos momentos fletores e dos esforços cortantes na longarina da ponte-modelo foi feita a partir das teorias clássicas do comportamento das estruturas. Para isso, foi determinada, primeiramente, a carga permanente da ponte, considerando pesos específicos de 25 kN/m^3 , para o concreto armado dos elementos estruturais e do guarda-rodas, e 24 kN/m^3 , para revestimento, de modo a obter esforços resultantes desse carregamento. Foram aplicados, em seguida, as equações comuns de equilíbrio e os princípios básicos da Resistência dos Materiais, visto que a longarina é isostática biapoiada.

Por outro lado, também foram determinados os esforços oriundos da carga móvel TB-45. Para isso, tomou-se, a princípio, a linha de influência das reações de apoio da seção transversal da ponte-modelo mostrada na Figura 6. De posse dessa linha de influência, obteve-se o carregamento linear sobre a longarina da ponte. Em seguida, pôde-se obter as linhas de influência de momento fletor de cada uma das seções pré-determinadas da viga, mostradas na Figura 8, as quais nos levam a obter os momentos máximos negativos e

positivos de cada seção. O mesmo pôde ser feito com as linhas de influência de esforço cortante, obtendo, assim, os cortantes máximos negativos e positivos de cada seção.

Por fim, foi possível obter a envoltória de solicitações com os valores de esforços máximos e mínimos de cada uma das seções da longarina, obtidos pelas Equações 5 e 6, combinações últimas de efeito desfavorável e favorável, respectivamente.

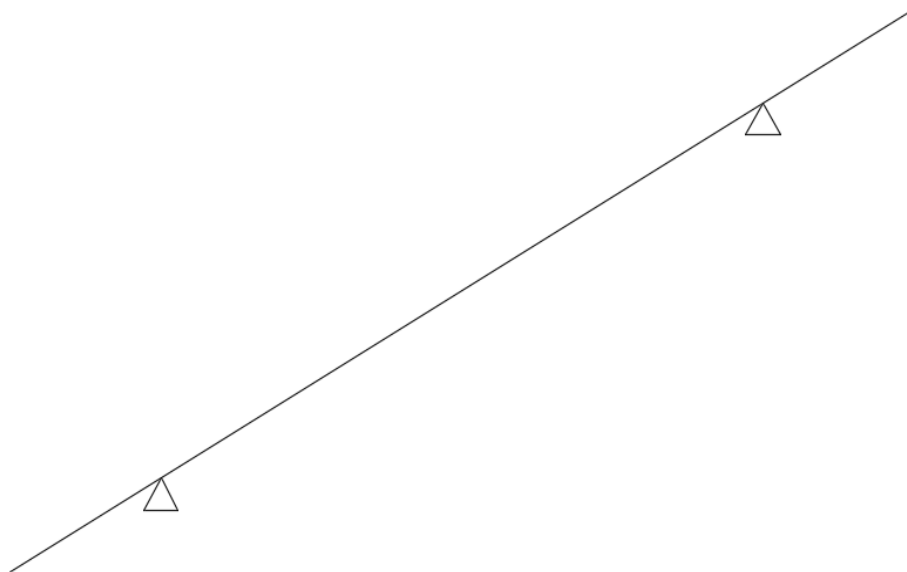
As solicitações variáveis (cargas móveis), como explicado no capítulo 3.1, foram majoradas somente pelo CIV, com valor de 1,35 para vãos até 10 m de modo que o efeito devido às cargas móveis verticais fosse o único existente. Não foi considerada a influência das forças horizontais neste caso devido ao fato explanado no capítulo 2.2.

3.4.2 Análise com modelo de barras

3.4.2.1 Ponte representada como barra única

Esta análise fundamenta-se nos mesmos princípios da análise do capítulo 3.4.1, sendo, portanto, realizado praticamente o mesmo processo anterior. O intuito desta análise é somente validar os resultados obtidos no processo anterior de maneira mais sofisticada. A ponte é, também, representada como uma única barra, recebendo metade do carregamento permanente e toda a carga móvel. A Figura 10 demonstra a disposição desta viga única, que segue o mesmo padrão apresentado por Cremades (2015), representativa da ponte-modelo.

Figura 10 – Ponte representada como barra única



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

A diferença primordial é que, nesta fase, a ponte foi analisada de maneira automatizada, por meio do software FTOOL. Como já mencionado anteriormente, o programa utiliza o MRD para realização das rotinas de cálculo.

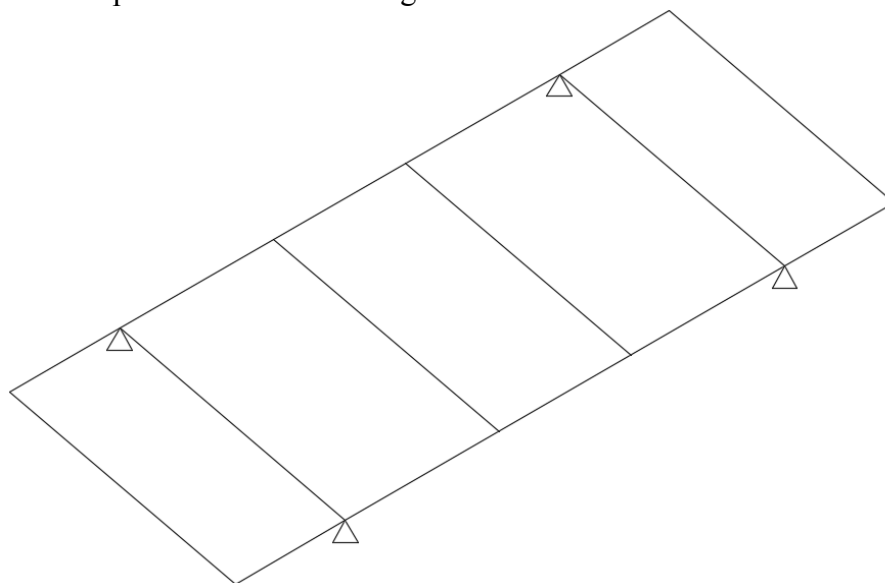
Na interface do FTOOL, foi preciso declarar as condições de apoio, as características geométricas e as propriedades do material. As condições de apoio foram caracterizadas por um apoio de segundo gênero e outro de primeiro gênero, nos quais a viga se apoia e se define como biapoada. As características geométricas e as propriedades do concreto armado que foram utilizadas já foram apresentadas nos capítulos 3.1 e 3.2.

Ao fim deste procedimento, foi possível obter os valores de momento fletor e esforço cortante oriundos da presença do peso próprio e da aplicação da carga móvel, combinados, ao final, para compor a envoltória de esforços.

3.4.2.2 Ponte representada como grelha de barras

Nesta etapa, a ponte é representada como uma grelha de barras, ou seja, as longarinas e as transversinas são dispostas como vigas que se apoiam umas nas outras de maneira a formar uma grelha, como apresentado na Figura 11. Este modelo também é bastante semelhante ao apresentado por Cremades (2015) em seu trabalho. A carga permanente e a carga móvel sobre ponte foram distribuídas sobre as barras da grelha, que recebem esse carregamento de forma linear.

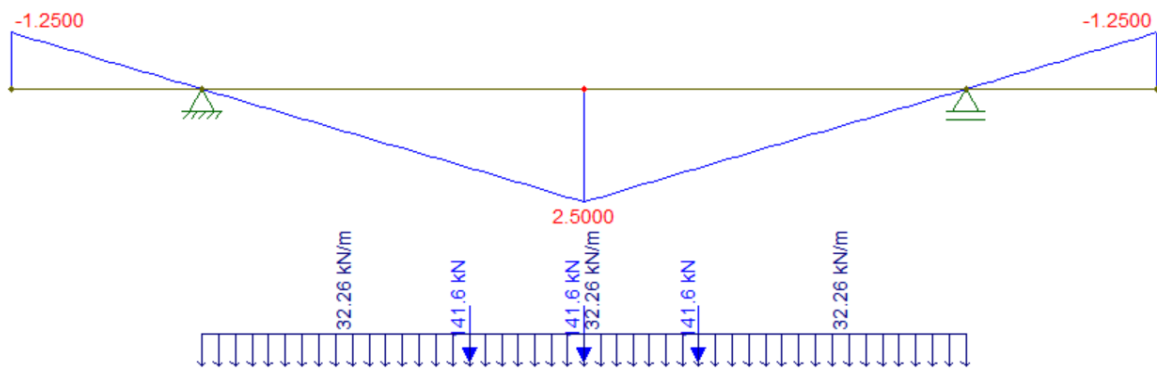
Figura 11 – Ponte representada como uma grelha de barras



Os esforços foram obtidos a partir de um software em linguagem *Fortran*, chamado GRELHA, que tem como base o MEF. O programa é capaz de analisar a ponte-modelo por completo como uma grelha de vigas, considerando a influência que cada elemento tem sobre o outro e a sua colaboração.

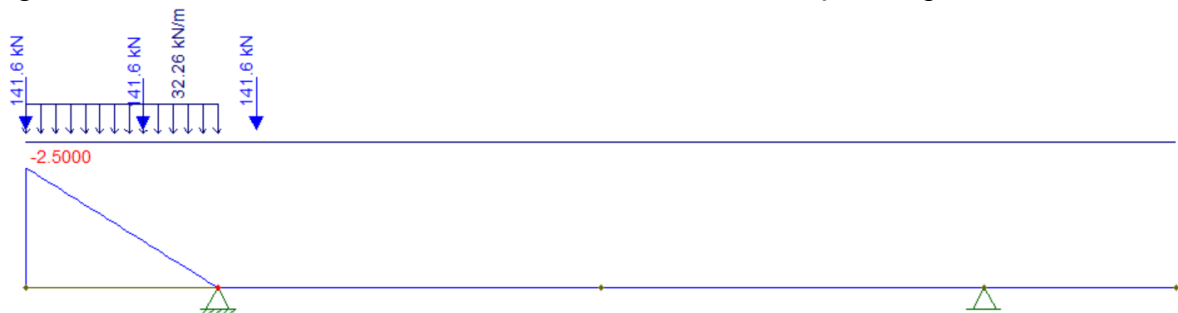
Visto que o software GRELHA não é capaz de reconhecer cargas móveis, estas devem ser inseridas como cargas estáticas nos posicionamentos mais desfavoráveis para cada seção. Devido a isso, foram analisadas somente as seções críticas (meio do vão, apoios e seções a 50 cm do apoio), já que é sabido que no meio vão acontece o momento fletor máximo positivo, nos apoios há momento fletor máximo negativo e nas proximidades dos apoios há esforço cortante máximo. Neste caso, foi preciso determinar as linhas de influência dessas seções de modo que fosse possível posicionar a carga móvel onde é gerado o esforço mais desfavorável. As figuras apresentadas a seguir mostram as linhas de influência de cada esforço referente a cada seção e onde ocorre o posicionamento desfavorável da carga móvel.

Figura 12 – Linha de influência de momento fletor referente à seção no meio do vão



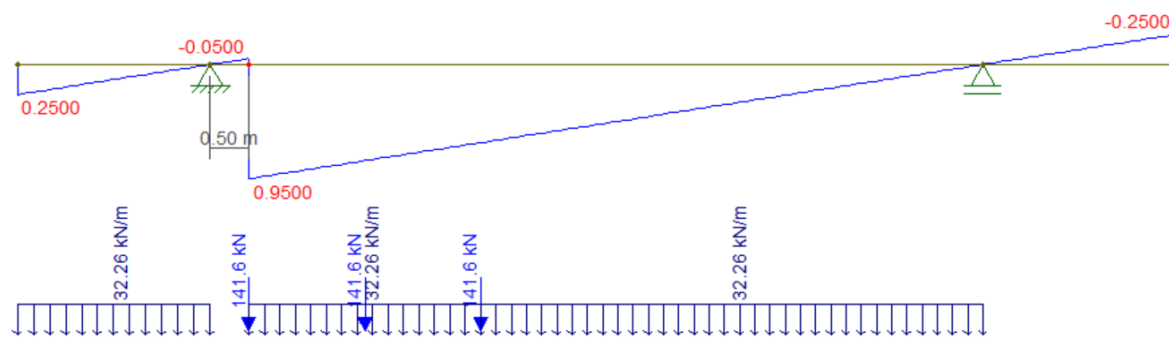
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 13 – Linha de influência de momento fletor referente à seção no apoio



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 14 – Linha de influência de esforço cortante referente à seção a 50 cm do apoio



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Vale ressaltar que, observando as linhas de influência exibidas anteriormente, a carga móvel deve ser aplicada somente na região de momento positivo para a seção do meio, desprezando o restante do diagrama, já que este faz parte do momento negativo. O mesmo deve ser feito para a seção do apoio, aplicando-se a carga somente na região de momento negativo. No caso da seção a 50 cm do apoio, aplica-se a carga na região negativa ou positiva que se apresentar mais desfavorável. Na Figura 14 apresentada, a carga seria aplicada somente na região de esforço cortante negativo.

Na interface do programa GRELHA, primeiramente, foram inseridos os dados de posicionamento dos nós da grelha no sistema de coordenadas cartesiano X-Y-Z. A grelha foi posicionada em um plano, e seu carregamento na direção perpendicular a este plano. Além disso, necessitou-se declarar os elementos de barra existentes, indicando quais eram os nós de cada extremidade.

Foi necessário então indicar os deslocamentos impedidos de todos os nós que possuam pelo menos um tipo de impedimento, seja de translação ou rotação. Os nós com movimentos impedidos são, em geral, os pontos de apoio das vigas sobre os pilares. O programa reconhece deslocamentos impedidos quando estes são caracterizados pelo número 1. O número 0 determina deslocamentos livres.

As propriedades do material necessárias para o funcionamento do GRELHA são o módulo de elasticidade e o módulo de elasticidade transversal, além de ser necessário também declarar as características geométricas das transversinas e das longarinas, as quais foram representadas como se tivessem a seção de meia ponte. As características geométricas utilizadas foram apresentadas nos capítulos 3.1 e 3.2.

O programa foi executado quatro vezes, de modo que os esforços obtidos de cada execução pudessem ser combinados com base nas Equações 5 e 6. A primeira execução foi

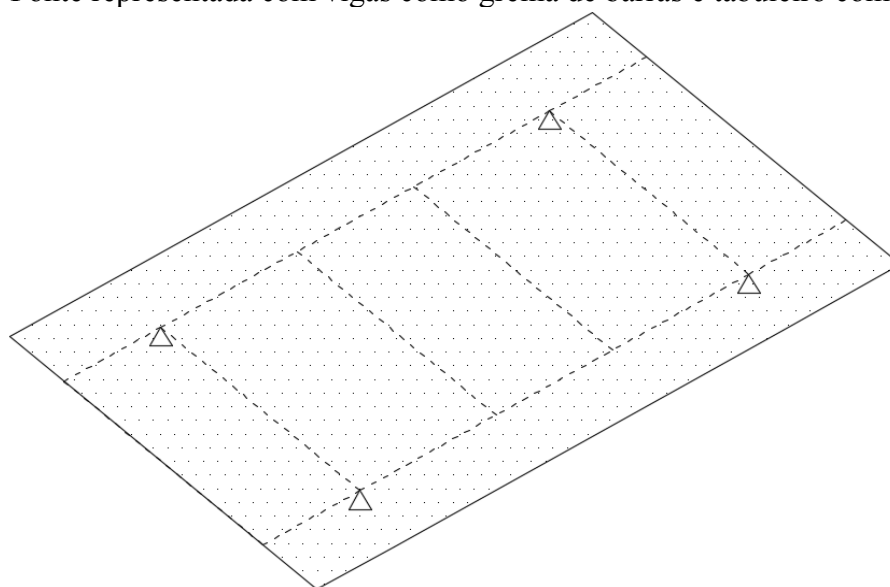
com a grelha recebendo o carregamento permanente, a segunda foi feita com a grelha recebendo apenas a carga móvel na posição que causa momento fletor positivo máximo, a terceira com a carga móvel onde ela causa momento fletor negativo máximo, e a última com a carga móvel na posição que gera o maior e mais representativo esforço cortante. Vale ressaltar que a carga móvel que representa veículo tipo foi aplicada somente em uma das longarinas, enquanto a carga móvel de multidão pôde ser aplicada em ambas longarinas. Isso é devido ao fato de haver somente um veículo tipo no TB-45, como é proposto pela NBR 7188 (2013).

Ao fim da realização desta etapa, foi possível obter os esforços máximos e mínimos de cálculo nas seções críticas especificadas.

3.4.3 Análise com modelos de placas e barras em conjunto

Nesta parte da análise, a ponte foi representada como se suas vigas constituíssem uma grelha de barras e a laje do tabuleiro fosse uma placa apoiada sobre esta grelha, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Ponte representada com vigas como grelha de barras e tabuleiro como placa



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Utilizando o software MIDAS, foi possível analisar a ponte-modelo pelo MEF, de modo que a grelha de vigas, a qual inclui as duas longarinas e as seis transversinas (considerando que as duas cortinas fossem também transversinas), fosse discretizada com

elementos finitos de barra e a laje do tabuleiro fosse discretizada com elementos finitos de placa.

Primeiramente, assim como foi feito nos outros softwares, no MIDAS também foram declaradas as características geométricas e as propriedades do material, apresentadas anteriormente nos capítulos 3.1 e 3.2.

Foi necessário, diversas vezes, declarar o grau de discretização dos elementos, visto que a análise com MEF necessita desse procedimento. A discretização foi definida com base no que foi apresentado anteriormente, no início do capítulo 3.4, dividindo, longitudinalmente, a ponte em seções onde acontecem os esforços críticos. Além disso, as condições de apoio das longarinas da ponte-modelo foram declaradas como de primeiro e segundo gênero.

Foram definidas, posteriormente, as características de atuação da carga móvel, que, no caso, é representada pelo trem-tipo TB-45. Foi necessário definir o tamanho das faixas de tráfego onde atua o trem-tipo para que o software pudesse calcular os esforços na longarina. Foram definidas diversas faixas de largura de 3 m devido às especificações padrões do programa, alinhadas longitudinalmente com a ponte. Essas faixas foram adicionadas sobre toda a extensão livre do tabuleiro, ou seja, sobre sua extensão descontando a largura dos guarda-rodas, de modo que a carga móvel distribuída de 5 kN/m² atuasse sobre toda a ponte. Foi declarado no programa que a carga distribuída de multidão poderia ocupar diversas faixas ao mesmo tempo e que a carga oriunda das rodas do veículo tipo ocuparia somente uma faixa por vez. Vale ressaltar que, no MIDAS, necessitou-se adaptar o carregamento móvel de acordo com as exigências da NBR 7188 (2013) para o trem tipo rodoviário brasileiro, visto que o programa não possui tal norma nas opções padrões.

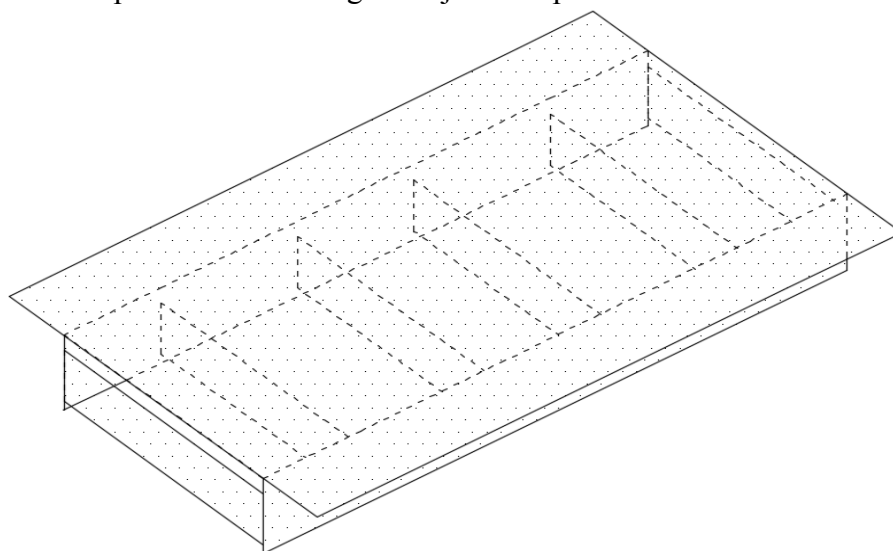
As cargas permanentes devido ao peso próprio, diferente de como funciona o software GRELHA, são aplicadas automaticamente quando se determina a geometria e as propriedades do concreto armado. Já as cargas permanentes devido ao revestimento e ao guarda-rodas devem ser incluídas à parte sobre as superfícies onde atuam. Ao fim desse processo, executou-se a rotina de cálculo pelo programa, de modo a obter os esforços nas seções determinadas.

3.4.4 Análise com modelo de placas somente

Nesta etapa de análise, a ponte foi modelada e analisada com todos os seus elementos estruturais, vigas (longarinas e transversinas) e laje do tabuleiro, representados

somente por elementos bidimensionais de placa. A Figura 16 a seguir apresenta a disposição desses elementos.

Figura 16 – Ponte representada com vigas e laje como placas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

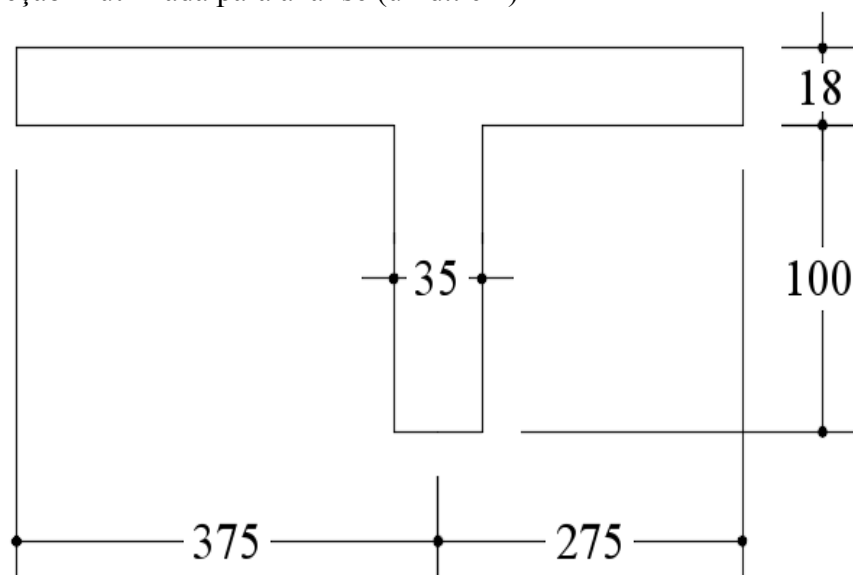
Também de posse do MIDAS e do MEF, pôde ser feita a discretização das vigas e do tabuleiro com elementos finitos de placa. A discretização desta etapa também seguiu o padrão de seções que gerem os esforços críticos. As rotinas de cálculo realizadas são, em geral, semelhantes às do procedimento anterior. Entretanto, a diferença primordial é que as vigas da ponte-modelo são declaradas no programa como elementos de placa em vez de elementos de barra.

Cabe mencionar que, nessa etapa, foi preciso fazer o reposicionamento dos apoios. Até então, como as vigas eram consideradas elementos unidimensionais, não havia influência da posição do apoio no que diz respeito à altura da viga. Visto que, nessa fase de análise, as vigas são consideradas com natureza bidimensional, torna-se necessário declarar as condições de apoio em nós suficientemente representativos. Determinou-se então que os apoios se localizam imediatamente abaixo da base das longarinas.

Além disso, devido à análise dos elementos como placas, é necessário considerar a existência de uma união monolítica nos pontos de encontro da longarina com o tabuleiro. É interessante, portanto, que o cálculo de esforços seja realizado com a viga representada por uma seção T, considerando a existência da colaboração dos dois elementos e uma situação mais próxima da realidade.

Apesar das diversas especificações estabelecidas pela NBR 6118 (2014), a seção T foi determinada com base na colaboração de metade da largura da ponte. Visto que essa norma propõe simplificações para a determinação dessa seção e que o intuito desta etapa foi analisar de forma integral e refinada a ponte com os elementos de placa, foi determinado que a seção T teria mesa colaborante que iria da extremidade do balanço até o meio da ponte. Sabendo que 7 cm de espessura do tabuleiro são devidos ao revestimento, a seção T de concreto armado resultou na mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Seção T utilizada para análise (unid.: cm)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Visto que o MIDAS não fornece os esforços finais na seção T, mas sim as forças e os momentos na placa do tabuleiro e na placa da longarina separadamente, foi necessário fazer o somatório de momentos no centro de gravidade da longarina. Para isso, levou-se em conta o braço de alavanca da força atuante no eixo do tabuleiro e os momentos já conhecidos na viga e na laje do tabuleiro. Para a obtenção do cortante, foi feito o somatório de forças verticais atuantes nas faces do tabuleiro e da viga.

Vale ressaltar que o MIDAS também não fornece as forças e os momentos nos elementos de placa oriundos das cargas móveis declaradas no programa. Devido a isso, foi necessário aplicar as cargas móveis separadamente como cargas estáticas nas regiões mais desfavoráveis para cada seção crítica. Ou seja, foi realizado exatamente o mesmo processo da análise com grelha de barras no software GRELHA, com base nas mesmas linhas de influência apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14.

3.5 Comparativo dos resultados dos modelos

A partir dos resultados de esforços obtidos em cada análise anteriormente mencionada, foi possível fazer a avaliação das diferenças existentes entre elas, de modo a verificar se os modelos escolhidos para representação da ponte-modelo geram resultados próximos entre si e, assim, poder verificar a validade de cada um desses modelos com barras e placas mencionados de acordo com o efetivo comportamento da estrutura.

Para os modelos simplificado e com barra única, pôde-se obter uma envoltória de esforços nas seções distantes 1,25 m entre si. Já entre os modelos de grelha de barras, grelha de barras e placa, placas, e os outros dois mencionados, foi possível fazer o comparativo dos esforços nas seções críticas já estabelecidas.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do modelo simplificado

De acordo com o procedimento relatado no capítulo 3.4.1 e a discretização apresentada na Figura 8, com seções distantes 1,25 m entre si, foi possível obter esforços característicos em cada uma dessas seções, e, assim, encontrar, a partir da combinação última desfavorável já apresentada, os esforços de cálculo finais atuando sobre a viga representativa da ponte.

A Tabela 4 a seguir apresenta os valores de momento fletor máximos e mínimos de cálculo em cada uma das seções estabelecidas. Tais valores são passíveis de compor a envoltória de esforços de cálculo da viga que representa a ponte-modelo nessa etapa de análise.

Tabela 4 – Momentos fletores de cálculo (após combinação) devido ao modelo simplificado

MOMENTO FLETOR		
SEÇÃO	Md+ (kNm)	Md- (kNm)
1	0,0	0,0
2	-64,0	-495,9
3	-208,9	-1489,8
3-50 cm	422,8	-1260,6
4	1269,2	-984,3
5	2340,2	-632,9
6	2978,4	-367,2
7	3218,4	-201,1
8	2978,4	-367,2
9	2340,2	-632,9
10	1269,2	-984,3
11-50 cm	422,8	-1260,6
11	-208,9	-1489,8
12	-64,0	-495,9
13	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Vale ressaltar que as seções 3-50 cm e 11-50 cm representam a seção a 50 cm de distância do apoio, utilizada como seção crítica para o esforço cortante. Deve-se destacar também, para efeitos de adequada compreensão, que, quando é comentado acerca de valores máximos e mínimos, entende-se que valores máximos são os mais positivos e mínimos são os mais negativos.

A Tabela 5, indicada a seguir, traz os valores de esforço cortante máximos e mínimos de cálculo em cada uma das seções da Figura 8. Os valores apresentados são os que compõem a envoltória de esforços de cálculo da ponte-modelo.

Tabela 5 – Esforços cortantes de cálculo (após combinação) devido ao modelo simplificado

ESFORÇO CORTANTE		
SEÇÃO	Vd+ (kN)	Vd- (kN)
1	-18,8	-312,2
2	-83,6	-481,3
3e	-148,4	-937,1
3d	1453,5	157,3
3-50 cm	1343,7	130,5
4	1182,0	87,4
5	920,6	7,3
6	644,1	-195,2
7	403,2	-403,2
8	195,2	-644,1
9	-7,3	-920,6
10	-87,4	-1182,0
11-50 cm	-130,5	-1343,7
11e	-157,3	-1453,5
11d	937,1	148,4
12	481,3	83,6
13	312,2	18,8

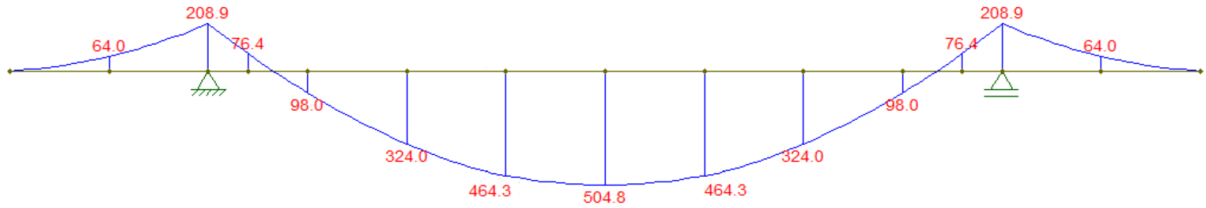
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

No caso da tabela de esforço cortante, as seções 3 e 11, seções do apoio, são divididas em esquerda e direita devido à existência de dois valores de esforço cortante nesse mesmo ponto. Como existe uma carga concentrada de reação do apoio, o valor se torna diferente entre a seção imediatamente à esquerda e a seção imediatamente à direita.

4.2 Resultados do modelo de barra única

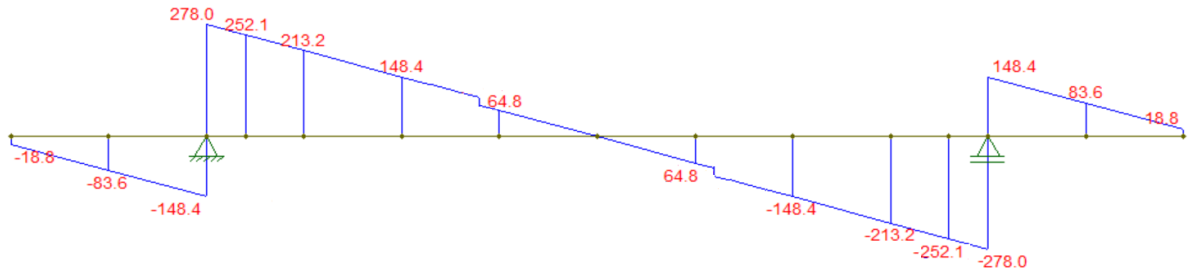
Assim como o modelo anterior, com base na discretização da Figura 8, obteve-se os esforços máximos e mínimos em cada uma das seções da viga representativa da ponte-modelo. Devido ao uso do software FTOOL, foi possível obter a representação dos diagramas de momento fletor e esforço cortante característicos devido à carga permanente, bem como das envoltórias desses esforços devido à carga móvel. As Figuras 18, 19, 20 e 21 a seguir trazem essas representações.

Figura 18 – Diagrama de momento fletor característico devido ao carregamento permanente (valores em kNm)



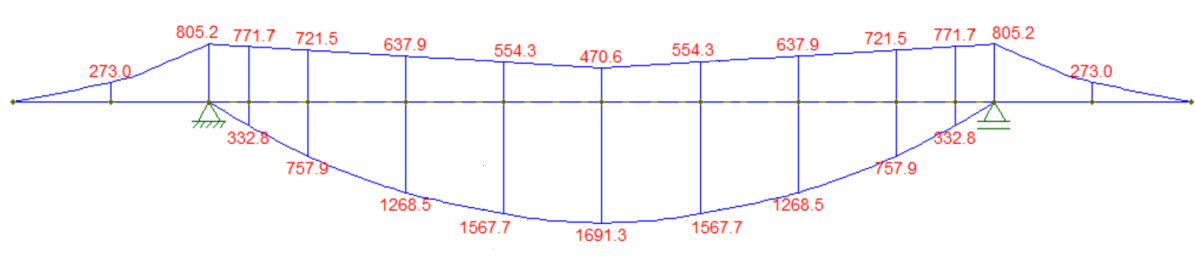
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 19 – Diagrama de esforço cortante característico devido ao carregamento permanente (valores em kN)



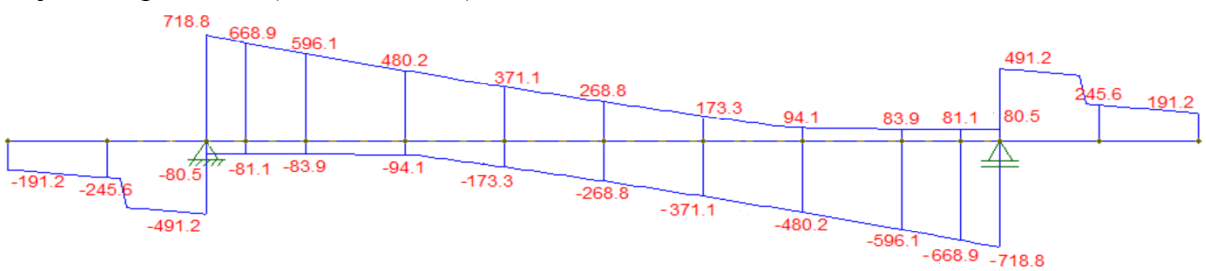
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 20 – Envoltória de momentos fletores característicos devido à carga móvel – já majorados pelo CIV (valores em kNm)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 21 – Envoltória de esforços cortantes característicos devido à carga móvel – já majorados pelo CIV (valores em kN)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

As Tabelas 6 e 7 apresentam os esforços máximos e mínimos de cálculo que compõem a envoltória de esforços da viga que representa a ponte-modelo, e seguem a mesma disposição das tabelas do modelo anterior, mostradas no capítulo 4.1.

Tabela 6 – Momentos fletores de cálculo (após combinação) devido ao modelo de barra única

MOMENTO FLETOR		
SEÇÃO	Md+ (kNm)	Md- (kNm)
1	0,0	0,0
2	-64,0	-495,9
3	-208,9	-1489,8
3-50 cm	422,8	-1260,6
4	1269,1	-984,3
5	2340,1	-632,8
6	2978,3	-367,2
7	3218,5	-201,1
8	2978,3	-367,2
9	2340,1	-632,8
10	1269,1	-984,3
11-50 cm	422,8	-1260,6
11	-208,9	-1489,8
12	-64,0	-495,9
13	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Tabela 7 – Esforços cortantes de cálculo (após combinação) devido ao modelo de barra única

ESFORÇO CORTANTE		
SEÇÃO	Vd+ (kN)	Vd- (kN)
1	-18,8	-312,1
2	-83,6	-481,2
3e	-148,4	-937,1
3d	1453,5	157,3
3-50 cm	1343,7	130,5
4	1182,0	87,3
5	920,6	7,3
6	644,2	-195,1
7	403,2	-403,2
8	195,1	-644,2
9	-7,3	-920,6
10	-87,3	-1182,0
11-50 cm	-130,5	-1343,7
11e	-157,3	-1453,5
11d	937,1	148,4
12	481,2	83,6
13	312,1	18,8

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

4.3 Resultados do modelo de grelha de barras

Devido à sistemática do software GRELHA, foi possível obter somente os esforços atuantes nas seções críticas, conforme a discretização apresentada na Figura 9. A seguir, na Tabela 8, são apresentados os momentos fletores e os esforços cortantes de cálculo obtidos após análise dessas seções pelo MEF, com o auxílio do programa GRELHA.

Tabela 8 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de grelha de barras

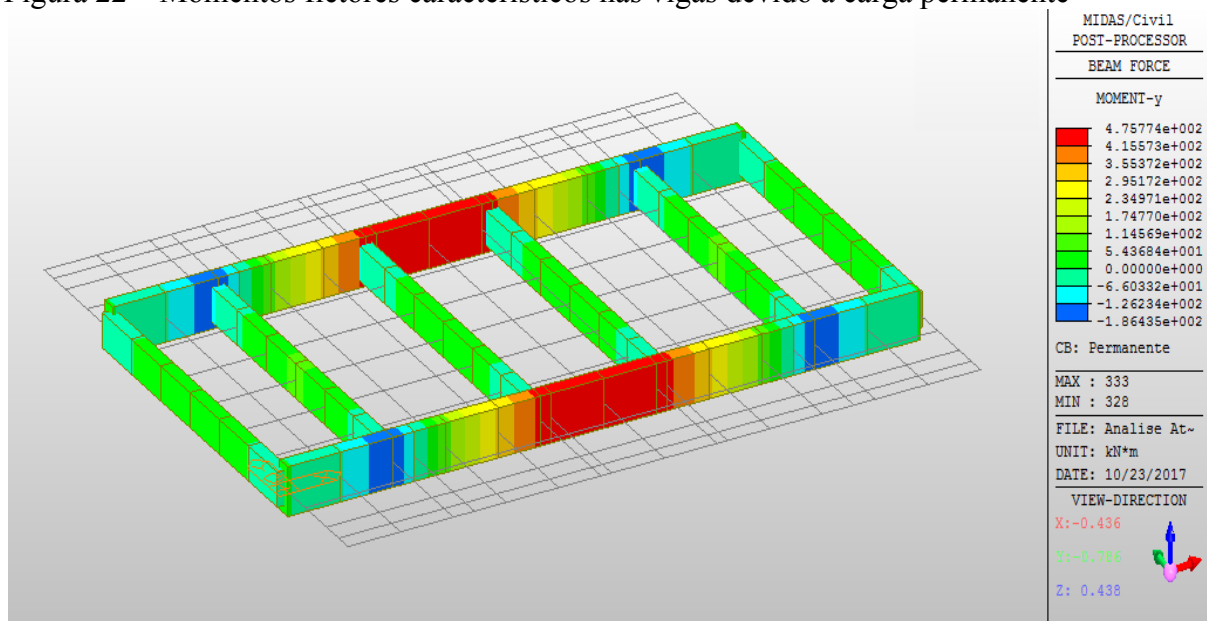
MOMENTO FLETOR		
SEÇÃO	Md+ (kNm)	Md- (kNm)
Meio do vão	3219,7	-
Apoio	-	-1492,9
ESFORÇO CORTANTE		
SEÇÃO	Vd+ (kN)	Vd- (kN)
Apoio-50 cm	1344,9	-1344,9

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

4.4 Resultados do modelo de grelha de barras e placa

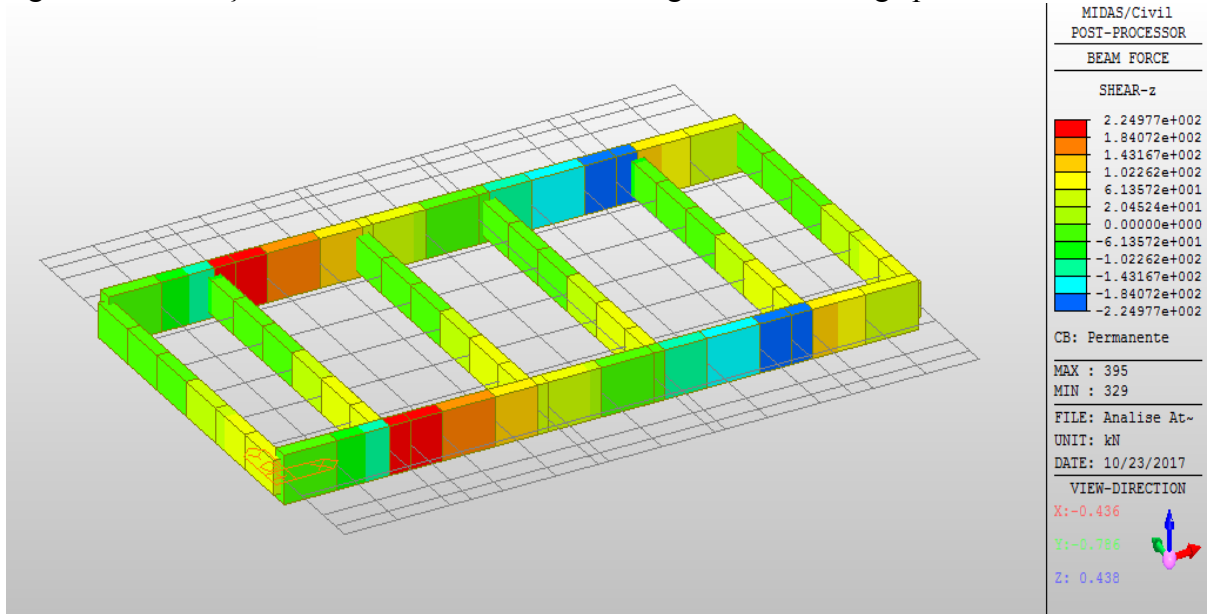
Nesta etapa, também com base na discretização proposta na Figura 9 e com base no uso do MEF, facilitado pelo software MIDAS, foi possível obter os esforços característicos atuantes nas vigas. As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam a disposição desses esforços.

Figura 22 – Momentos fletores característicos nas vigas devido à carga permanente



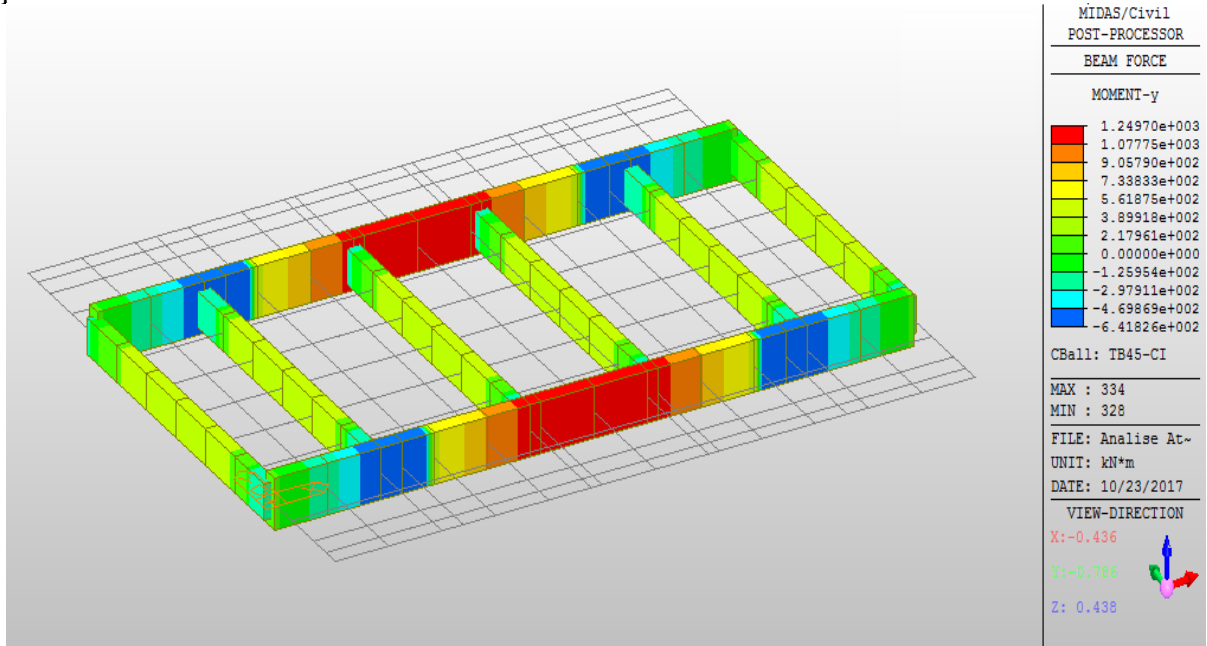
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 23 – Esforços cortantes característicos nas vigas devido à carga permanente



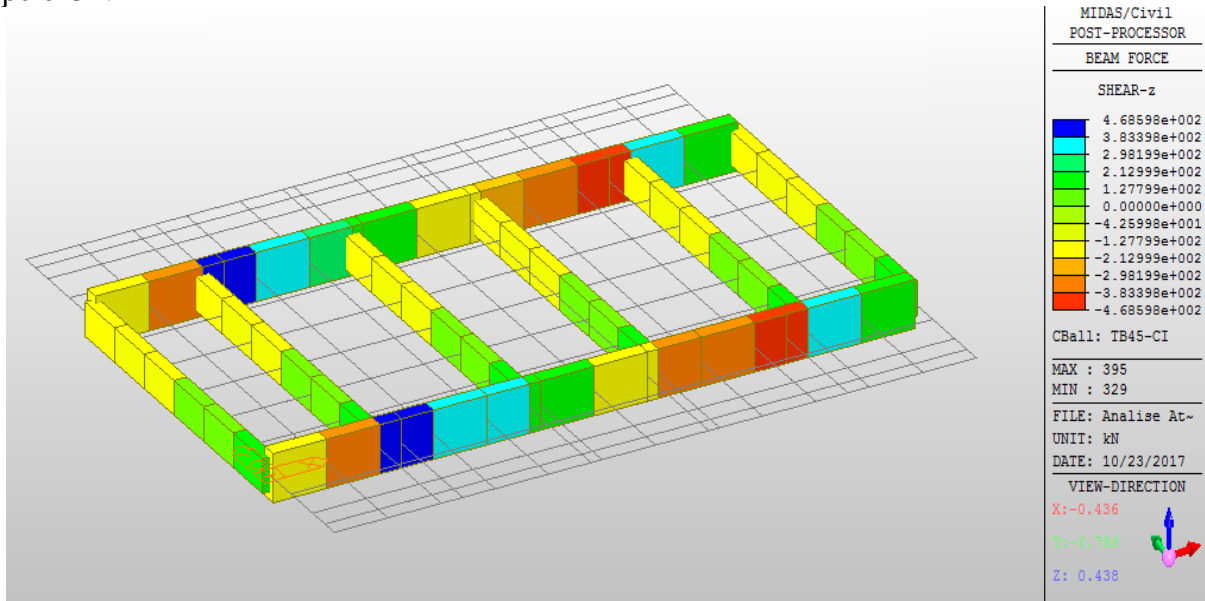
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 24 – Momentos fletores característicos nas vigas devido à carga móvel – já majorados pelo CIV



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 25 – Esforços cortantes característicos nas vigas devido à carga móvel – já majorados pelo CIV



Fonte: Elaborado pela autor (2017)

Ressalta-se que, nas quatro figuras apresentadas anteriormente, as vigas se apresentam de forma tridimensional apenas por motivos de visualização da forma do elemento, longarina ou transversina, que cada barra representa. O cálculo, na verdade, foi todo executado com elementos unidimensionais de barra. Cabe mencionar que as imagens do programa mostram o pior carregamento possível em cada um de seus elementos, exibindo os esforços máximos e mínimos que podem ocorrer nos mesmos. Entretanto, deve-se compreender que, apesar de ser mostrado dessa forma nas Figuras 24 e 25, tais esforços não acontecem ao mesmo tempo nas duas longarinas, visto que o veículo padrão do trem tipo é único e ocupa uma única posição sobre a ponte.

Com os resultados de momento fletor e esforço cortante apresentados nas figuras anteriores, foram calculados os esforços de cálculo nas seções críticas, mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de grelha de barras e placa

MOMENTO FLETOR		
SEÇÃO	Md+ (kNm)	Md- (kNm)
Meio do vão	2516,8	-
Apoio	-	-1214,4
ESFORÇO CORTANTE		
SEÇÃO	Vd+ (kN)	Vd- (kN)
Apoio-50 cm	1000,7	-1000,7

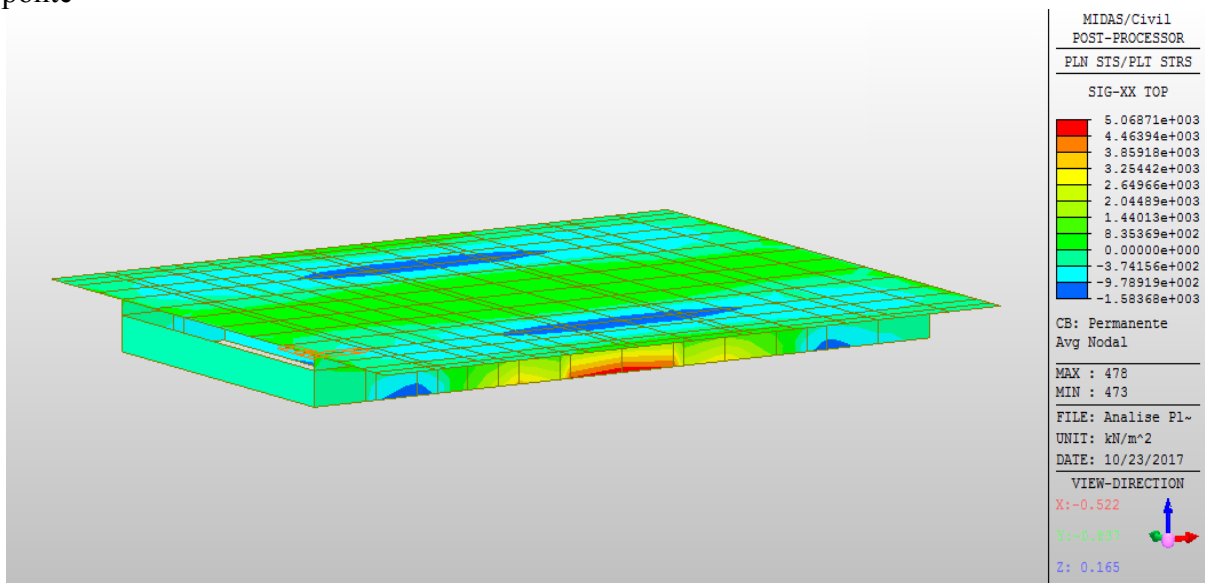
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

4.5 Resultados do modelo de placas

Como já mencionado anteriormente no capítulo 3.4.4, o MIDAS, programa que auxiliou nesta etapa de análise, não fornece momentos fletores e esforços cortantes finais na seção T da ponte necessária para análise. Devido a isso, foi possível obter imagens adequadas e representativas somente das tensões atuantes nos elementos de placa devido à carga permanente dos elementos.

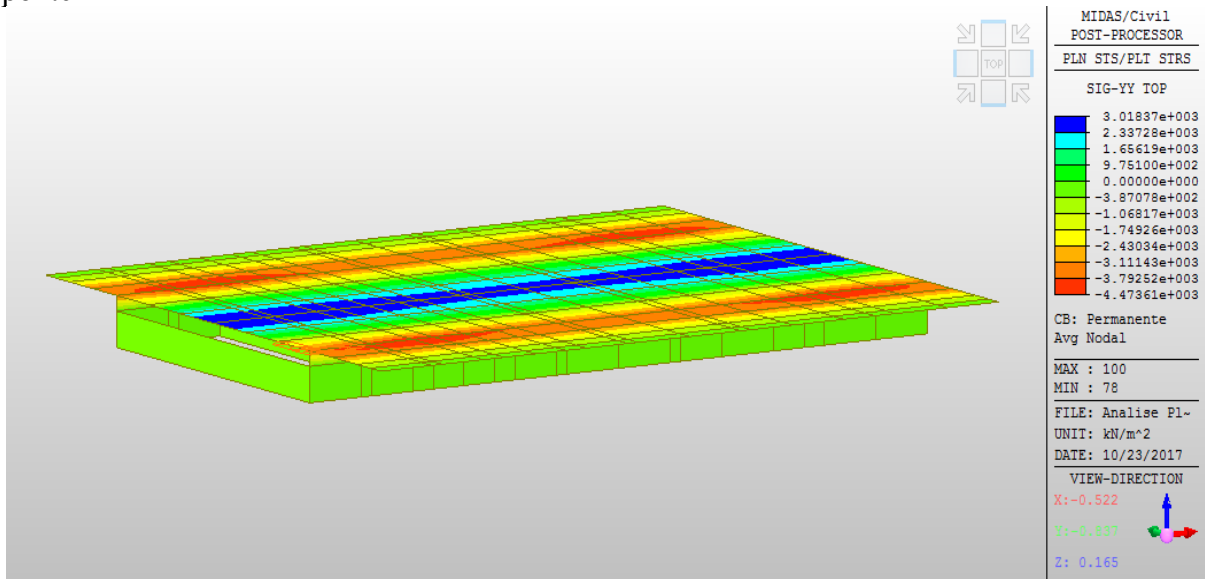
As Figuras 26 e 27 a seguir apresentam essas tensões atuando no tabuleiro, nas longarinas e nas transversinas, nos sentidos longitudinal e transversal da ponte, representados pelos eixos XX e YY, respectivamente. Apesar de não fornecerem os valores dos esforços de análise necessários diretamente, as figuras são úteis para visualização global do comportamento da estrutura completa sob ação do carregamento permanente.

Figura 26 – Tensões atuantes nas placas devido à carga permanente no sentido longitudinal da ponte



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 27 – Tensões atuantes nas placas devido à carga permanente no sentido transversal da ponte



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Da mesma maneira que o modelo de grelha de barras e o modelo de grelha de barras e placa, foi possível obter os esforços de cálculo nas seções críticas, estabelecidas de acordo com a Figura 9 apresentada anteriormente. Tais valores são mostrados logo a seguir na Tabela 10.

Tabela 10 – Esforços de cálculo (após combinação) devido ao modelo de placas

MOMENTO FLETOR		
SEÇÃO	Md+ (kNm)	Md- (kNm)
Meio do vão	3432,9	-
Apoio	-	-1561,9
ESFORÇO CORTANTE		
SEÇÃO	Vd+ (kN)	Vd- (kN)
Apoio-50 cm	1314,7	-1314,7

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Cabe mencionar que, nas Tabelas 8, 9 e 10, foram apresentados os momentos fletores e os esforços cortantes de cálculo máximos e mínimos (mais positivos e mais negativos, respectivamente) para as seções críticas no meio do vão (cuja numeração na Figura 9 é 4), sobre o apoio (cuja numeração é 2 e/ou 6) e a 50 cm de distância do apoio (cuja numeração é 3 e/ou 5).

4.6 Discussão e análise comparativa dos resultados

Para a realização da análise comparativa, tomou-se os esforços característicos das seções consideradas críticas de cada uma das análises anteriores, além das combinações desses esforços, baseadas na combinação última apresentada na Equação 5, mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas

-	SIMPL.	FTOOL	GRELHA	MIDAS B+P	MIDAS P
Mg+ (kNm)	504,8	504,8	505,7	475,8	584,1
Mg- (kNm)	-208,9	-208,9	-211,2	-186,4	-230,1
Vg-50 cm (kN)	252,1	252,1	253,0	220,6	266,8
Mq+ (kNm)	1691,3	1691,3	1691,3	1249,7	1762,9
Mq- (kNm)	-805,2	-805,2	-805,2	-641,8	-834,2
Vq-50 cm (kN)	668,9	668,9	668,9	468,6	636,4
Comb M+ (kNm)	3218,4	3218,5	3219,7	2516,8	3432,9
Comb M- (kNm)	-1489,8	-1489,8	-1492,9	-1214,4	-1561,9
Comb V (kN)	1343,7	1343,7	1344,9	1000,7	1314,7

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Onde: Mg+ – momento máximo positivo no meio do vão devido à carga permanente;

Mg- – momento máximo negativo no apoio devido à carga permanente;

Vg-50 cm – esforço cortante máximo a 50 cm do apoio devido à carga permanente;

Mq+ – momento máximo positivo no meio do vão devido à carga móvel;

Mq- – momento máximo negativo no apoio devido à carga móvel;

Vq-50 cm – esforço cortante máximo na seção a 50 cm do apoio devido à carga móvel;

SIMPL. – modelo simplificado;

FTOOL – modelo de barra única analisado com auxílio do FTOOL;

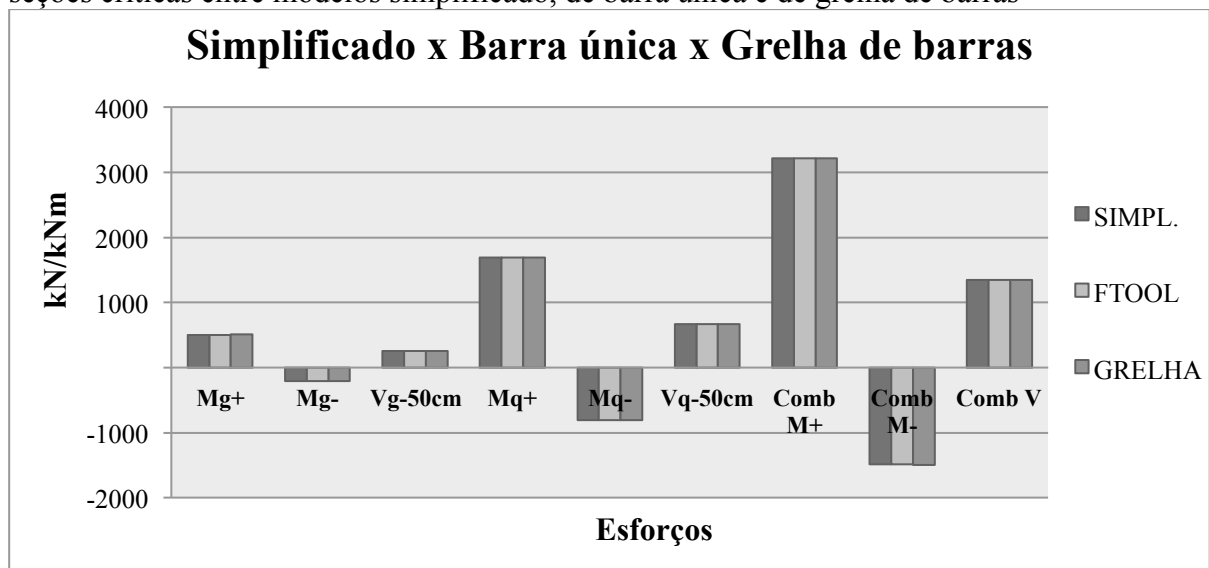
GRELHA – modelo de grelha de barras analisado com auxílio do GRELHA;

MIDAS B+P – modelo de grelha de barras e placa analisado com auxílio do MIDAS;

MIDAS P – modelo somente de placas analisado com auxílio do MIDAS.

A diferença entre o modelo simplificado, o modelo de barra única e o modelo de grelha de barras teve sua maior incidência no momento fletor negativo sobre o apoio devido à carga permanente, onde foi de 1,1% a maior diferença entre os momentos característicos e 0,2% a maior diferença entre os momentos combinados de cálculo. O Gráfico 1 a seguir exibe que essa pequena discrepância apresentada entre os valores obtidos com os três modelos pode ser considerada praticamente nula. Acredita-se, com base nessa análise, que essa pequena diferença deveu-se, primordialmente, a aproximações realizadas durante as rotinas de cálculo uma vez que a maioria dos resultados apresentaram diferenças somente nos decimais ou não apresentaram diferença alguma. Tal fato sugere que há uma compatibilidade entre o modelos comparados.

Gráfico 1 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelos simplificado, de barra única e de grelha de barras



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

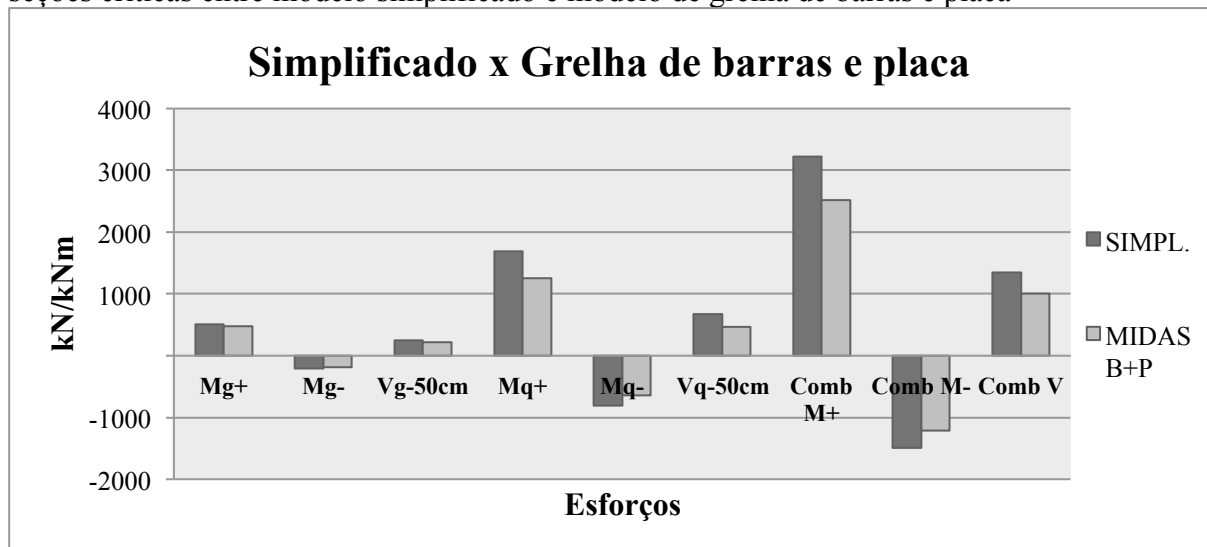
Percebe-se também que houve uma redução nos valores de todos os esforços quando estes são obtidos a partir do modelo de barras e placa. Supõe-se que isso ocorra devido ao refinamento incluso nesse modelo que não existe nos outros, já que o modelo passa a considerar a laje do tabuleiro como placa e, assim, sua influência no comportamento das longarinas. A Tabela 12 exibe que a maior redução é de 29,9% no caso do esforço cortante a 50 cm do apoio devido à carga móvel. Diferente dos três modelos anteriores, onde os valores de momento fletor negativo apresentaram maior discrepância entre si, nesse caso, a diferença obtida no que diz respeito a esse esforço está entre as de menor valor. O Gráfico 2 a seguir traz essa diferença de forma ilustrativa.

Tabela 12 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de grelha de barras e placa

-	SIMPL.	MIDAS B+P	%
Mg+	504,8	475,8	-5,7
Mg-	-208,9	-186,4	-10,8
Vg-50 cm	252,1	220,6	-12,5
Mq+	1691,3	1249,7	-26,1
Mq-	-805,2	-641,8	-20,3
Vq-50 cm	668,9	468,6	-29,9
Comb M+	3218,4	2516,8	-21,8
Comb M-	-1489,8	-1214,4	-18,5
Comb V	1343,7	1000,7	-25,5

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Gráfico 2 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de grelha de barras e placa



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Intuitivamente, espera-se que, com o refinamento da modelagem da estrutura, os resultados finais de esforços sejam sempre menores, quando comparados a modelagens mais simplificadas. Espera-se que esse refinamento forneça resultados que se aproximem mais do comportamento real da estrutura, visto que o tratamento dos elementos de maneira bidimensional se assemelha mais à natureza dos mesmos. Tal fato leva em consideração a rigidez de um elemento bidimensional, o que explica a obtenção de resultados sempre menores, visto que as efetivas dimensões do elemento estrutural contribuem para aumentar a sua capacidade resistente.

Entretanto, percebe-se que, ao contrário do que é esperado, os resultados obtidos com o modelo que considera todos os elementos bidimensionais, ou seja, como placas, se

mostraram maiores que os outros modelos. A Tabela 13 mostra que, ao invés de resultar em valores menores que o modelo de barras e placa, o modelo de placas resultou em resultados pelo menos 20,9% maiores, chegando a ser 41,1% maiores, que este modelo. No caso da Tabela 14, é mostrado que os resultados com apenas placas se mostraram maiores inclusive que o modelo simplificado, com um aumento máximo de 15,7%, com exceção do esforço cortante característico oriundo da carga móvel, que apresentou uma redução de 4,9%. Devido a essa redução do valor do cortante característico, o esforço cortante de cálculo, após a combinação desfavorável, também apresentou uma redução, sendo esta de 2,2%. O Gráfico 3 adiante ilustra, de maneira sucinta e ilustrativa, esse aumento nos esforços ocasionado com o uso do modelo de placas em relação aos esforços oriundos da aplicação dos outros dois modelos.

Tabela 13 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo de grelha de barras e placa e modelo de placas

-	MIDAS B+P	MIDAS P	%
Mg+	475,8	584,1	22,8
Mg-	-186,4	-230,1	23,4
Vg-50 cm	220,6	266,8	20,9
Mq+	1249,7	1762,9	41,1
Mq-	-641,8	-834,2	30,0
Vq-50 cm	468,6	636,4	35,8
Comb M+	2516,8	3432,9	36,4
Comb M-	-1214,4	-1561,9	28,6
Comb V	1000,7	1314,7	31,4

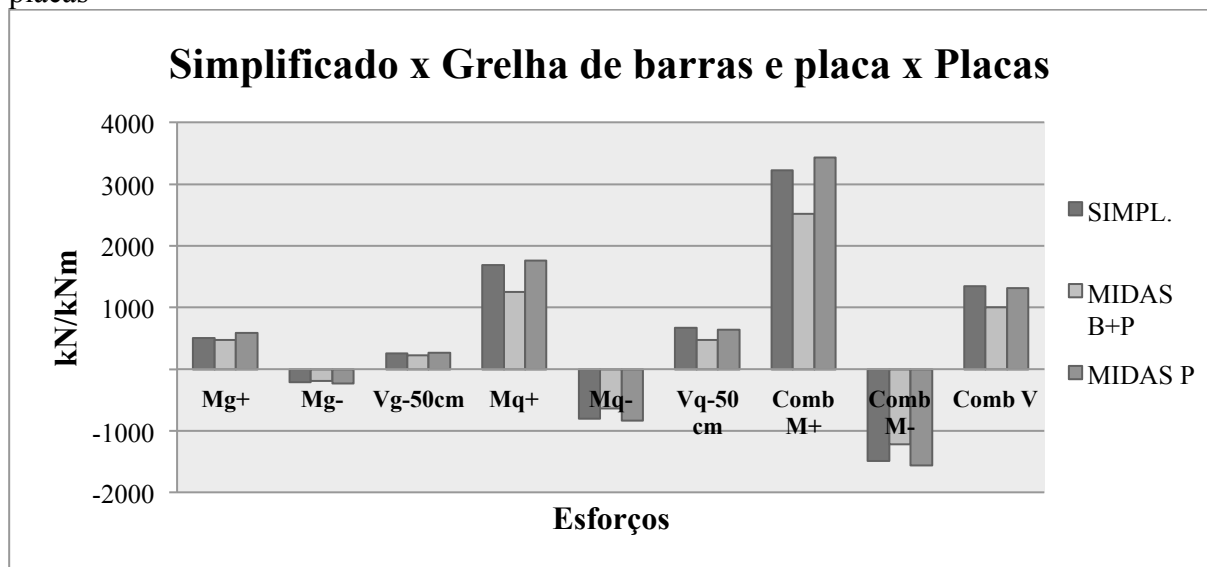
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Tabela 14 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado e modelo de placas

-	SIMPL.	MIDAS P	%
Mg+	504,8	584,1	15,7
Mg-	-208,9	-230,1	10,1
Vg-50 cm	252,1	266,8	5,8
Mq+	1691,3	1762,9	4,2
Mq-	-805,2	-834,2	3,6
Vq-50 cm	668,9	636,4	-4,9
Comb M+	3218,4	3432,9	6,7
Comb M-	-1489,8	-1561,9	4,8
Comb V	1343,7	1314,7	-2,2

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Gráfico 3 – Comparativo de esforços característicos e de cálculo (após combinação) nas seções críticas entre modelo simplificado, modelo de grelha de barras e placa e modelo de placas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Acerca desse aumento nos esforços, acredita-se que tal aumento deveu-se à consideração da seção T até metade da largura da ponte em vez da largura correspondente à distância entre os momentos fletores negativos proposta pela NBR 6118 (2014). O uso de metade da largura da ponte, ou seja, as efetivas dimensões dos elementos, se deve à necessidade de considerar a máxima largura colaborante para efeitos de análise de modelagem. Tal fato pode ter levado em consideração um excesso de carga que talvez não influenciasse significativamente nos esforços atuantes na longarina e, portanto, não tivesse necessidade de ser contabilizada.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho apresentado teve como objetivo principal analisar uma ponte rodoviária considerando diferentes modelagens de seus elementos estruturais, utilizando elementos finitos de barra, de placa e de ambos em conjunto.

Foi possível perceber, por meio da elaboração da revisão bibliográfica, a existência de análises de diversos tipos de modelagem de pontes para diferentes fins e em diferentes situações de carregamento. No entanto, poucas análises comparativas entre esses modelos foram encontradas. A realização de um comparativo é conveniente pois pode fornecer conclusões acerca das melhores adequações de cada modelo.

De maneira geral, é fácil perceber que todos os modelos apresentados são compatíveis entre si. Conclui-se também que os modelos simplificados são suficientemente representativos, visto que as diferenças obtidas com relação aos modelos mais complexos não tiveram uma elevada discrepância. Apesar da existência de modelos sofisticados, é interessante saber que modelos simplificados são plausíveis de serem usados de maneira recorrente como uma saída que pode dar boa representatividade ao comportamento da estrutura.

Modelos simplificados são preferíveis uma vez que são de fácil controle e permitem um melhor entendimento do seu funcionamento por quem está analisando a estrutura, dando segurança a quem os utiliza. Acredita-se que a tendência seja que esses modelos continuem sendo utilizados como ferramenta de estudo de estruturas de concreto armado, pois os erros são pequenos e levam a resultados a favor da segurança.

Os modelos com inclusão de elementos de placa, que utilizam métodos mais sofisticados de análise como o MEF, apesar de gerarem resultados econômicos e refinados, são, na maioria das vezes, de difícil acesso, manuseio e domínio de quem os manipula, sendo muitas vezes pouco entendido quando analisado. Como é considerada a colaboração de todos os elementos constituintes da estrutura, pode ocorrer de surgir resultados de esforços que vão além do entendimento.

Por fim, sugere-se, para trabalhos futuros, estudos de outras seções e outros modelos de análise de pontes, com o intuito de avaliar os resultados obtidos e validá-los com o uso das variadas ferramentas computacionais existentes.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. A. A. **Implementação de elementos finitos de barra e placa para a análise da distribuição de esforços em tabuleiros de pontes por meio de superfícies de influência**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ALVES E. V.; ALMEIDA S. M. F.; JUDICE F. M. S. Métodos de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido. **Engevista**, Niterói, v. 6, p. 48-58, ago. 2004
- ASSAN, Aloisio E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto-Portugal, 2003.
- BESSA, W. M.; SILVA, F. R. Modelagem da interação dinâmica entre estruturas de placa e subsistemas mecânicos em movimento. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2000, Natal. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Rio de Janeiro: IME, 2000.
- CREMADES, Salvador M. **Ingeniería de puentes: análisis estructural**. Valência: Editorial Universitat Politècnica de València, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 109**: Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário – Projeto de barreiras de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.
- EL DEBS, Mounir K.; TAKEYA, Toshiaki. **Introdução às pontes de concreto**. São Carlos, 2007. (Texto de apoio à disciplina SET).
- GAVIOLI, E. R. **Análise de tabuleiros de pontes formados por elementos pré-moldados mediante método da grelha: recomendações de projeto e comparações dos valores teóricos com experimentais**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LEONHARDT, Fritz. **Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto**. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. 6 v.

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. São Paulo: Blucher, 2008.

NÉIA T. A. L. C.; LOPES E. B.; ARAÚJO A. L. B. A.; DOMINGUES A. B.; RÉUS G. C. Análise de modelagem computacional em obra de arte especial de concreto armado com assimetria. **Concreto e Construções**, São Paulo, v. 80, p. 84-91, out. 2004

PFEIL, Walter. **Pontes em concreto armado**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1979.

ROSSIGALI, C. E. **Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SAMPAIO, R. A. C.; SOUZA, R. M.; BENTES, J. L.; LAURINDO, C. F. Modelagem por elementos finitos para a análise modal de uma ponte ferroviária protendida. *In*: III CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2010, Rio de Janeiro. **Anais do III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. Rio de Janeiro: IABSE, 2010. p. 6-11.