

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Raphael Alfredo Diniz Rocha

**ANÁLISE DE TABULEIROS DE PONTE: COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS
CAUSADOS POR UM VEÍCULO REAL E O VEÍCULO NORMATIVO**

**Alegrete
2017**

Raphael Alfredo Diniz Rocha

**ANÁLISE DE TABULEIROS DE PONTE: COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS
CAUSADOS POR UM VEÍCULO REAL E O VEÍCULO NORMATIVO**

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

Orientador: Alisson Simonetti Milani.

Coorientador: André Lübeck.

**Alegrete
2017**

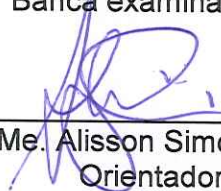
Raphael Alfredo Diniz Rocha

ANÁLISE DE TABULEIROS DE PONTE: COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS CAUSADOS POR UM VEÍCULO REAL E O VEÍCULO NORMATIVO.

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, Junho de 2017.

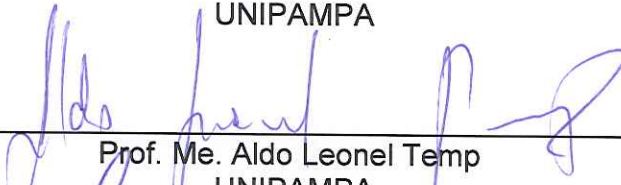
Banca examinadora:



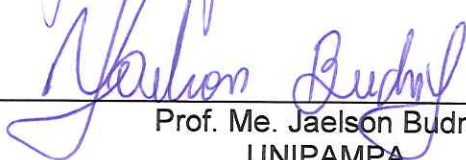
Prof. Me. Alisson Simonetti Milani
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. André Lübeck
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
UNIPAMPA



Prof. Me. Jaelson Budny
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a Deus por ter me proporcionado meus pais, Jesus e Joana e minhas irmãs, Jéssica e Juliana, que me apoiaram na minha formação.

AGRADECIMENTO

A Deus por tudo que me proporcionou.

A minha família pelo amor incondicional.

Aos professores Alisson Simonetti e André Lübeck, pelo apoio e dedicação.

Aos demais professores, que contribuíram de forma significativa na minha formação moral e profissional.

A todos os meus amigos que se mantiveram por perto nos momentos difíceis e felizes. Em especial a uma grande amiga, Brendha, pelos 10 anos de amizade.

E a todos os colegas de graduação, que contribuíram de forma direta ou indiretamente na minha graduação.

“Para realizarmos grandes conquistas devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar.”.

Antole France

RESUMO

Por definição, pontes são estruturas utilizadas para transpor obstáculos naturais e por causa da sua importância socioeconômica e a necessidade de associar segurança-custo. Acaba sendo de grande relevância obter e comparar os esforços de veículo normativo frente a um veículo real. Com esse propósito, utilizou-se dois modelos de cálculo: o trem-tipo da norma NBR 7188/2013 e um veículo real. Com auxílio do software SAP2000 V12, via métodos dos elementos finitos, as análises foram realizadas. Os resultados demonstraram a superioridade do veículo normativo diante do veículo real, porém é importante ressaltar à necessidade da distribuição da carga na determinação dos esforços e do espaçamento entre os eixos do veículo real, para que não ofereça riscos estruturais significativos à estrutura. Vale salientar que o veículo normativo encontra-se no limite de sua segurança.

Palavras-Chave: Carregamentos em pontes rodoviárias, trem-tipo, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

By definition, bridges are structures used to overcome natural obstacles and because of its socioeconomic importance and need to associate safety and cost. It's of great relevance to obtain and compare the efforts of normative vehicle against a real vehicle. For this purpose, two calculation models were used: the standard train of the norm NBR 7188/2013 and a real vehicle. With the help of SAP2000 V12 software, via finite element methods, the analyzes were performed. The results demonstrated the superiority of the normative vehicle as compare to the actual vehicle, but it is important to emphasize the need to distribute the load in determining the efforts and the spacing between the axes of the real vehicle, so that it does no offer significant structural risks to the structure. It is worth noting that the regulatory vehicle is at the limit of its safety.

Keywords: Load-bearing on road bridges, train-type, finite element method.

:

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das pontes por trem-tipo: a – número total de pontes; b – número de pontes com TB informado.	23
Figura 2 - Romeu e Julieta: Caminhão que traciona um reboque.	27
Figura 3 - Bitrem: Cavalo mecânico que traciona dois semirreboques.	27
Figura 4 - Tritrem: Cavalo mecânico que traciona três semirreboques.	27
Figura 5 - Rodotrem é um cavalo tracionando um semirreboque mais um reboque.	27
Figura 6 - Treminhão é um caminhão tracionando dois ou mais reboques.	28
Figura 7 - a: Semirreboque b: Reboque.	28
Figura 8 - Eixo Dianteiro Simples: DS, Eixo isolado, com 2 pneumáticos:	29
Figura 9 - Eixo Traseiro Simples: TS, Eixo isolado com 4 pneumáticos:	29
Figura 10 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos direcionais, com 2 pneumáticos cada:	30
Figura 11 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos em tandem com 4 pneumáticos por eixo:	30
Figura 12 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos não em tandem com 4 pneumáticos por eixo:	30
Figura 13 - Eixo Traseiro Misto: TM, Conjunto de 2 eixos sendo um com 2 pneumáticos, outro com 4 pneumáticos:	31
Figura 14 - Eixo Traseiro Misto: TM, Conjunto de 2 eixos sendo um com 2 pneumáticos, e outro com 4 pneumáticos:	31
Figura 15 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos em tandem com 2 pneumáticos extralargos em cada eixo:	31
Figura 16 - Eixo Traseiro Triplo: TT, Conjunto de 3 eixos em tandem, com 4 pneumáticos por eixo:	31
Figura 17 - Eixo Traseiro Triplo: TT, Conjunto de 3 eixos em tandem com 2 pneumáticos extralargos em cada eixo:	32
Figura 18 - Resumo, em porcentagem, das pesagens.	34
Figura 19 - Disposição do veículo 2S3, conforme a norma atual do DNIT.	35
Figura 20 - Disposição do veículo 3S3, conforme a norma atual do DNIT.	35
Figura 21 - Distribuição da carga móvel.	40
Figura 22 - Seção transversal da faixa de rolamento.	43
Figura 23 - Inclinação da faixa de rolamento.	44

Figura 24 - Seção transversal da barreira, New Jersey, padronizada pelo DNER (1996).....	46
Figura 25 - Seção transversal da obra de arte	50
Figura 26 - Seção longitudinal da ponte	51
Figura 27 Vista tridimensional do modelo idealizado no software SAP2000 V12.....	51
Figura 28 - Carregamento distribuído, para o máximo momento fletor positivo na laje, junto ao veículo normativo.....	53
Figura 29 - Carregamento distribuído, para o máximo momento fletor positivo na laje, junto ao veículo real -3S3.....	53
Figura 30 - Eixo 1: Dianteiro do Cavalotratador	54
Figura 31 - Eixo 2: Traseiro do Cavalotratador	54
Figura 32 - Eixo 3: Reboque.....	54
Figura 33 - Projeção vertical do veículo real.	55
Figura 34 - Distribuição do PBT entre os eixos do veículo 3S3.....	56
Figura 35 - Superfície de influência para o máximo momento fletor positivo em uma das vigas principais.	59
Figura 36 - Superfície de influência para o máximo momento fletor negativo em uma das vigas principais.	60
Figura 37 - Superfície de influência para o máximo cortante na viga principal.....	60
Figura 38 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.	61
Figura 39 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo veículo real, na viga principal.	61
Figura 40 - Diagrama do máximo momento fletor negativo, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.	61
Figura 41 - Diagrama do máximo momento fletor negativo, gerado pelo veículo real, na viga principal.	62
Figura 42 - Diagrama do máximo esforço cortante, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.....	62
Figura 43 - Diagrama do máximo esforço cortante, gerado pelo veículo real, na viga principal.....	62
Figura 44 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo trem-tipo, na laje.....	63

Figura 45 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo veículo real,
na laje.....63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configurações básicas de veículos de carga.	25
Tabela 2 - PBTC estimado para os próximos 50 anos.	36
Tabela 3 - Limite de peso de acordo com E.L.U.	36
Tabela 4 - Valor das cargas móveis.	39
Tabela 5 - Peso específico dos elementos da superestrutura.	42
Tabela 6 - Medida mínimas utilizadas, na largura, das obras de artes especiais.	44
Tabela 7 - Espessura das lajes de acordo com o vão.	45
Tabela 8 - Principais esforços obtidos na estrutura.	64
Tabela 9 - Máximo esforço cortante na viga principal.	64
Tabela 10 - Máximo momento fletor positivo na viga principal.	65
Tabela 11 - Máximo momento fletor negativo na viga principal.	65
Tabela 12 - Máximo momento fletor positivo na laje.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras minúsculas

p - é o valor estático da carga móvel uniformemente distribuída NBR 7188 (ABNT, 2013);

q - é o valor estático p acrescido de todos os coeficientes de ponderação NBR 7188 (ABNT, 2013).

Letras maiúsculas

P - é o valor estático de uma roda do veículo NBR 7188 (ABNT, 2013);

Q - é o valor estático de uma roda do veículo, acrescido de todos os coeficientes de ponderação NBR 7188 (ABNT, 2013).

Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AET - Autorização Especial de Trânsito

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

CIA - Coeficiente de Impacto Adicional

CIV - Coeficiente de Impacto Vertical

CNF - Coeficiente de Número de Faixas

CVC - Combinações de Veículos de Cargas

DAER/RS - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do estado do Rio Grande do Sul

DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização).

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ELS - Estado Limite de Serviço

ELU - Estado Limite Último

IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias

NBR - Norma **BR**asileira

NR - Norma Regulamentadora

PBT - Peso Bruto Total.

PBTC - Peso Bruto Total Combinado.

TB – Trem-tipo rodoviário Brasileiro.

VDM - Volume Diário Médio.

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização	17
1.2 Motivação	18
1.3 Definição da hipótese de pesquisa	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo geral	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Importância da carga móvel no dimensionamento	22
2.2.0 Veículos reais	24
2.2.1 Limitação do peso	28
2.2.2 Tolerância de peso: Resolução do CONTRAN nº 489 de 2015	32
2.2.3 Estudos e estatística sobre os excessos de pesos dos veículos	33
2.2.4 Estudos probabilístico de sobrecarga nos veículos	33
2.3 Estudos referentes à utilização do veículo real nas estruturas de pontes	36
2.4.0 Considerações normativas	38
2.4.1 Principais atualizações da NBR 7188.	38
2.4.2 NBR 7188 (ABNT, 2013)	39
2.4.2.1 Cargas móveis	39
2.4.2.2 Ponderação dos carregamentos em pontes, NBR 7188 (ABNT, 2013)	40
2.4.2.3 Peso próprio dos elementos estruturais e pavimentação	42
2.5 Geometria transversal da superestrutura da ponte	42
2.6 Geometria longitudinal da superestrutura da ponte	45
2.7 Barreiras de contenção	46
2.8.0 Métodos alternativos de cálculo das estruturas	47
2.8.1 Software comercial SAP2000® V12	47
3.1 Geometria das vigas e lajes do tabuleiro	49
3.2 Idealização das cargas acidentais	52
3.2.1 Veículo normativo de 45 toneladas	52
3.2.2 Carregamento distribuído (Pelotão)	52
3.2.3 Veículo real utilizado	53
3.2.4 Coeficientes de majoração e ponderação utilizados nos cálculos	56

3.3 Carregamento estático	56
3.4.0 Ações não atuantes na superestrutura.....	57
3.4.1 Frenagem e aceleração.....	57
3.4.2 Força centrífuga	57
3.5.0 Combinação dos esforços	57
3.5.1 Estado limite último	58
3.5.2 Estado limite de serviço.....	58
4 RESULTADOS OBTIDOS	59
4.1 Superfície de influência.	59
4.2 Resultados obtidos.....	60
4.3 Combinações dos E.LU e E.LS	64
4.3 Análise dos resultados.	65
4.3.1 Máximo esforço cortante na viga principal	65
4.3.2 Máximo momento fletor positivo na viga principal	66
4.3.3 Máximo momento fletor negativo na viga principal.....	66
4.3.4 Máximo momento fletor positivo na laje central.....	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERENCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Por definição da NBR 7188 (ABNT, 2013), pontes são estruturas utilizadas para transpor obstáculos naturais, sendo estes: rios; vales, córregos etc. Já os viadutos são estruturas feitas para transpor obstáculos artificiais, tais como avenidas, rodovias, entre outros. Pela complexidade executiva e por estarem sujeitas a cargas móveis, são consideradas como obras de arte na engenharia civil.

Sob o ponto de vista estrutural, as pontes são divididas em três partes:

- Infraestrutura: composta por blocos, tubulões, estacas ou outros elementos de fundação em geral;
- Mesoestrutura: composta pelos pilares, responsável por transmitir os esforços solicitantes da superestrutura à fundação;
- Superestrutura é constituída de vigas, lajes, pavimento e elementos de proteção. "É o elemento de suporte do estrado por onde se trafega, sendo assim, a parte útil da obra" (MARCHETTI, 2008, p. 3).

Devido a sua importância socioeconômica e a necessidade de conjugar o binômio segurança-custo, acaba sendo de grande relevância a discussão e definição de quais carregamentos devem ser considerados. Conforme Luchi (2006), o tráfego de veículos é amplamente variado no que tange: as condições (frequência de engarrafamento), o volume diário de veículos, a porcentagens de cada modelo de veículo e a carga máxima que cada um possui juntamente com a sua geometria. São todos fatores que influenciam no desempenho de uma estrutura de ponte.

A norma brasileira NBR 7188 (ABNT, 2013) trabalha com a adoção de um trem-tipo, um veículo hipotético que possui a finalidade de gerar esforços superiores aos gerados por veículos reais. Além do trem-tipo são consideradas outras naturezas de ações tais como as cargas permanentes, decorrentes do peso-próprio dos elementos, e acidentais tais como: água e vento. Todas as ações devem ser combinadas de acordo com os estados limites previstos por norma, para garantir os principais requisitos no projeto: funcionalidade, segurança, estética, economia e durabilidade.

Os estudos sobre as obras de arte foram aperfeiçoados com o passar dos anos. A primeira norma brasileira responsável pelo dimensionamento de pontes foi a NB6/1943, atualizada na década de 1960, originando mais tarde a ABNT NBR 7188/1982 e atualmente a ABNT NBR 7188/2013. Sendo as principais atualizações verificadas ao longo do tempo, o aumento do peso do trem-tipo e a mudança na forma de majoração das cargas, no entanto, o formato do trem-tipo praticamente não sofreu alterações. A distância entre rodas e eixos tem permanecido constante em todas as versões das normas

Contudo, existem poucos trabalhos que questionam o uso de trem-tipo, sugerindo a adoção de veículos reais, destacando os autores Rossigali (2006 e 2013), Luchi (2006) e Ferreira (2006). Rossigali (2006) concluiu que o desenvolvimento do tráfego engloba as configurações dos veículos, peso, velocidade e volume, toda vez que algum destes elementos sofre alguma alteração significativa é necessário verificar se as estruturas são capazes de suportar a nova realidade de tráfego.

1.2 Motivação

Devido a grande variedade das cargas móveis que uma obra de arte pode ser solicitada, foi desenvolvido o conceito de trem-tipo, a fim de simplificar e tornar possível o dimensionamento seguro das estruturas. “Em todas as normas internacionais, os modelos de carregamento procuram representar as cargas reais a favor da segurança, mas isso nem sempre é garantido” (LUCHI, 2006, p. 3).

De acordo com Santos (2013), a passagem de um único veículo sobre a estrutura gera ciclos de variação de tensão, com o passar dos anos os danos causados pelos ciclos vão se acumulando, podendo resultar em micro fraturas, esse acúmulo de danos é denominado de fadiga.

O principal condicionante no dimensionamento da superestrutura é garantir a resistência contra a fadiga, desta forma a geometria das vigas, lajes e a área de aço passam a ser em função das cargas dinâmicas e não devido á carga estática, desta forma as estruturas de pontes são capazes de suportar carregamentos superiores ao previstos por norma, sem riscos de ruptura.

Ressalta-se que o principal foco no dimensionamento de qualquer estrutura é a garantia da segurança e viabilidade ao longo de sua vida útil, sendo assim, a passagem de veículos com carregamento superior ao previstos por norma, apesar de não comprometer a estrutura de imediato, promovem um aumento significativo da fadiga, aumentando os danos causados por ciclos e diminuindo a vida útil da estrutura.

Dados do DNIT (2011) comprovam o aumento de tráfego de veículos com sobrepeso, fazendo com que as obras de arte sejam solicitadas por carregamentos maiores que os previstos. O excesso de peso nos veículos é absolutamente prejudicial no âmbito da vida útil e segurança da estrutura, no capítulo 2.2.3 é demonstrada a importância dos limites de carga impostos sobre os eixos. Com o aumento de veículos infratores e com a falta de fiscalização, fez-se necessário a verificação dos efeitos causados pelos veículos com excesso de carga.

Como algumas etapas do dimensionamento tradicional destas estruturas são realizadas através de tabelas, confeccionadas para o modelo de veículos normativos. Torna-se inconveniente e inviável fazer novos modelos de cálculo manual para testar outros veículos, sendo assim, optou-se por utilizar softwares de análise estrutural via método dos elementos finitos, como o SAP2000 v12. O objetivo foi determinar os efeitos das cargas dinâmicas e estáticas em uma determinada estrutura. Este software foi o utilizado nos estudos de Rossigali (2006) e Mendes (2009), demonstrando grande eficiência e praticidade para testar diferentes veículos na estrutura.

Alguns estudos nacionais foram realizados na última década, envolvendo comparações diretas entre os veículos da norma com os veículos reais e alguns demonstram que estes podem ser mais críticos que os veículos normativos. As principais referências foram:

- a) Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras (LUCHI, 2006);
- b) Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil (ROSSIGALI, 2006);
- c) Atualização do modelo de cargas móveis para pontes rodoviárias de pequenos vãos no Brasil (ROSSIGALI, 2013).

1.3 Definição da hipótese de pesquisa

Os veículos que trafegam nas rodovias brasileiras possuem um limite legal de carga, estabelecido pelo CONTRAN por meio da Resolução nº 210, de 2006, sendo o limite em função do comprimento do veículo e da configuração dos eixos. Conforme dados obtidos, é possível afirmar que o número de veículos com sobrecarga é significativo, desta forma, conjectura-se que os esforços gerados pelos veículos com sobrecarga possam ultrapassar os esforços de projeto.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é comparar a distribuição de esforços gerados na estrutura utilizando a NBR 7188 (ABNT, 2013), com os esforços obtidos empregando um veículo real no lugar do veículo normativo.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Definir a geometria da obra de arte em estudo, que possa representar grande parte das pontes existente e que se enquadre na legislação federal.
- b) Definir qual classe de veículo real a testar.
- c) Através de um estudo de superfícies de influência determinar as posições do carregamento que resultam os maiores esforços, momento fletor e esforço cortante, nas seções críticas das lajes e longarinas.
- d) Comparar os resultados obtidos utilizando o veículo real em relação ao veículo normativo analisando a segurança deste.

1.5 Estrutura do estudo

O presente trabalho é apresentado em cinco capítulos, sendo o primeiro o de introdução, no segundo é realizada uma revisão bibliográfica necessária para o

entendimento e desenvolvimento do trabalho, o terceiro é constituído da metodologia do trabalho, apresentando como o estudo foi desenvolvido, seguindo pelo quarto capítulo onde são apresentados os resultados e as análises dos esforços obtidos, finalizando no capítulo cinco, com as conclusões e considerações finais seguidas de sugestões de pesquisas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os elementos necessários para a compreensão do estudo proposto. Inicialmente são apresentados estudos referentes ao peso bruto dos veículos de cargas, juntamente com as leis e resoluções que delimitam os mesmos, posteriormente estão apresentados estudos relevantes à utilização dos veículos reais no dimensionamento de pontes rodoviárias, avançando com a apresentação do trem-tipo da norma NBR 7188 (ABNT, 2013) e revisão bibliográfica sobre o gabarito de pontes utilizado no Brasil, finalizando o capítulo com a apresentação do software SAP2000® V12, que será utilizado para a determinação dos esforços atuantes na estrutura.

2.1 Importância da carga móvel no dimensionamento

A carga móvel possui elevada influência no dimensionamento de uma estrutura de obra de arte, sendo necessário um grande conhecimento das cargas e geometria dos veículos. Não só o peso bruto total do veículo deve ser considerado, uma vez que o peso por eixo e distância entre eixos é de extrema importância, o Conselho Nacional de Trânsito determina os limites legais para o peso bruto do veículo e para cada classe de eixo, conforme apresentado no item 2.2.1.

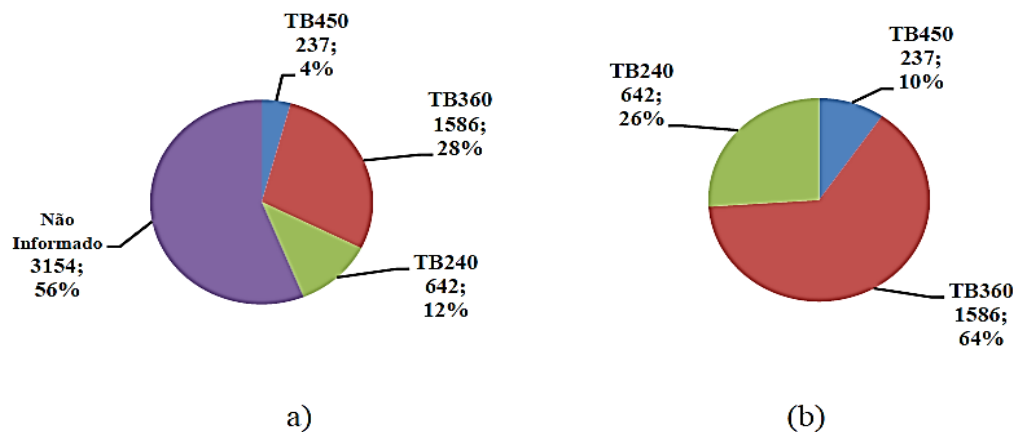
Com o objetivo de tornar possível o dimensionamento de pontes, principalmente quando se realiza o cálculo de maneira manual, fez-se necessário a utilização de um veículo padrão, cujos esforços gerados na estrutura seriam maiores do que qualquer outro veículo transitando sobre a mesma. A norma brasileira denominou o veículo padrão como trem-tipo, este pode ser observado no item 2.4.1. Ressalta-se que as normas brasileiras são baseadas na norma alemã DIN 1072 (1952), onde o veículo crítico utilizado no dimensionamento das pontes era um veículo militar, inspirado em um tanque de guerra da segunda guerra, antes havia outro veículo crítico compreendido por um veículo compressor.

Existem poucos estudos referentes à comparação dos veículos reais com os das normas antigas, alguns apontam que os esforços gerados por veículos reais ultrapassam os esforços gerados pelo trem-tipo 36 da norma NBR (ABNT, 1982), destacando os seguintes autores: Luchi (2006); Rossigali (2006); Santos (2013).

Desta forma é de extrema importância identificar as estruturas projetadas pelas normas antigas e verificar possíveis danos devido a passagens dos veículos atuais. Foram encontrados apenas estudos envolvendo veículos reais e a norma NBR 7188 (ABNT, 1982), não foi encontrada comparação feita com a norma atual, NBR 7188 (ABNT, 2013).

Apesar da importância da classe do trem-tipo utilizado nos projetos estruturais de pontes e viadutos, num total de 5619 pontes, presentes nas rodovias federais, Mendes (2009) declara que em 56% desse total não se sabe qual trem-tipo foi utilizado no dimensionamento. Na Figura 1 pode-se ver que apenas 10% das pontes, cujo trem-tipo foi informado, foram construídas com o trem-tipo de 45 toneladas.

Figura 1 - Distribuição das pontes por trem-tipo: a – número total de pontes; b – número de pontes com TB informado.



Fonte: Mendes (2009 p. 193)

No Brasil, a norma DNIT 010/2004-PRO (2010) regulamenta o procedimento de recuperação das obras de arte no país. A norma chega à conclusão que é fundamental a implantação de balanças de pesagem de veículos, devendo ser vetado o tráfego de veículos com excesso de peso.

De acordo com o documento “Fiscalização de excesso de peso em rodovias”, elaborado por: Rodrigo César Neiva Borges, consultor Legislativo federal da Área XIII, Desenvolvimento Urbano, Trânsito e Transportes, destaca-se que:

“[...] uma sobrecarga de 2% implica em uma destruição ao pavimento de 8% maior. Caso a sobrecarga passe a 4%, a destruição passa a 17%. Por sua

vez, uma sobrecarga de 20%, mais que dobra a destruição ao pavimento. Com base ainda na Lei da Quarta Potência, tomando como exemplo um pavimento projetado para uma vida útil de 10 anos, com uma sobrecarga de 5% a vida útil do pavimento será reduzida em mais de 3 anos. Caso a sobrecarga passe para 7,5 %, a vida útil é reduzida quase à metade.” (BORGES, 2012, p. 4)

Conforme destacado por Vitório (2015), no Brasil são gastos elevados níveis de recursos públicos na execução de obras públicas, porém, é precário o valor investido em manutenção das mesmas. Tendo em vista falta de manutenção das estruturas de pontes é importante prever os principais geradores de patologias para que se possa projetar uma estrutura de forma a garantir a sua vida útil.

2.2.0 Veículos reais.

Os veículos de carga que trafegam nas rodovias brasileiras são divididos por classes, conforme a Resolução CONTRAN n° 62 (CONTRAN, 1998). estes são representados por algarismos (máximo dois) intercalados por uma letra. Os algarismos antes e depois da letra indicam o número de eixos na unidade tratora e no reboque/semirreboque, respectivamente. Entretanto, esta regra exclui os veículos simples e da classe X.

Os veículos simples correspondem aos ônibus e caminhões dotados de dois eixos. A classe x é composta por veículos que necessitem da autorização especial de trânsito (AET), devido à dimensão ou carregamento. Os veículos simples são classificados apenas com um algarismo seguido de uma letra. O significado de cada letra encontra-se a seguir:

- nCm = veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator mais o reboque, caso não tenha reboque não possuirá o algarismo representado pela letra m;
- nSm = veículo trator (cavalo mecânico) mais uma unidade do tipo semirreboque, com distância entre eixos menor que 2,40 m;
- nlm = veículo trator mais o semirreboque com distância entre eixos maior que 2,40 m (eixos isolados);
- nJm = veículo trator mais o semirreboque com um eixo Isolado e um eixo em

Tandem

- nXm = veículos especiais.

As combinações de veículos de carga (CVC) são composições constituídas pela unidade tratora com duas ou mais unidades rebocadas, (semirreboques ou reboques). As nomenclaturas utilizadas para classificar as CVC são as seguintes:

- nDm = combinação dotada de duas articulações;
- nQm = combinação dotada de quatro articulações;
- nTm = combinação dotada de três articulações;

A Tabela 1 apresenta alguns dos tipos de veículos, conforme DNIT (2012).

Tabela 1 - Configurações básicas de veículos de carga.

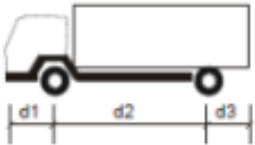
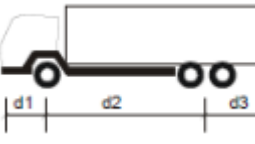
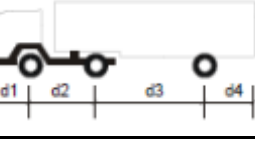
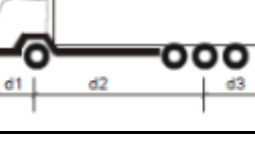
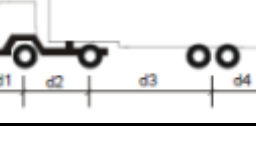
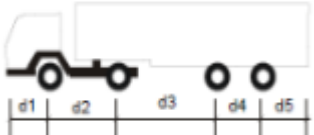
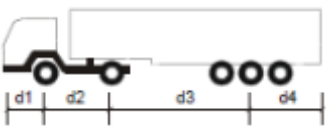
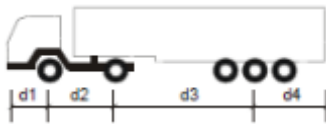


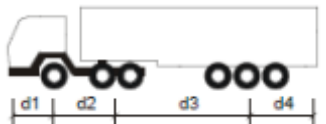
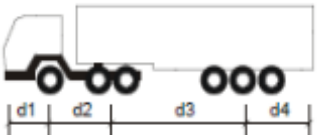
Classe	Configuração	DISTÂNCIAS ENTRE EIXOS (m)						
		d1	d2	d3	d4	d5	d6	Comp.
2C		0.5	4.5	2	-	-	-	7
3C		1.0	6	3.5	-	-	-	10.5
2S1		1	4.5	7.5	4.5	-	-	17.5
4C		1	5	2.5	-	-	-	8.5
2S2		1.5	4.5	7	3.5	-	-	16.5

Tabela 1 (continuação) - Configurações básicas de veículos de carga.

Classe	Configuração	DISTÂNCIAS ENTRE EIXOS (m)						
		d1	d2	d3	d4	d5	d6	comp.
2I2		1	4.5	6	2.5	1.5	-	15.5
2S3C (curto)		1.5	4.5	4	2.5	-	-	12.5
2S3L (longo)		1.5	4.5	6.5	4	-	-	16.5
3S2		1.5	5	7	2	-	-	15.5
3I2		1.5	5	7	2.5	1	-	17
3S3C (curto)		1.5	5	4.5	2.5	-	-	13.5
3S3L (longo)		1.5	5	7	3.5	-	-	17

Fonte: 1 DNIT (2012, não paginado)

Existem diversos veículos que não são classificados conforme o DNIT (2012), porém possuem nomes populares. Apesar de não serem oficiais, estes nomes são amplamente utilizados. Alguns desses nomes estão listados a seguir:

Figura 2 - Romeu e Julieta: Caminhão que traciona um reboque.



Fonte: CASTIGLIONI; PIGOZZO (p 20, 2014)

Figura 3 - Bitrem: Cavalo mecânico que traciona dois semirreboques.



Fonte: CASTIGLIONI; PIGOZZO (p 21, 2014)

Figura 4 - Tritrem: Cavalo mecânico que traciona três semirreboques.



Fonte: CASTIGLIONI; PIGOZZO (p 25, 2014)

Figura 5 - Rodotrem é um cavalo tracionando um semirreboque mais um reboque.



Fonte: CASTIGLIONI; PIGOZZO (p 23, 2014)

Figura 6 - Treminhão é um caminhão tracionando dois ou mais reboques



Fonte: CASTIGLIONI; PIGOZZO (p 24, 2014)

Conforme a Figura 7, a diferença entre o reboque e o semirreboque está em sua geometria e distribuição das cargas. O semirreboque é engatado ao veículo e transfere parte da sua carga ao mesmo, já o reboque é engatado ao veículo sem transferência significativa de cargas ao veículo trator.

Figura 7 - a: Semirreboque b: Reboque.



Fonte: Carro de garagem (2017)

2.2.1 Limitação do peso

Devido à intensificação do tráfego de veículos pesados e ao aumento da capacidade tratora, fez-se necessário a limitação dos pesos dos veículos, pois se tratando de superestrutura o limite de peso atribuído aos veículos é de suma importância para garantir a segurança estrutural das obras de artes e a vida útil dos pavimentos. Ressaltando que o peso dos veículos e seu movimento são responsáveis pelos momentos fletores e esforços cortantes críticos e principalmente pelo efeito da fadiga.

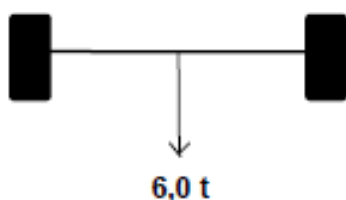
De acordo com Rossigali (2006), veículos maiores e mais pesados podem ser menos prejudiciais, ao pavimento, do que veículos mais leves e menores, desde que possuam configurações de eixos adequadas. Outra questão que o autor destacou foi o fato de que a carga por eixo é a variável mais importante na vida útil dos pavimentos.

Para os veículos que possuem apenas uma única unidade rebocada, a denominação da soma da tara do veículo unitário mais o peso útil, é dada como peso bruto total (PBT). Para os veículos com mais de uma unidade rebocada (CVC's) a denominação da soma da tara das unidades de combinação mais o peso útil é dada como peso bruto total combinado (PBTC).

O limite do PBT e PBTC é estabelecido pela Resolução CONTRAN n° 210 (CONTRAN, 2006), limitando o peso dos veículos em 45 toneladas, exceto as CVCs, limitadas em 57 toneladas. CVC com PBTC acima de 57 toneladas e inferior a 74 toneladas deverão possuir comprimento entre 25 e 30 metros e portar a autorização especial de trânsito, o peso total do veículo deve respeitar o limite imposto a cada classe eixo. As Figuras 8 a 17 apresentam a nomenclatura de cada eixo e o limite de carga estabelecido pelo CONTRAN (2006).

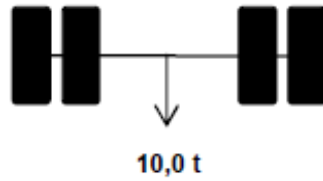
Eixos que possibilitam a rotação dos pneumáticos (rodas) são denominados de eixos direcionais, eixos isolados são denominados de eixos simples. Não foi encontrado nenhum documento estabelecendo a distância entre os pneumáticos, sendo informado apenas as distâncias máximas e mínimas entre eixos.

Figura 8 - Eixo Dianteiro Simples: DS, Eixo isolado, com 2 pneumáticos:



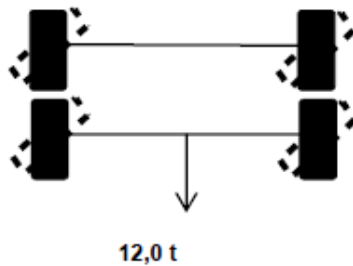
Fonte: DNIT (2012)

Figura 9 - Eixo Traseiro Simples: TS, Eixo isolado com 4 pneumáticos:



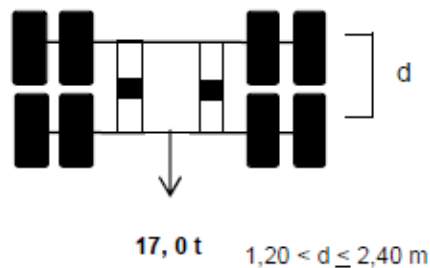
Fonte: DNIT (2012)

Figura 10 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos direcionais, com 2 pneumáticos cada:



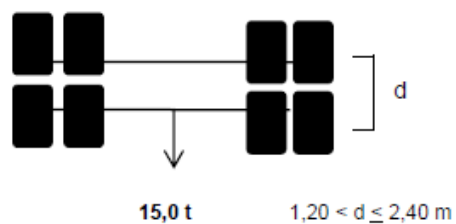
Fonte: DNIT (2012)

Figura 11 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos em tandem com 4 pneumáticos por eixo:



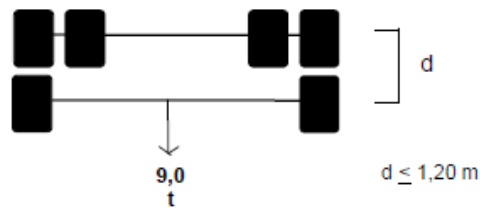
Fonte: 2 DNIT (2012)

Figura 12 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos não em tandem com 4 pneumáticos por eixo:



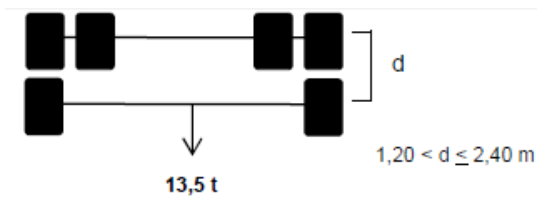
Fonte: DNIT (2012)

Figura 13 - Eixo Traseiro Misto: TM, Conjunto de 2 eixos sendo um com 2 pneumáticos, outro com 4 pneumáticos:



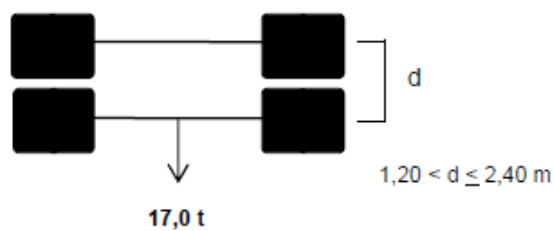
Fonte: DNIT (2012)

Figura 14 - Eixo Traseiro Misto: TM, Conjunto de 2 eixos sendo um com 2 pneumáticos, e outro com 4 pneumáticos:



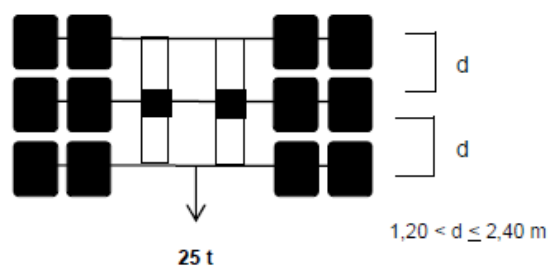
Fonte: DNIT (2012)

Figura 15 - Eixo Traseiro Duplo: TD, Conjunto de 2 eixos em tandem com 2 pneumáticos extralargos em cada eixo:



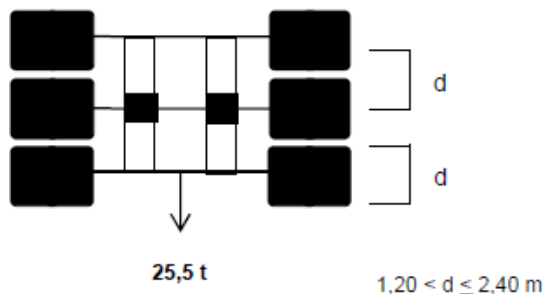
Fonte: DNIT (2012)

Figura 16 - Eixo Traseiro Triplo: TT, Conjunto de 3 eixos em tandem, com 4 pneumáticos por eixo:



Fonte: DNIT (2012)

Figura 17 - Eixo Traseiro Triplo: TT, Conjunto de 3 eixos em tandem com 2 pneumáticos extralargos em cada eixo:



Fonte: DNIT (2012)

2.2.2 Tolerância de peso: Resolução do CONTRAN nº 489 de 2015

Conforme o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2015), por meio da Resolução CONTRAN nº 526, de 2015, que alterou o artigo 5º da Resolução nº 489 de 2014, estabeleceu-se tolerâncias ao peso bruto total (PBT) e ao peso bruto total combinado (PBTC), explicitadas logo a seguir:

- I – 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC);
 - II – 10% (dez por cento) sobre os limites de peso regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas.
- Parágrafo Único. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN” (CONTRAN, 2015, p.2).

Ainda, conforme a Resolução CONTRAN nº 526 (CONTRAN, 2015), veículos com o PBT ou PBTC acima do seu valor máximo, em 12,5%, poderão trafegar nas vias sem que precise fazer o transbordo da carga. O artigo correspondente encontra-se abaixo:

“Art. 9º Independentemente da natureza da carga, o veículo poderá prosseguir viagem sem remanejamento ou transbordo, desde que os excessos aferidos em cada eixo ou conjunto de eixos sejam simultaneamente inferiores a 12,5% (doze e meio por cento) do menor valor entre os pesos e capacidades máximos estabelecidos pelo CONTRAN e os pesos e capacidades indicados pelo fabricante ou importador. Parágrafo Único. A tolerância para fins de remanejamento ou transbordo de que trata

o caput desse artigo não será cumulativa aos limites estabelecidos no art. 5º (CONTRAN, 2015, p.2).

2.2.3 Estudos e estatística sobre os excessos de pesos dos veículos

Existe uma tendência de aumento da sobrecarga provocada pelos veículos modernos em decorrência da maior potência tratora disponível. O aumento da potência dos veículos visa oferecer maior conforto e agilidade no transporte para um mesmo peso bruto, um exemplo claro é o fato de um veículo com o dobro de potência possuir uma eficiência maior em trechos de aclive nas rodovias, para o mesmo peso bruto de carga. Este fato facilita o ato dos condutores trafegarem com sobrecarga, tendência que cresce pela falta de fiscalização nas rodovias.

Dados do DNIT (2011) apontam que nos anos de 2009 e 2010 as porcentagens de caminhões e ônibus com excesso de peso, foram de 8,5% e 7%, respectivamente, totalizando 1.144.591 ocorrências de trânsito registradas durante os dois anos. Analisando individualmente, apesar das porcentagens de veículos com excesso de peso ter diminuído, o número de ocorrências cresceu entre os anos analisados, passando de 468.352 em 2009, para 676.239 em 2010. É importante salientar que a falta de dados mais atuais, tendo apenas notícias recentes de casos isolados e não de abrangência nacional, evidencia a falta de fiscalização das rodovias.

Estudos realizados, no município de Alegrete, do estado do Rio Grande do Sul, por Martins (2015, p. 69), demonstram que “[...] 60,2% de todos os veículos analisados apresentaram excesso de carga [...]”. O estudo teve como base uma amostra de 752 caminhões. Evidenciando que o problema de excesso de carga acontece mesmo em regiões de menor tráfego e não só em áreas próximas a grandes centros urbanos.

2.2.4 Estudos probabilístico de sobrecarga nos veículos

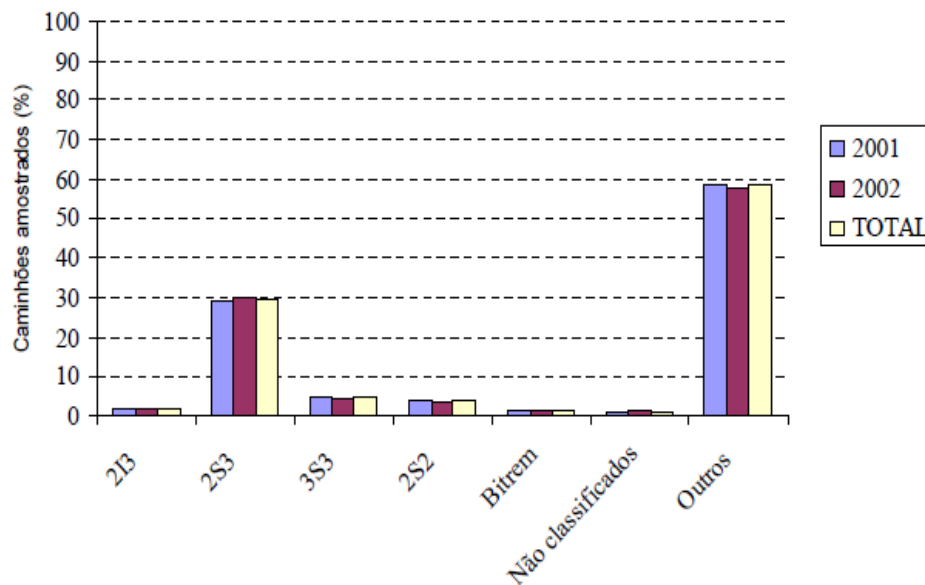
Ferreira (2006) efetuou um estudo voltado a determinar o máximo peso bruto de determinados veículos reais, de forma que os esforços gerados pelos mesmos não superassem os esforços gerados pelos veículos normativos. Foi utilizado no

estudo o trem-tipo classe 36 da norma NB 6 (ABNT, 1960) e classe 45 da NBR 7188 (ABNT, 1982). Os veículos reais utilizados encontram-se na Tabela 2.

Inicialmente, o autor estimou o peso de determinados veículos num período de 50 anos, e verificou o máximo peso bruto para cada veículo atuando individualmente ou combinado com outro veículo crítico.

Para efetuar a estimativa, o autor utilizou dados obtidos pela empresa Centrovias Sistemas Rodoviários S/A, coletados entre janeiro de 2001 e outubro de 2002, num total de 1.846.603 pesagens. As medições foram realizadas em duas balanças móveis nas rodovias SP-310, Rod. Washington Luiz; SP-225, Rod. Eng. Paulo Nilo Romano; SP-225, Rod. Comandante João Ribeiro de Barros. O número de veículos por categoria é demonstrado no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Resumo, em porcentagem, das pesagens.

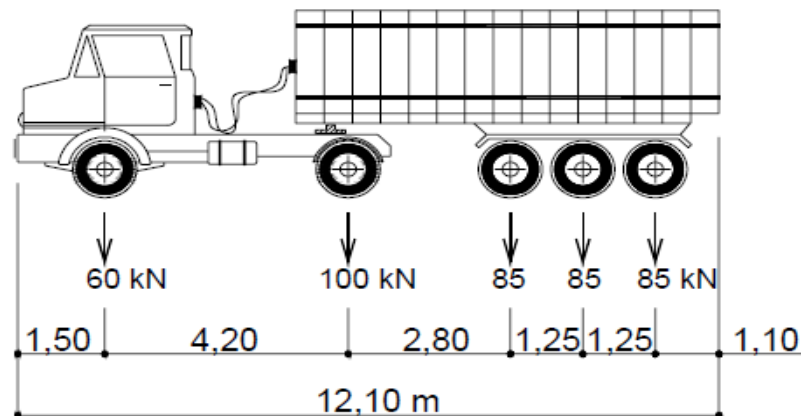


Fonte: Ferreira (2006, p. 114)

Conforme destacado por Ferreira (2006), os dados obtidos não informam as distâncias entre os eixos dos veículos. A disposição dos eixos é de suma importância, porém, é possível destacar que para os veículos 2S3 e 3S3, ver Figuras 19 e 20, existem duas configurações básicas, um modelo curto, basculante, utilizado para transporte de brita, areia e solos, e um longo, utilizado para transportes de materiais de maiores dimensões. Desta forma, o autor utilizou um catálogo virtual da empresa Randon S/A Implementos e Sistemas Automotivos, para que pudesse

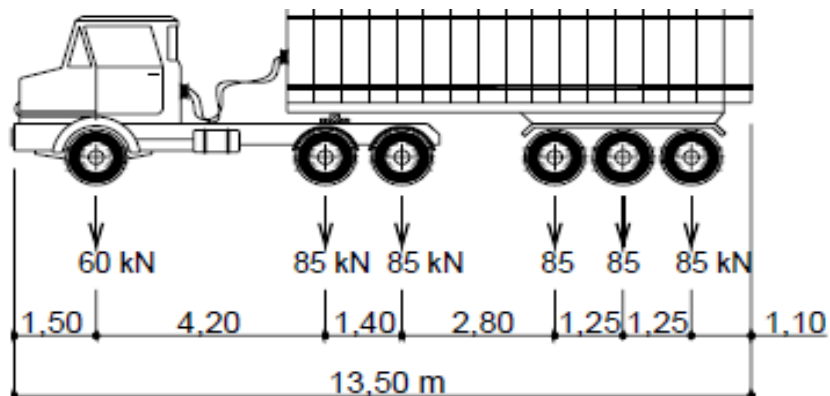
estipular a geometria dos veículos. A disposição adotada é compatível com o catálogo da empresa e com a resolução do CONTRAN (2006), juntamente com o manual do DNIT (2012).

Figura 19 - Disposição do veículo 2S3, conforme a norma atual do DNIT



Fonte: Ferreira (2006, p.116)

Figura 20 - Disposição do veículo 3S3, conforme a norma atual do DNIT



Fonte: Ferreira (2006, p.116)

Para os veículos 3S3 foram obtidos PBT equivalente a 60 toneladas, já para veículos 2S3 foram obtidos pesos ligeiramente acima de 50 toneladas. O estudo probabilístico, realizado por meio dos dados coletados, possibilitou a previsão do peso bruto de determinados veículos apresentada na Tabela 2:

Tabela 2 - PBTC estimado para os próximos 50 anos.

Veículo	PBTC para 50 anos (KN)
2I3	521,8
2S3 Curto	696,9
2S3 Longo	723,9
3S3 Curto	1009,1
3S3 Longo	1069,6
2S2	1081,6
Bitrem	664,1

Fonte: Ferreira (2006, p.123)

O autor determinou limite de peso para cada classe de veículo estudado, a fim de garantir seguro o dimensionamento conforme a norma de projeto NB 6 (ABNT, 1960) e NBR 7188 (ABNT, 1982). Os valores máximos para cada veículo encontram-se na Tabela 3. Ressaltando que a Classe 36 e 45 correspondem as normas NB 6 (ABNT, 1960) e NBR 7188 (ABNT, 1982), respectivamente.

Tabela 3 - Limite de peso de acordo com E.L.U

Caminhão	PBTC (KN)	Comp. (m)	Limite (KN)	
			Classe 36	Classe 45
Basculante (2S3)	450	13.5	456.1	519.8
Bitrem	570	18.72	569.1	643.6
Bitrenzão	740	24.9	462.1	526.3
Rodotrem	740	19.8	614.8	693.7
Rodotrem	740	25	739.3	830.1

Fonte: Editado de Ferreira (2006)

2.3 Estudos referentes à utilização do veículo real nas estruturas de pontes.

O resumo dos principais estudos que utilizaram cargas reais para o dimensionamento de pontes e viadutos encontra-se no Quadro 1. Nota-se que todos os estudos foram feitos anteriormente ao lançamento da atual norma NBR 7188 (ABNT, 2013).

Quadro 1 - Principais estudos referentes à adoção do veículo real no dimensionamento de pontes rodoviárias

Principais estudos referentes à adoção do veículo real no dimensionamento de pontes rodoviárias				
Autor/Ano	Rossigali (2006)	Rossigali (2013)	Ferreira (2006)	Santos (2013)
Normas Utilizadas	NB 6 (1960) NBR 7188 (1982)	NB 6 (1960) NBR 7188 (1982)	NBR 7188 (1982)	NBR 7188 (1982)
Veículos utilizados	2C; 3C; O2C; O3C; 2S2 e 2S3	Eixo duplo (4 rodas e 850KN); 2C; 3C; O2C; O3C; 2S2; 2S4; 3T4 e 3S3	2I3; 2S2; 2S2; 3S3 e 3D4	Eixo duplo (8 rodas) e 3C
Valor da carga distribuída do veículo real (KN)	Não foi utilizado	2KN/m ²	Não foi utilizado	1KN/m ²
Simultaneidade de veículos sobre a ponte?	Não foi considerado	Considerou veículos isolados e em conjunto	Considerou veículos isolados e em conjunto	Não foi considerado
Veículos isolados que superaram os esforços da NBR 7188/1982	Nenhum veículo superou os esforços da NBR 7188/1982	3T4; 3S3 C; 3S3; 3T6.	3S3.	Eixo duplo (8 rodas); 3C

Fonte: Elaboração própria.

Rossigali (2006) adotou veículos reais com os pesos brutos estabelecidos pelo CONTRAN (2015) com 5% de sobre carga, chegando à conclusão que nenhum veículo real superou os esforços causados pelo veículo normativo. No entanto, o autor não aplicou a carga distribuída prevista em norma concomitante ao veículo, o que poderia justificar os resultados observados.

Rossigali (2013) utilizou uma carga distribuída de 2 KN/m² junto ao veículo real e realizou estudos probabilísticos de veículos isolados e em grupos, chegando a conclusão que o veículo isolado que apresentou o maior dano foi o 3S3, superando os esforços do veículo normativo. Também foi utilizado em seus estudos apenas um eixo em tandem duplo, conforme a Figura 15 com peso total de 85 toneladas. Esta configuração de carga foi a que apresentou maiores esforços, sendo o modelo escolhido pelo autor para substituir o veículo normativo. Ressalta-se que o eixo utilizado pelo autor atualmente é limitado a uma carga de 17 toneladas + 5% de tolerância, muito abaixo do testado por Rossigali (2013)

Ferreira (2006) optou por não utilizar a carga distribuída, porém considerou os veículos com sobrecarga estipulada para um período de retorno de 50 anos. O veículo 3S3 que atualmente circula com peso máximo estabelecido pelo CONTRAN, (2015) de 45 toneladas, foi considerado pelo autor com 1009,1KN (dados apresentados na Tabela 2). O veículo crítico obtido foi o 3S3.

Santos (2013) buscou um modelo de carga para melhor ajustar os efeitos da fadiga, a autora utilizou apenas veículos isolados, também foi utilizado o modelo proposto por Rossigali (2013), porém utilizou um fator redutor de cargas de 0,5, desta forma, o modelo idealizado pela autora para o dimensionamento da fadiga seria um tandem duplo com 45 toneladas, juntamente com uma carga distribuída de 1 KN/m². Nos veículos reais não foram considerados sobrecarga de peso.

2.4.0 Considerações normativas

Neste item são apresentadas as principais atualizações feitas na NBR 7188 (ABNT, 1982) em 2013. Posteriormente é apresentada a norma atual NBR 7188 (ABNT, 2013).

2.4.1 Principais atualizações da NBR 7188.

Na norma NBR 7188 (ABNT, 1982) as pontes eram divididas em três classes: Classe 45, Classe 30 e Classe 12, cada uma utilizando veículo normativo de 450KN, 300KN e 12KN, respectivamente. A norma atual utiliza apenas do veículo normativo de 450KN, apresentado no item 2.4.2.1.

Outra mudança significativa foi o coeficiente de majoração das cargas móveis, a norma NBR 7188 (ABNT, 1982) adotava o coeficiente de majoração conforme a Equação 1, devendo ser aplicado a todo carregamento acidental independentemente da sua localização. A norma atual apresenta uma nova configuração de majoração das cargas acidentais, demonstrada no item 2.4.2.2.

$$\phi = 1,4 - 0,007.l \geq 1. \quad \dots(1)$$

Em que:

ϕ é o coeficiente de ponderação das cargas acidentais.

l é o comprimento, em metros, de cada vão teórico. Para caso de vão diferente, poderá ser utilizado a média dos vãos, deste que o menor deles tenha, no mínimo, 70% do comprimento do maior vão. Para vigas em balanço, deverão ser consideradas duas vezes o comprimento do vão.

2.4.2 NBR 7188 (ABNT, 2013)

A norma NBR 7188 (ABNT, 2013) determina as características do veículo normativo a ser utilizado nos projetos de obra de arte, ressaltando que para pontes especiais o dimensionamento fica a critério dos órgãos com jurisdição sobre pontes.

2.4.2.1 Cargas móveis

O dimensionamento leva em conta apenas um único veículo normativo, percorrendo toda a estrutura, tendo obrigatoriamente, sua orientação na direção do tráfego. Além do veículo normativo de 450 KN é utilizada uma carga distribuída de 5kN/m², ao longo de toda a pista de rolamento, excluindo o local onde o veículo normativo se localiza e nas regiões onde seu efeito é favorável, juntamente com uma carga distribuída de 3kN/m², apenas nos passeios. As cargas distribuídas servem para simular a passagem simultânea de veículos mais leves. Os valores das cargas móveis estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valor das cargas móveis

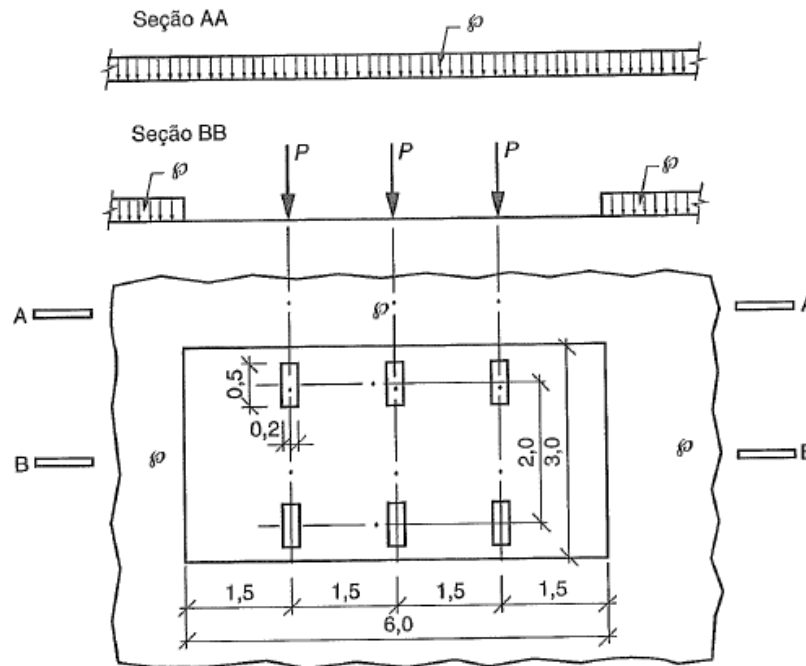
Classe da ponte	Veículo Peso Total	Carga uniformemente distribuída	
		P	p`
45	450 KN	5 KN/m ²	3 KN/m ²

Fonte: Elaboração própria

Conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013), no dimensionamento da superestrutura, o trem-tipo e as cargas distribuídas deverão percorrer toda a estrutura, incluindo faixas de segurança e acostamento, buscando as situações mais desfavoráveis de

forma a maximizar os esforços nos elementos avaliados. A distribuição das cargas genérica pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 - Distribuição da carga móvel



Fonte: NBR 7188 (ABNT, 2013, p. 4)

2.4.2.2 Ponderação dos carregamentos em pontes, NBR 7188 (ABNT, 2013)

Todos os carregamentos móveis devem ser majorados com os coeficientes de ponderação exceto a carga distribuída sobre os passeios.

Segundo a norma NBR 7188 (ABNT, 2013), são considerados três coeficientes que multiplicados resultarão no coeficiente final de ponderação das cargas móveis, sendo eles: coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente do número de faixas (CNF) e coeficiente de impacto adicional (CIA).

- Coeficiente de Impacto Vertical

Conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013), deve ser feito um estudo específico para a determinação do coeficiente de impacto vertical, levando em consideração a amplificação dinâmica, para estruturas com vãos maiores que 200m. “O CIV não

simula e/ou elimina a necessidade de análise dinâmica nas estruturas sensíveis e/ou de baixa rigidez, em especial estruturas de aço e estruturas estaiadas” (ABNT, 2013, p.3).

Para vãos até 200m, a norma NBR 7188 (ABNT, 2013) determina que:

$CIV = 1,35$ vão menor do que 10,0 m.

$CIV = 1 + 1,06 \left(\frac{20}{L_{iv} + 50} \right)$ para vão entre 10,0 e 200 m. ... (2)

Em que:

Liv é o vão em metros para o cálculo CIV, sendo:

Liv usado para estruturas de vão isostático ou a média aritmética dos vãos nos casos de vãos contínuos;

Liv é o comprimento do próprio balanço para estruturas em balanço;

L é o vão, expresso em metros (m).

- Coeficiente de Número de Faixas

Este coeficiente é tanto maior quanto menor for o número de faixas, pois quando houver mais de uma faixa de rolamento, a probabilidade de ter dois veículos normativos, situados em regiões diferentes da ponte, que favorecerá o aumento dos esforços na estrutura, será menor, já que em pontes com mais de duas faixas de rolamento, os veículos pesados tendem a permanecer nas faixas externas, já os veículos leves tendem a permanecer nas faixas internas.

Vale ressaltar que conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013) este coeficiente só é aplicado em elementos estruturais no sentido do tráfego, excluindo os elementos transversais (lajes, transversinas etc.). O CNF é calculado conforme a Equação 3:

$$CNF = 1 - 0,05(n - 2) \geq 0,9 \quad \dots(3)$$

Em que:

n é o número de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo. Acostamento e faixas de segurança não são faixas de tráfego da rodovia

- Coeficiente de Impacto Adicional

Para considerar as imperfeições e impactos nos elementos próximos à juntas construtivas é utilizado o coeficiente de impacto adicional, tal coeficiente é relacionado com o modelo construtivo da ponte, independente da sua geometria. Este coeficiente só deve ser utilizado para elementos a uma distância não maior que cinco metros das juntas e descontinuidades. Os dois valores do coeficiente, conforme o material construtivo são:

- a) CIA = 1,25 para obras em concreto ou mista;
- b) CIA = 1,15 para obras em aço.

2.4.2.3 Peso próprio dos elementos estruturais e pavimentação

A NBR 7187 (ABNT, 2003) determina os pesos específicos para os elementos estruturais em concreto simples ou armado e para os pavimentos. Com relação ao peso específico dos pavimentos, é prevista uma sobrecarga distribuída de 2kN/m² referente a possíveis recapeamentos do pavimento. Na Tabela 5 constam os valores do peso específico dos elementos de concreto armado e do pavimento.

Tabela 5 - Peso específico dos elementos da superestrutura

Quadro das Cargas Permanentes. NBR7187 (ABNT, 2003)	
Peso específico dos elementos estruturais em concreto armado	25 kN/m ³
Peso específico da pavimentação em concreto	24 kN/m ³
Carregamento distribuído adicional previsto da pavimentação em concreto	2kN/m ²

Fonte: Própria

2.5 Geometria transversal da superestrutura da ponte

Para compor a geometria do tabuleiro da ponte, foram analisados

documentos de dois órgãos responsáveis pelas estruturas de obras de arte especiais (OAE):

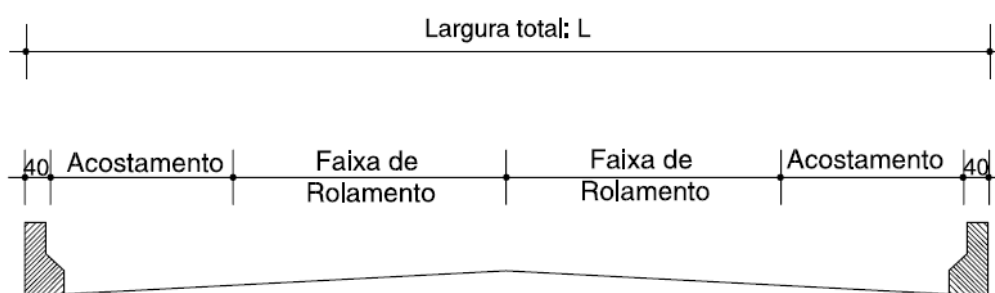
- a) Instrução de serviço para determinação de gabarito de Obras-de-Arte Especiais do Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens, do estado do Rio Grande do Sul, (DAER/RS, 2013);
- b) Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais do Departamento Nacional de Rodagem (DNER, 1996).

Vale ressaltar que o Manual é datado no ano de 1996, sendo criado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), órgão substituído pelo DNIT a partir de junho de 2001, por meio da lei nº 10.233/2001. Porém, o DNIT mantém o manual do DNER como válido.

O Manual de projeto disponibilizado pelo DNER (1996) possui dados mais completos, porém, no âmbito da largura das faixas de rolamento das obras de arte especiais, o documento do DAER/RS (2013) possui valores, essas foram consideradas.

A Figura 22 demonstra a seção transversal de uma ponte, composta por duas faixas de rolamento e duas faixas de acostamento.

Figura 22 - Seção transversal da faixa de rolamento.



Fonte: DNER (1996, p.38)

Na Tabela 6 são apresentados os valores mínimos para a largura das faixas de rolamento, acostamento e barreiras. As larguras das faixas devem, obrigatoriamente, acompanhar a faixa de rolamento da rodovia.

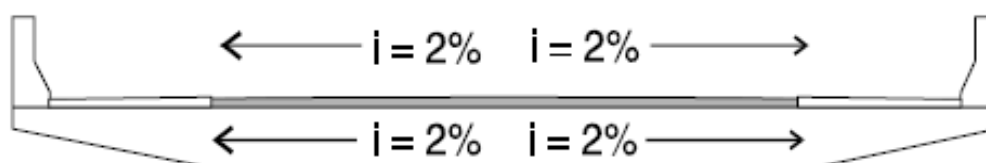
Tabela 6 - Medida mínimas utilizadas, na largura, das obras de artes especiais

Características	Regiões	Classes					
		0 ou Especial Pista Dupla	1A Pista Dupla	1B Pista Simples	II Pista Simples	III Pista Simples	IV Pista Simples
Larg. da faixa de rolamento (m)	Todas	3,75	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Larg. do acostamento externo (m)	Todas	3,00	2,50	2,00	2,00	2,00	2,00
Larg. Da folga interna (m)	Todas	2,00	1,50	-	-	-	-
Barreira Simples (Guarda Rodas) (m)	Todas	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
OAEs Pista Simples (duas faixas)	Todas	-	-	12,00	12,00	12,00	12,00
OAEs Pista Dupla (duas faixas)	Todas	13,30x2	12,00x2	-	-	-	-

Fonte: DAER/RS (2013, p.2)

De acordo com o DNER (1996), a inclinação mínima das faixas de rolamentos deverá ser igual a 2%, conforme a Figura 23. Tendo espessura mínima de 7 cm e resistência característica do concreto (f_{ck}) maior ou igual a 30MPa para pavimento rígido a base de cimento Portland. A norma permite utilizar a pavimentação flexível, projetada em função do número de eixos dos veículos que trafegaram ao longo da vida útil do pavimento (N), sendo considerados apenas eixos com carga acima de 80KN, a espessura do pavimento flexível deverá ser de 5 cm para $N < 10^6$ e 7 cm para $N > 10^6$.

Figura 23 - Inclinação da faixa de rolamento.



Fonte: DNER (1996, p.19)

O índice de esbeltez das vigas é determinado através da fração entre o comprimento do vão e a altura total da viga. As vigas de altura constante deverão possuir esbeltez, $\frac{L}{d}$, variando entre 5 a 30, para pontes de um só vão, podendo atingir $\frac{L}{d} = 45$ para em vigas contínuas, em nenhum caso as vigas poderão possuir espessura menor que 25 cm, DNER (1996).

De acordo com Spernau [199-] a altura das vigas principais deve ser de aproximadamente 10% do vão quando isostáticas e entre 5 e 8% do vão quando contínuas. Em ambos os casos estas devem possuir a espessura na ordem de 25% da sua altura, estando dentro da faixa de 30 a 50 cm. As transversinas devem ter 75% da altura da viga principal e espessura entre 20 e 30 cm.

As espessuras das lajes moldadas in loco medidas no meio do vão, deverão respeitar a Tabela 7, conforme estabelecido pelo DNER (1996).

Tabela 7 - Espessura das lajes de acordo com o vão

Vão da Laje (m)	Espessura da Laje (cm)
2	15
3	18
4	20
5	22
6	25

Fonte: DNER (1996, p.123)

2.6 Geometria longitudinal da superestrutura da ponte

O comprimento total de uma ponte está diretamente relacionado com o vão que deseja-se vencer. De acordo com o DNER (1996) o comprimento total deverá ser suficiente para: garantir o encaixe nos taludes, preferencialmente limitando a altura dos aterros em 12 metros, e garantir que o talude de aterro fique, permanentemente, protegido das enchentes quando se tratarem de travessias fluviais.

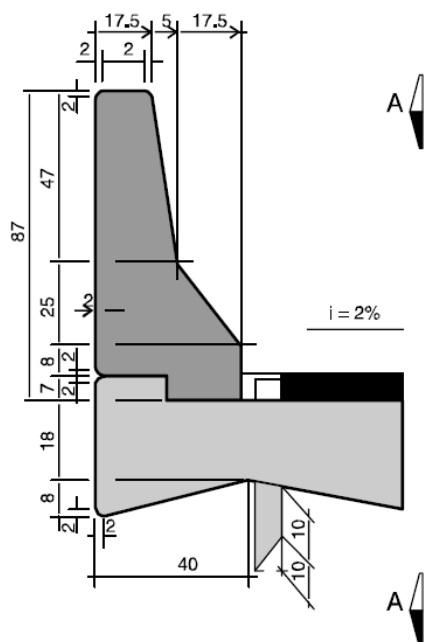
Para melhor entender a distribuição das pontes nacionais, quanto a sua seção longitudinal, Mendes (2009) obteve informações sobre um total de 5619 pontes, fazendo algumas observações:

- 63% das pontes possuem extensão menor ou igual a 50 metros;
- 26% das pontes possuem apenas um vão central;
- 24% das pontes possuem um vão central e dois em balanço;
- 31% das pontes possuem vãos entre 20 e 30 metros.

2.7 Barreiras de contenção

A barreira de concreto padronizada pelo DNER (1996) é do tipo New Jersey, possui elevada resistência contra choques de veículos, além de ocupar um pequeno espaço, tendo largura total de 40 centímetros. Em setembro de 2009, o DNIT publicou uma norma referente a barreiras de concreto armado, no entanto, apesar de ser mais antiga, a norma do DNER (1996) atende de maneira satisfatória os aspectos de geometria exigidos naquela mais recente. A seção transversal da barreira de contenção pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Seção transversal da barreira, New Jersey, padronizada pelo DNER (1996)



Fonte: DNER (1996, p.43)

2.8.0 Métodos alternativos de cálculo das estruturas

No dimensionamento de pontes e viadutos brasileiros utilizam-se as normas NBR 7187 (ABNT, 2003) e NBR 7188 (ABNT, 2013). Como já citado, estas normas baseiam-se na norma alemã DIN 1072 (1952), sendo que a norma alemã foi confeccionada com base nos estudos realizados por Hubert Rüsç. A aproximação do cálculo pelos preceitos da norma alemã permite que em situações comuns, o dimensionamento das lajes possa ser realizado utilizando as tabelas desenvolvidas por Rüsç. Estas tabelas fornecem os esforços para lajes com condições de contorno variáveis sujeitas a um trem-tipo com geometria pré-definida

Para estruturas mais complexas ou diferentes tipos de carregamento móvel é necessário a adoção de outro procedimento de cálculo, uma vez que as tabelas de Rüsç são específicas para o trem-tipo utilizado atualmente norma brasileira. Com o avanço tecnológico e computacional, atualmente é possível projetar e executar estruturas cada vez mais econômicas e seguras, com auxílio de métodos computacionais, em especial, o método dos elementos finitos vem crescendo cada vez mais no âmbito do dimensionamento estrutural, pois é possível reduzir o tempo gasto na resolução de problemas ao mesmo tempo em que é possível ter uma visão mais clara de como a estrutura se comporta, diminuindo as simplificações de cálculos e, conseqüentemente, aumentando a representatividade dos resultados finais.

2.8.1 Software comercial SAP2000® V12

O software SAP2000® V12 foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho. Ele baseia-se na solução estrutural com auxílio do método dos elementos finitos. A estrutura é representada por elementos discretos, como barras e superfícies, e os mais diversos tipos de carregamento são aplicáveis, inclusive carregamentos móveis, permitindo gerar os esforços do veículo real. A Unipampa possui a licença de utilização dessa versão do software.

O software permite a modelagem 3D. A modelagem é rápida e intuitiva, além de ser fácil gerar o modelo estrutural, sendo possível simular cargas de vento, sísmicas e de veículos.

No estudo realizado por Pio (2015) foi possível constatar a validade do uso do software SAP2000 V.12 na obtenção dos esforços nas estruturas de pontes. Os resultados do software divergiram dos obtidos manualmente pelo autor, devido ao fato do software considerar a estrutura como um todo e o cálculo manual possuir uma série de simplificações.

3 METODOLOGIA

Este capítulo constitui-se de métodos e procedimentos utilizados para obter os esforços gerados em uma ponte rodoviária, classe III, com 2 faixas de rolamento, uma em cada sentido do tráfego, com 12 metros de largura, 20 metros de vão central e dois balanços de extremidade de 5 metros, totalizando 30 metros de comprimento total. Projetada em concreto armado, com tabuleiros engastados nas 2 direções (vigas principais e transversinas), vigas principais (longarinas), espaçadas entre si em 7 metros, contendo 5 vigas intermediárias transversais ao sentido do tráfego (transversinas), espaçadas entre si a cada 5 metros. A descrição e apresentação do projeto é realizada no item 3.1.

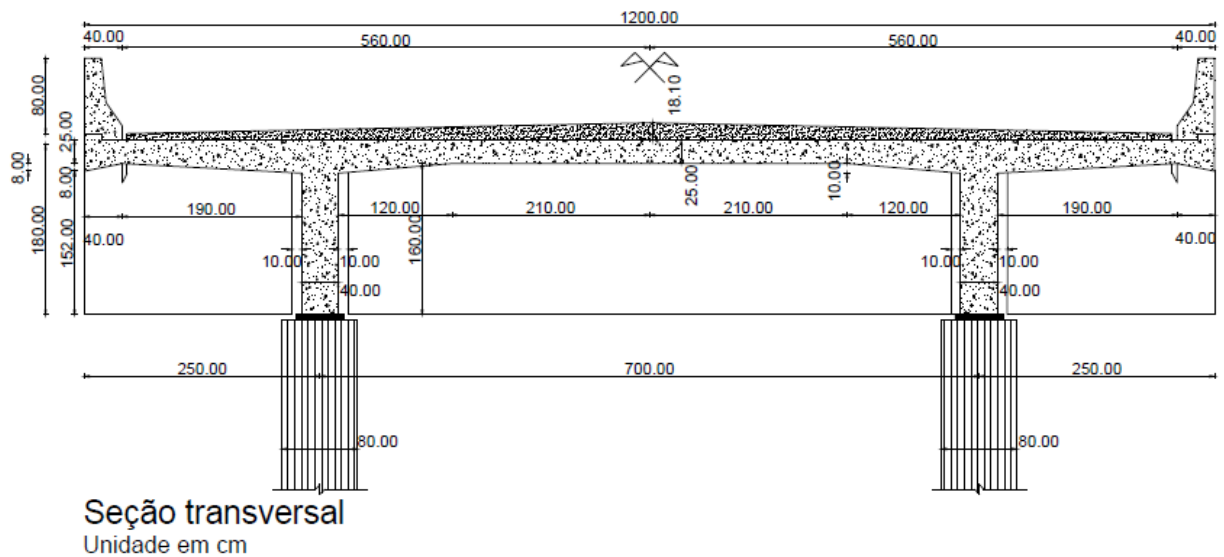
Dois tipos de carregamento móvel foram avaliados, um trem-tipo normativo de 45 toneladas e um veículo real com geometria, apresentados item 3.2.3. As análises estruturais foram efetuadas no software SAP2000® V12 e apresentadas no capítulo 4.

3.1 Geometria das vigas e lajes do tabuleiro

A largura das faixas de rolamento foi definida conforme as determinações de DAER/RS (2013), sendo estabelecido que a obra de arte deve seguir os mesmos parâmetros (larguras e superelavações) da pista de rolamento ligada.

Foi definido que tanto a obra de arte quanto a estrada de rodagem são classificadas, de acordo com as suas condições técnicas, na classe de projeto III, constituídas de pista simples, contendo um volume diário médio de veículos (VDM), entre 300 e 700, este fator é o principal condicionante para classificação das classes de projeto. Conforme a Tabela 6 a largura total é de 12 metros, conforme exposto na Figura 25.

Figura 25 - Seção transversal da obra de arte



Fonte: Próprio autor

Dimensões das vigas e lajes:

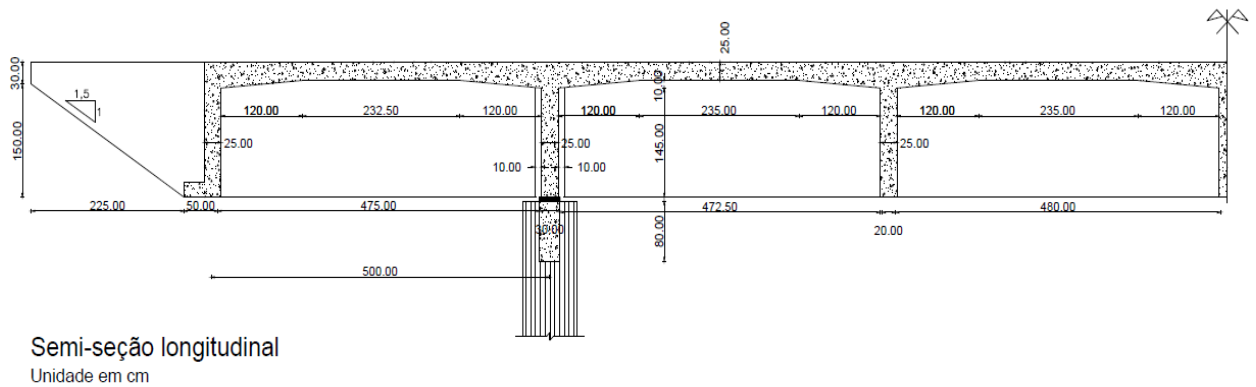
- A espessura da laje é de 25 cm, conforme a Tabela 7;
- As vigas principais possuem 45 cm de largura e 180 cm de altura;
- As transversinas possuem 25 cm de largura e 180 cm de altura (mesma altura das vigas principais).

No dimensionamento da viga principal é aconselhado que a altura da viga seja de $1/12$ do vão entre os centros dos pilares, como este é dotado de 20 metros a altura das vigas principais é estipulada em 1,8 metros.

O índice de esbeltez das vigas principais, determinados pela relação L/d , sendo L o comprimento e d a altura da viga, é de aproximadamente 11,11 no vão central e 2,78 nos balanços, sendo os limites entre 5 e 45, estabelecidos pelo DNER (1996).

A seção longitudinal da obra de arte foi definida de forma a representar o máximo número de pontes nacionais, utilizando dados obtidos de Mendes (2009), apresentados no item 2.6, foi projetada uma obra de arte com um vão central de 20 metros, e dois vãos em balanço de 5 metros. Serão consideradas 3 transversinas no vão central, e 1 transversina na extremidade de cada balanço. A vista longitudinal encontra-se na Figura 26.

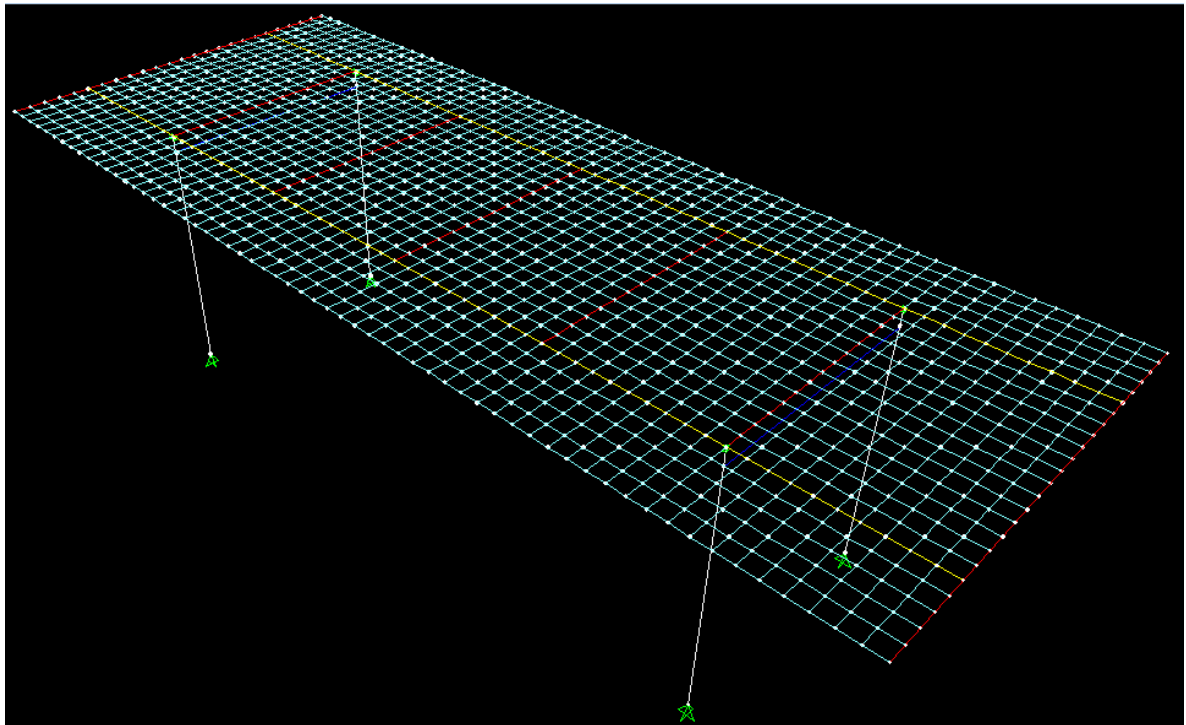
Figura 26 - Seção longitudinal da ponte



Fonte: Próprio autor

A estrutura projetada no software SAP200 V12 é apresentada na Figura 27, constitui-se de uma estrutura tridimensional, sendo as vigas e pilares representados por barras e a laje por uma grelha de malha 50x50cm. As duas vigas principais são ligadas aos apoios através de placa de borracha fretada (neoprene).

Figura 27 Vista tridimensional do modelo idealizado no software SAP2000 V12



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Idealização das cargas acidentais

3.2.1 Veículo normativo de 45 toneladas

Conforme apresentado no item 2.4.2.1 a norma NBR 7188 (ABNT, 2013) determina um único veículo normativo, percorrendo toda a estrutura, tendo obrigatoriamente, sua orientação na direção do tráfego, devendo percorrer toda a estrutura, incluindo faixas de segurança e acostamento, buscando as situações mais desfavoráveis no dimensionamento.

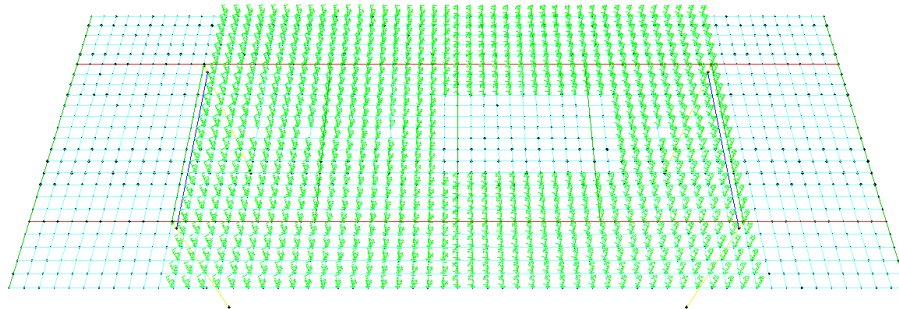
O peso total do veículo normativo é de 450 kN, dessa forma, a carga final em cada uma das seis rodas será de 75 kN.

3.2.2 Carregamento distribuído (Pelotão)

Conforme apresentado no item 2.4.2.1 a norma NBR 7188 (ABNT, 2013) determina a utilização de uma carga distribuída de 5kN/m², ao longo de toda a pista de rolamento, excluindo as regiões onde seu efeito é favorável. A carga distribuída pode ser utilizada sobreposta ao veículo normativo, desde que seja descontado no peso bruto total do veículo. Neste trabalho optou-se por não utilizar a carga distribuída sobre a área ocupada pelo veículo normativo ou pelo veículo real.

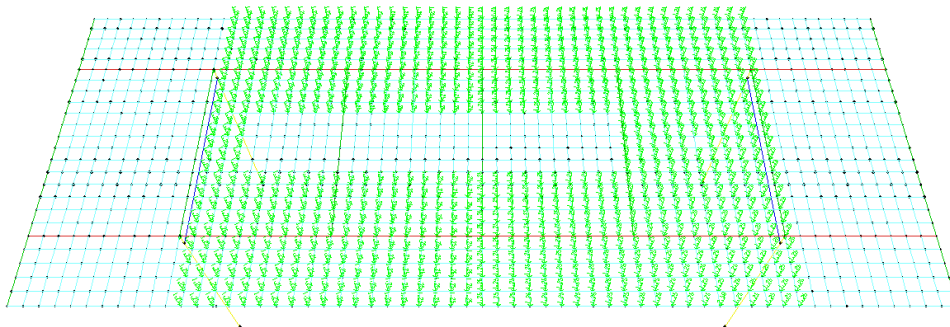
Foi utilizado o carregamento de pelotão tanto para o veículo real quanto para o veículo normativo, cada carregamento deve respeitar as superfícies de influências e a geometria dos veículos. As Figuras 28 e 29 representam o carregamento distribuído para o veículo normativo e para o veículo real, respectivamente, para determinação do máximo momento fletor positivo, na laje.

Figura 28 - Carregamento distribuído, para o máximo momento fletor positivo na laje, junto ao veículo normativo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Carregamento distribuído, para o máximo momento fletor positivo na laje, junto ao veículo real -3S3.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Veículo real utilizado

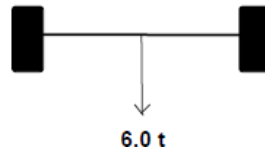
Conforme o estudo realizado por Ferreira (2006), o veículo 3S3 apresentou a probabilidade de possuir o peso bruto total, com um tempo de recorrência de 50 anos, igual a 1009 KN (100,9 tf), sendo que o peso máximo permitido é de 450 KN. Outro fato importante é que, em alguns casos, o veículo 3S3 superou a norma ABNT NBR 7188/1982 no estudo feito por Rossigali (2013), ressaltando que este autor adotou valores de carregamento atuais, dessa forma, caso a estimativa de Ferreira (2006) venha a ocorrer, os valores dos esforços podem ser ainda maiores.

O veículo real utilizado neste estudo foi o 3S3 curto, modelo basculante, a justificativa está no fato de ser um veículo compacto, capaz de transportar uma

carga muito superior ao estabelecido pelo DNIT (2012), e presente nas rodovias e vias urbanas.

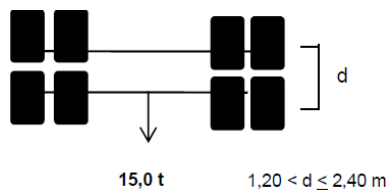
Os eixos que compõem o veículo, juntamente com sua respectiva carga máxima de norma, podem ser observados nas Figuras 30, 31 e 32.

Figura 30 - Eixo 1: Dianteiro do Cavalotratador



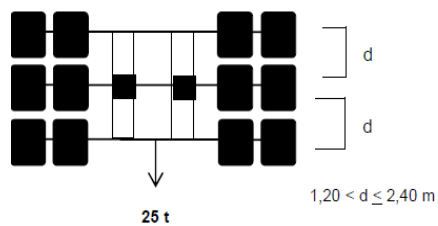
Fonte: DNIT (2012)

Figura 31 - Eixo 2: Traseiro do Cavalotratador



Fonte: DNIT (2012)

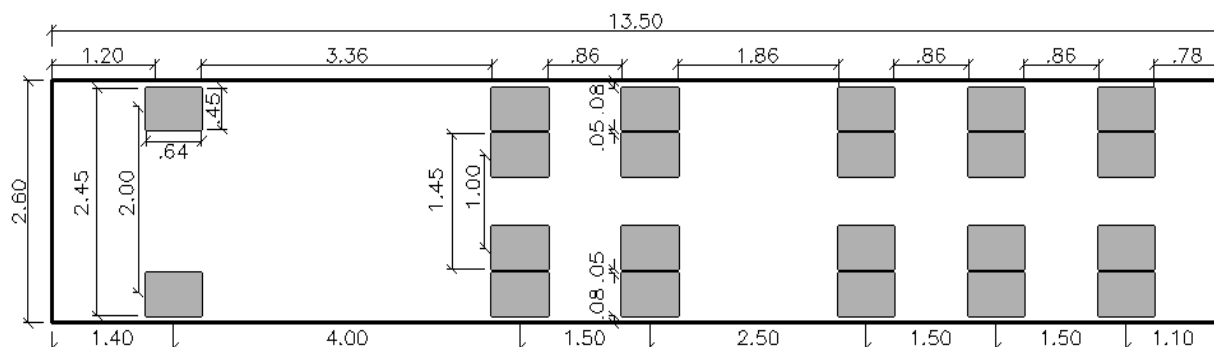
Figura 32 - Eixo 3: Reboque



Fonte: DNIT (2012)

A projeção vertical do veículo real, utilizado no trabalho, é apresentada na Figura 33.

Figura 33 - Projeção vertical do veículo real.



Fonte: Próprio Auto

3.2.3.1 Determinação do peso bruto total do veículo real

Conforme apresentado no item 2.2.1 o limite do peso bruto total, do veículo real 3S3, é 45 toneladas, podendo ter mais 5% de tolerância devido a imprecisão nas balanças, porém como apresentado no item 2.2.4 este limite não é respeitado, alcançando valores de até 60 toneladas.

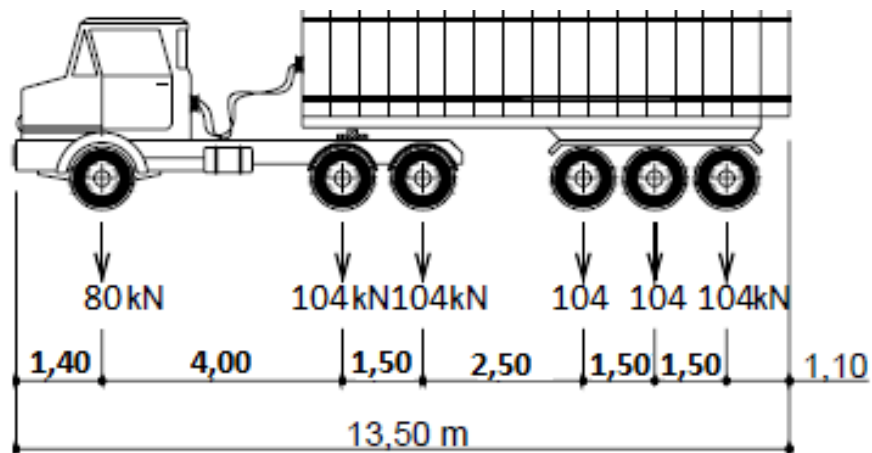
Ferreira (2006) fez uma estimativa numérica do peso bruto total para algumas classes de veículos, tendo um período de retorno de 50 anos, chegando a conclusão que neste período poderá ocorrer veículos da classe 3S3 circulando nas rodovias nacionais com carga de 1009,1 KN.

Neste trabalho optou-se por utilizar dados atuais, sendo assim o peso bruto total utilizado é de 60 toneladas.

3.2.3.2 Idealização de distribuição das cargas.

O valor das cargas por eixo encontra-se na Figura 34, esse valor é distribuído igualmente entre as rodas dos eixos, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 34 - Distribuição do PBT entre os eixos do veículo 3S3



Fonte: Editado de Ferreira (2006, p.124)

3.2.4 Coeficientes de majoração e ponderação utilizados nos cálculos

A estrutura idealizada em estudo é em concreto armado e possui duas faixas de rolamento, sendo a distância entre as vigas principais igual a 7 metros e entre as transversinas de 5 metros. Estes parâmetros resultam nos seguintes coeficientes:

- a) CIV - Coeficiente de impacto vertical = 1,37
- b) CNF - Coeficiente do número de faixas = 1,00
- c) CIA - Coeficiente de impacto adicional = 1,25

Os coeficientes, CIV, CNF e CIA, foram obtidos através da norma NBR 7188 (ABNT, 2013), conforme descrito na seção 2.4.2, resultando no coeficiente final de ponderação igual a 1,715 para distâncias de até 5 metros das extremidades do tabuleiro e 1,37 para o restante do tabuleiro.

3.3 Carregamento estático

O peso próprio da estrutura é considerado automaticamente pelo software, através da geometria, seções transversais dos elementos e definição dos materiais. Foram acrescentados outros dois tipos de carregamentos:

- a) Carregamento distribuído proveniente da barreira (5,825 kN/m);
- b) Carregamento distribuído proveniente do possível recapeamento do pavimento (2 kN/m²).
- c) Sobre as vigas de reforço das cortinas serão considerados o peso do solo. Sendo o solo do tipo argiloso com densidade igual a 17.6 kN/m³.

3.4.0 Ações não atuantes na superestrutura

As obras de artes estão sujeitas a diversas ações resultantes do peso próprio, carregamento das cargas móveis e outras ações externas. Neste trabalho foram analisadas as ações que gerem esforços significativos nas vigas e lajes, desta forma os esforços gerados pela frenagem/aceleração e força centrífuga não foram consideradas, a explicação encontra-se descrito nas seções 3.4.1 e 3.4.2.

3.4.1 Frenagem e aceleração

Conforme a norma NBR 7188 (ABNT, 2013), as forças de frenagem e aceleração são consideradas apenas no sentido horizontal, desprezando os esforços verticais. Estes esforços influenciam no cálculo da infraestrutura (pilares), mas seus efeitos são pouco significativos no cálculo do tabuleiro.

3.4.2 Força centrífuga

Conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013), a força centrífuga é desconsiderada para raios superiores a 1500 metros, devido ao fato da ponte estudada não possuir curvas horizontais e verticais, não foi considerado nenhuma força de ação centrífuga.

3.5.0 Combinação dos esforços

No projeto é necessário garantir a integridade da estrutura nas mais diversas situações, resumidas nos estados limites último (ELU) e de serviço (ELS). As

combinações são expostas na NBR 7187 (ABNT, 2003) e definidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.5.1 Estado limite último

O ELU corresponde ao esgotamento da capacidade da estrutura de resistir aos esforços, correspondendo a: ruptura das seções, colapso da estrutura, etc.

No ELU foram utilizadas as combinações últimas normais, conforme as equações:

$$\text{Para combinações desfavoráveis: } F_{du} = 1,35g + 1,5q \quad \dots(4)$$

$$\text{Para combinações favoráveis: } F_{du} = 1g + 1,5q \quad \dots(5)$$

Em que:

F_{du} é o esforço final combinado;

g é o esforço proveniente das cargas permanentes;

q é o esforço proveniente das cargas variáveis.

3.5.2 Estado limite de serviço

O ELS tem como finalidade garantir o desempenho da estrutura, conforto, aparência, etc. Evitando deformações e deslocamentos excessivos, vibrações e fissuras acima do aceitável.

No ELS foram utilizadas as combinações frequentes, conforme as equações a seguir:

$$\text{Para combinações desfavoráveis: } F_{du} = 1g + 0,8q \quad \dots(6)$$

$$\text{Para combinações favoráveis: } F_{du} = 1g \quad \dots(7)$$

Em que:

F_{du} é o esforço final combinado;

g é o esforço proveniente das cargas permanentes;

q é o esforço proveniente das cargas variáveis.

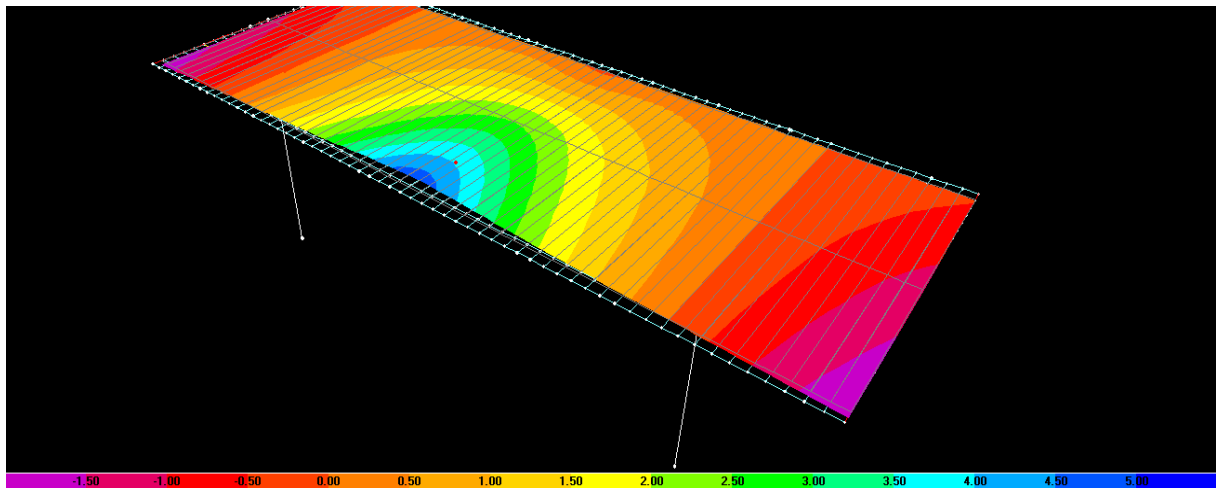
4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os esforços de momento fletor e força cortante gerados na superestrutura, tendo como objetivo central a comparação das combinações dos estrados limites último e de serviço.

4.1 Superfície de influência.

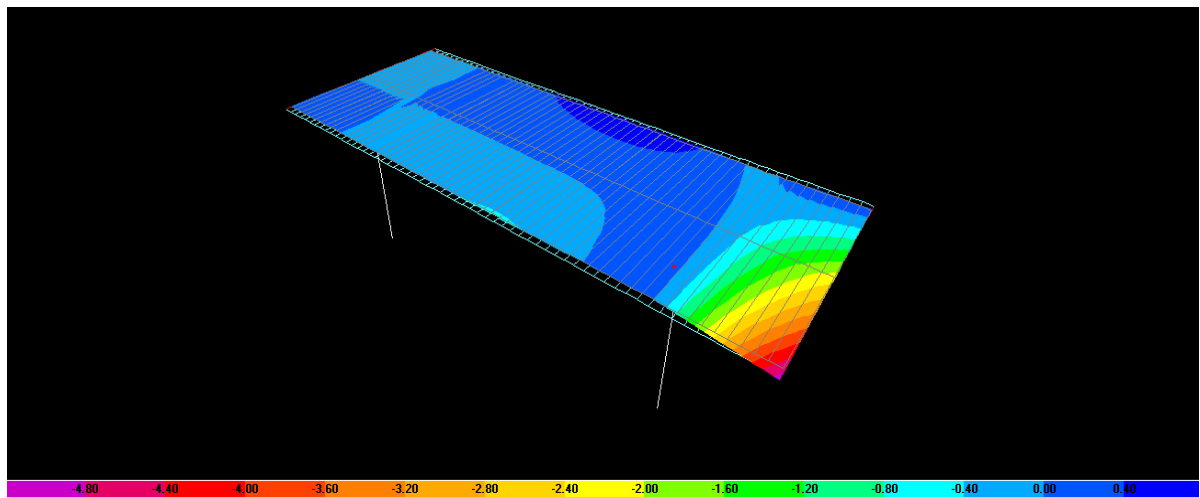
Após a modelagem da estrutura no software, foram obtidas as superfícies de influência para os pontos críticos da estrutura, conforme apresentados nas Figuras 35, 36 e 37. Essas superfícies foram usadas para determinar as regiões a serem carregadas com os carregamentos móveis de maneira a obter os esforços mais desfavoráveis para cada seção.

Figura 35 - Superfície de influência para o máximo momento fletor positivo em uma das vigas principais.



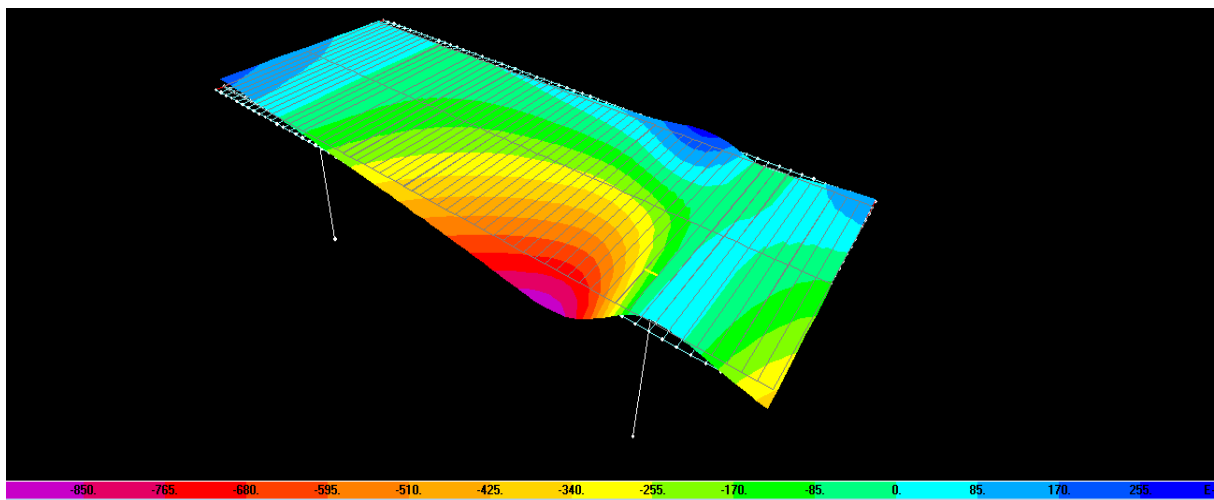
Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 - Superfície de influência para o máximo momento fletor negativo em uma das vigas principais.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 37 - Superfície de influência para o máximo cortante na viga principal.



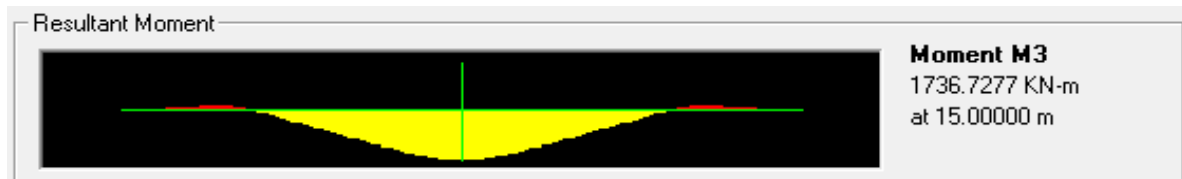
Fonte: Elaboração própria.

4.2 Resultados obtidos

Utilizando a superfície de influência apresentadas no item 4.1 e a distribuição de cargas móveis de forma a alcançar os máximos esforços, foi possível obter os máximos momentos fletores e esforços cortantes gerados na viga, bem como, o máximo momento fletor positivo, gerado no centro da laje.

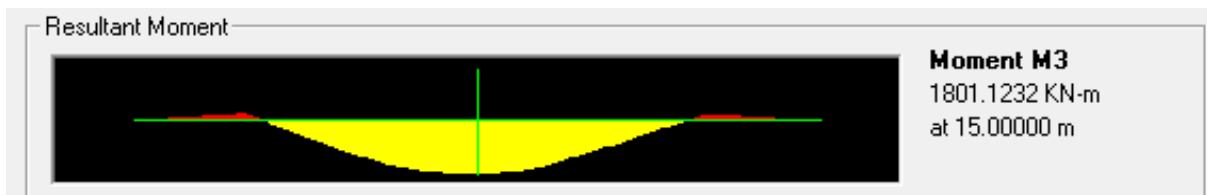
A Figura 38 apresenta o diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado em uma das longarinas pelo trem-tipo, já a Figura 39 apresenta o mesmo diagrama gerado pelo veículo real 3S3 de 60 toneladas.

Figura 38 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

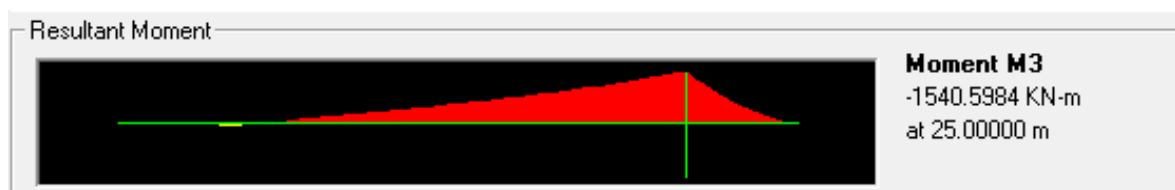
Figura 39 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo veículo real, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

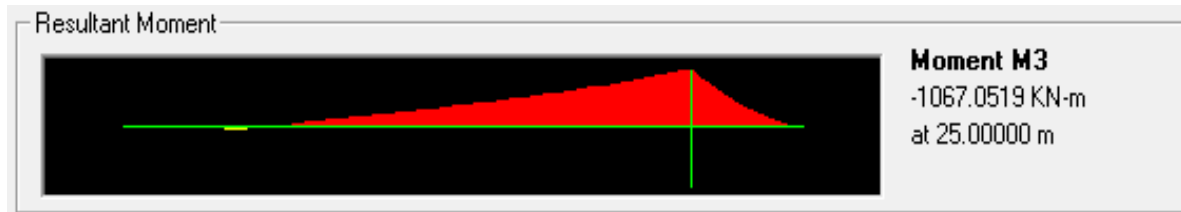
A Figura 40 apresenta o diagrama do máximo momento fletor negativo, gerado em uma das longarinas pelo trem-tipo, já a Figura 41 apresenta o mesmo diagrama gerado pelo veículo real 3S3 de 60 toneladas.

Figura 40 - Diagrama do máximo momento fletor negativo, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

Figura 41 - Diagrama do máximo momento fletor negativo, gerado pelo veículo real, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 42 apresenta o diagrama do esforço cortante gerado em uma das longarinas pelo trem-tipo, já a Figura 43 apresenta o mesmo diagrama gerado pelo veículo real 3S3 de 60 toneladas.

Figura 42 - Diagrama do máximo esforço cortante, gerado pelo trem-tipo, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 - Diagrama do máximo esforço cortante, gerado pelo veículo real, na viga principal.



Fonte: Elaboração própria

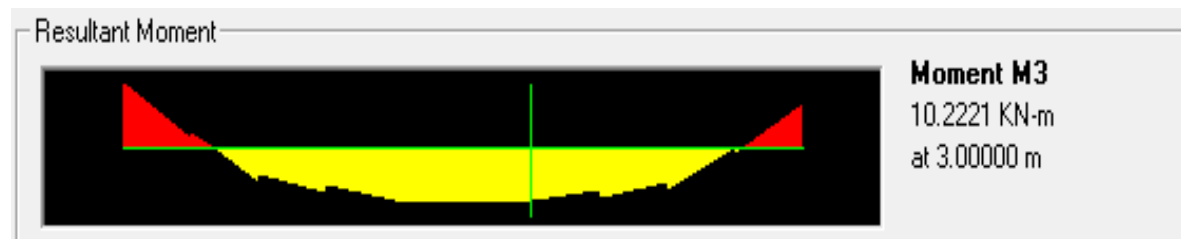
A Figura 44 apresenta o diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado em uma das lajes pelo trem-tipo, já a Figura 45 apresenta o mesmo diagrama gerado pelo veículo real 3S3 de 60 toneladas.

Figura 44 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo trem-tipo, na laje.



Fonte: Elaboração própria

Figura 45 - Diagrama do máximo momento fletor positivo, gerado pelo veículo real, na laje.



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 8 estão resumidos os máximos esforços obtidos com: o peso próprio da estrutura junto com seus elementos permanentes e com o carregamento accidental: trem-tipo, veículo real e com o a carga distribuída (pelotão). Os esforços accidentais foram multiplicados pelo coeficiente de majoração, igual a 1,715 ou 1,37, conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013), apresentado no item 2.4.2.2.

Tabela 8 - Principais esforços obtidos na estrutura.

Resumo dos principais esforços analisados na estrutura								
Local	No Longarina, sobre o apoio de fundação.		Na longarina, no meio do vão central.		Na longarina, sobre o apoio de fundação.		No centro da laje	
Esforços	Ng + (KN.m)	Nq + (KN.m)	Mg + (KN.m)	Mq + (KN.m)	Mg - (KN.m)	Mq - (KN.m)	Mg + (KN.m)	Mq + (KN.m)
Peso Próprio	720,53	-	2.074,82	-	1.836,64	-	16,04	-
Veículo normativo	-	-514,26	-	2.382,67	-	2.641,99	-	35,18
Veículo real - 3S3	-	-560,17	-	2.471,01	-	1.829,90	-	28,04
Pelotão V. normativo	-	-299,96	-	2.080,89	-	623,39	-	9,60
Pelotão V. real - 3S3	-	-259,42	-	1.470,54	-	631,65	-	10,86

Fonte: Elaboração própria

4.3 Combinações dos E.LU e E.LS

De acordo com a superfície de influência, foi possível determinar o posicionamento das cargas móveis, de forma a obter os máximos esforços para cada seção analisada. Com os resultados dos esforços apresentados na Tabela 8 e utilizando as equações apresentadas no item 3.5 foi possível fazer as combinações de Estado Limite Último (E.L.U.) e Estado Limite de Serviço (E.L.S.), os resultados obtidos para cada combinação são apresentados nas tabelas 9 a 12. Além dos valores das combinações foi apresentada a relação entre o esforço do trem-tipo e o veículo real, entendida como o fator de segurança ou folga disponível.

Tabela 9 - Máximo esforço cortante na viga principal.

Máximo cortante na longarina. (KN)		
	Comb. E.L.U	Comb. E.L.S
Norma	-2.085,00	-1.566,20
Veículo 3S3	-2.092,85	-1.570,12
Segurança	0,99	0,99

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 - Máximo momento fletor positivo na viga principal.

Máximo momento positivo na longarina. (KN.m)		
	Comb. E.L.U	Comb. E.L.S
Norma	8.901,30	6.054,50
Veículo 3S3	8.187,89	5.674,01
Segurança	1,09	1,07

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11 - Máximo momento fletor negativo na viga principal.

Máximo momento negativo na longarina. (KN.m)		
	Comb. E.L.U	Comb. E.L.S
Norma	7.377,53	5.091,77
Veículo 3S3	6.171,80	4.448,71
Segurança	1,20	1,14

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12 - Máximo momento fletor positivo na laje.

Resumo máximo momento positivo na laje. (KN.m)		
	Comb. E.L.U	Comb. E.L.S
Norma	82,85 kN.m	54,29 kN.m
Veículo 3S3	74,82 kN.m	50,01 kN.m
Segurança	1,11	1,09

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Análise dos resultados.

Na sequência são discutidos os resultados encontrados para cada uma das seções críticas avaliadas no item anterior.

4.3.1 Máximo esforço cortante na viga principal

O máximo esforço cortante na longarina está situado sobre um dos apoios, o esforço gerado pelo veículo real ultrapassou o esforço normativo, uma vez que a

superfície de influência, apresentada na Figura 37, é grande suficiente para abrigar todos os eixos, de forma a maximizar os esforços gerados na estrutura.

O fator de segurança obtido foi de 0,996 e 0,998, para combinações de estados limite último e de estado limite de serviço, respectivamente, pode-se afirmar que para esta estrutura de ponte analisada, os veículos real e normativo apresentaram resultados muito próximos, sendo assim o trem-tipo não possui real desvantagem quanto ao cálculo estrutural.

4.3.2 Máximo momento fletor positivo na viga principal

O máximo momento fletor positivo na viga está situado no centro do vão principal, a superfície de influência para este esforço é apresentada na Figura 36, o trem-tipo apresentou um fator de segurança entre 1,09 e 1,07 para as combinações: estado limite último e estado limite de serviço, respectivamente.

De acordo com a Tabela 8, se fosse desconsiderado o carregamento distribuído em ambos os casos, o veículo normativo apresentaria um fator de segurança igual à 0,98 e 0,99 para as combinações: estado limite último e estado limite de serviço, respectivamente. Este resultado demonstra a importância da carga distribuída para o cálculo dos esforços.

4.3.3 Máximo momento fletor negativo na viga principal

O trem-tipo obteve maior coeficiente de segurança, para o máximo momento fletor negativo na viga principal, localizado acima de um dos apoios, já que seus eixos são compactos o bastante, para ter todo o seu peso bruto sobre a área crítica, apresentada na superfície de influência de acordo com a Figura 35. O veículo real por sua vez obteve valores bem abaixo do veículo real, uma vez que o seu comprimento é de 13,50 metros, desta forma apenas o conjunto de eixos traseiros pôde ser posicionado sobre a estrutura, sendo assim, apenas 312 kN dos 600 kN contribuíram para gerar o máximo esforço referentes ao veículo real. O fator de segurança foi de 1,20 e 1,14 para os estados limites último e de serviço, respectivamente.

4.3.4 Máximo momento fletor positivo na laje central

Para alcançar os máximos valores de momento fletor positivo na laje, é necessário respeitar a superfície de influência, localizada entre os apoios, desta forma o trem-tipo gerou esforços superiores ao veículo real, já que seus eixos são curtos o bastante para ter todo o seu peso bruto sobre os pontos mais críticos, o que não foi possível fazer com o veículo real, uma vez que seu comprimento é de 13,50 metros. O fator de segurança é de 1,11 e 1,09 para os estados limites último e de serviço, respectivamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos órgãos DAER/RS e DNER foi possível construir um modelo de ponte atual na legislação estadual do Rio Grande do Sul e na legislação federal, respectivamente. Desta forma a largura total da obra de arte é de 12 metros, para classe de projeto III.

A seção longitudinal da obra de arte foi definida de forma a representar o máximo número de pontes nacionais, utilizando dados obtidos de Mendes (2009). A seção longitudinal possui um comprimento total de 30 metros, 20 metros de vão central e dois balanços de 5 metros cada lado.

A escolha e adoção do veículo real 3S3 foi de acordo com a referência dos autores Rossigali (2013) e Ferreira (2006), que indicaram esta classe de veículo real como sendo mais prejudicial que o veículo normativo da obsoleta norma NBR 7188 (ABNT, 1982). A determinação do peso bruto total do veículo foi de 60 toneladas, cujo valor foi encontrado através das pesquisas feitas por Ferreira (2006).

Com o auxílio do software SAP2000 v12 foi possível determinar a superfície de influência para os principais esforços: esforço cortante, momento fletor positivo e negativo na viga principal e momento fletor positivo na laje.

Os resultados obtidos demonstraram que em todos os casos a norma apresentou segurança próxima ou superior, ao modelo proposto neste trabalho, esse fato é explicado devido ao tamanho reduzido do veículo normativo frente ao veículo real. Ressalta-se a importância da carga distribuída, na determinação dos esforços e na importância do espaçamento entre os eixos do veículo real, para que o mesmo não ofereça riscos estruturais significativos à estrutura.

Sugestão para trabalhos futuros

Ressalta-se que o principal condicionante no projeto de uma estrutura é a garantia da sua vida útil, desta forma o efeito da fadiga é indispensável, neste trabalho atentou-se apenas para os esforços imediatos, desconsiderando a fadiga que cada combinação poderá gerar na estrutura, sendo assim é necessário fazer a verificação da fadiga para ambas as combinações e revalidar a segurança do trem-tipo.

Analisar estruturas com vãos e modelos estruturais diferentes da analisada neste trabalho.

Verificar a passagem de veículos com carga móvel, (combustível, leite etc), pois os efeitos dinâmicos do fluídos podem ocasionar maiores esforços sobre a estrutura.

Utilizar outros métodos de cálculo para verificar o efeito dinâmico da passagem consecutivas das rodas sobre a ponte, já que devido à ressonância imposta sobre a estrutura esses esforços podem ser ampliados.

Verificar outros veículos reais com sobrecarga de peso.

Verificar a passagem simultâneas de veículos reais sobre a estrutura.

REFERENCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - **Projeto de execução de obras de concreto armado** - Rio de Janeiro, 2014.

____. NBR 6120: **Cargas para o Cálculo de Estruturas e Edificações**. Rio de Janeiro, 1980

____. *NBR 7187: Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido*. Rio de Janeiro, 2003.

____. *NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Rio de Janeiro, 1982.

____. *NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Rio de Janeiro, 2013.

____. *NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas*. Rio de Janeiro, 2003.

Borges R. C. N. Consultoria Legislativa. **FISCALIZAÇÃO DE EXCESSO DE PESO EM RODOVIAS**. Brasília, DF. Setembro 2012

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER **Manual de projeto de obras-de-arte especiais**. Rio de Janeiro: Diretoria de desenvolvimento tecnológico, Divisão de capacitação tecnológica, 1996.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 109/2009 – PRO - **Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário - Projeto de barreiras de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. IPR 744. **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE CARGAS MÓVEIS PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA EM PONTES RODOVIÁRIAS**. Rio de Janeiro. 2010

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT.- **Noticias, 2011**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/noticias/balancas-nas-rodovias->

induzem-adequacao-do-volume-de-cargas-transportadas>. Acesso em: 13 novembro 2016.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT – DIRETORIA DE INFRA-ESTRUTURA RODOVIÁRIA – COORDENAÇÃO GERAL DE OPERAÇÕES RODOVIÁRIAS – **QUADRO DE FABRICANTES DE VEÍCULOS**. Abril, 2012.

Carrodegaragem - **Notas e informações**. Março de 2017. Disponível em: < <https://www.carrodegaragem.com/entenda-diferenca-entre-reboque-semi-reboque/> > Acesso em: 21 de março de 2017

CASTIGLIONI, J.A.M; PIGOZZO, L. **transporte e distribuição**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2014

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN (2004). **Resolução n. 12**, de 1998. Disponível em < <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/qfv%20pdf.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2016

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN (2004). **Resolução n. 164**, de 10 de setembro de 2004. Acresce parágrafo único ao art. 1º da Resolução CONTRAN 68/98. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br>>.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN (2004). **Resolução n. 526**, de 29 de abril de 2015. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br>>.

DAER. **Projeto Geométrico de Interseções**. Resolução nº 2.998 do Conselho Rodoviário do DAER - Sessão nº 1.824, dia 18 de abril de 1991. Porto Alegre

DAER **INSTRUÇÃO DE SERVIÇO PARA DETERMINAÇÃO DE GABARITO DE OBRAS-DE-ARTE ESPECIAIS** – IS-113/13 - Decisão nº 2.892 do Conselho Administração do DAER. Sessão nº 212, dia 12 de março de 2013 - Resolução nº 8289 do Conselho Rodoviário do DAER - Sessão nº 2.800, dia 09 de maio de 2013. Porto Alegre 2013

FERREIRA, L. M. **Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto**. 273 p. 2006. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MARCHETTI, O. **PONTES DE CONCRETO ARMADO**. 2011. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008.

MARTINS, I. S. **LEVANTAMENTO DAS CARGAS TRANSPORTADAS NO MODAL RODOVIÁRIO NA REGIÃO DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, Unipampa, Alegrete, RJ, Brasil, 2015

MENDES, P. D. T. C. **CONTRIBUIÇÕES PARA UM MODELO DE GESTÃO DE PONTES DE CONCRETO APLICADA À REDE DE RODOVIAS BRASILEIRAS**. (Tese de Doutorado). ed. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.', 2009.

O Estado de S. Paulo (2006)- **Notas e informações**. Setembro de 2016. São Paulo. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/imprensa/Clipping%2009092006%20s%E1bado.htm>
Acesso em: 13 de novembro de 2016

PIO, E. S. **Análise da influência da interação solo-estrutura sobre os esforços internos de uma longarina de uma ponte rodoviária de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Alegrete, Universidade Federal do Pampa, 2015.

ROSSIGALI, C. E. **Estudos Probabilísticos para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

ROSSIGALI, C. E. **Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013

SANTOS, L. F. **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE CARGAS MÓVEIS PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA EM PONTES RODOVIÁRIAS**. Trabalho de conclusão de curso, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013

SPERNAU, W. **ECV-5260 Pontes**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. [19--].

VITÓRIO, J. A. P. **CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INSPEÇÃO, MANUTENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS**, Recife, 2015.