



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Alessandro Alves dos Santos

Análise Comparativa de Modelos de Cargas Móveis em Pontes

São Cristóvão - SE
2021

Alessandro Alves dos Santos

Análise Comparativa de Modelos de Cargas Móveis em Pontes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe (UFS), para a conclusão da graduação e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos

São Cristóvão - SE
2021

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

SANTOS, Alessandro Alves dos

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE CARGAS MÓVEIS EM
PONTES / Alessandro Alves dos Santos.

São Cristóvão, 2021

53 p.: il.

Trabalho Acadêmico Orientado. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia,
Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

I. Universidade Federal de Sergipe

II. Análise comparativa de modelos de cargas móveis em pontes

Alessandro Alves dos Santos

Análise Comparativa de Modelos de Cargas Móveis em Pontes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para a
conclusão da graduação e obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Banca Examinadora

Nota: _____
Professor Dr. Emerson Figueiredo dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador)

Nota: _____
Professor Dr. Carlos Eduardo Rossigali – Universidade Federal do Paraná
(Examinador 1)

Nota: _____
Professor Me. Fernando Luiz de Bragança Ferro – Universidade Federal de Sergipe
(Examinador 2)

São Cristóvão – SE
2021

Esta é a chave de ouro que eu entrego aos meus pais. Eu serei eternamente grato aos esforços incansáveis de cada um para que eu pudesse me tornar um ser humano melhor.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os esforços estáticos na estrutura de uma obra-de-arte mediante a aplicação da carga móvel presente na NBR 7188/2013 e um comboio de veículos, elaborado de acordo com uma base reduzida de dados rodoviários. O estudo tende a analisar a influência do veículo proposto pela norma nos esforços de dimensionamento das longarinas de uma ponte. Para isso, foi proposto que a carga móvel atuasse restritamente na mesma porção de espaço que o comboio de veículos ocupasse durante o trânsito da ponte. Para a obtenção dos esforços, o método escolhido foi o de elementos finitos através da modelagem tridimensional fornecida pelo *software* Autodesk ROBOT. Diante do estudo acerca dos esforços solicitantes gerados para cada situação imposta, foi possível perceber que o comboio de veículos apresentou valores consideravelmente menores tanto para o esforço cortante, como para o momento fletor positivo na longarina da obra-de-arte.

Palavras-chave: pontes, longarinas, carga móvel, modelo tridimensional.

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis between the static forces in the reinforced concrete bridge through the application of the mobile load present in Brazilian standard NBR 7188/2013 and a vehicle convoy, elaborated according to a reduced database of road. The study objective is to analyze the influence of the vehicle proposed by the Brazilian standard on the design efforts on the long-span beam of a bridge. For this, it was proposed that the mobile load would act strictly in the same portion of space that the vehicle convoy occupied during the bridge's transit. To obtain the efforts, it was used the finite element method through three-dimensional modeling provided by Autodesk ROBOT software. In view of the study about the requesting efforts generated for each imposed situation, it was possible to notice that the vehicle convoy presented considerably lower values both for the shear effort, as for the positive bending moment of the in the long-span beam of the bridge.

Keywords: bridges, long-span beam, vehicle convoy, three-dimensional model.

Lista de Figuras

Figura 1: Matriz de transporte de cargas no Brasil	12
Figura 2: Veículos da NB-6/1943	15
Figura 3: Veículos 36 e 24 (Esquerda) e 12 (Direita)	16
Figura 4: Veículos utilizados na NBR 7188/1984	17
Figura 5: Características dos Veículos na NBR 7188/1994.....	18
Figura 6: Veículo TB-450 disposto na NBR 7188/2013.....	19
Figura 7: Disposição das Cargas na Ponte	21
Figura 8: Esquematisação da Repartição de Carga.....	22
Figura 9: Esquema de Linha de Influência para Longarinas Externas.....	23
Figura 10: Geometria da Ponte com Duas Longarinas	23
Figura 11: Aplicação da Carga Móvel na Obra-de-Arte	24
Figura 12: Resultado da Análise Comparativa da Ponte com Duas Longarinas.....	24
Figura 13: Tabela Comparativa das Cargas de Classes Veiculares com a Carga de Multidão da NBR 7188/2013	25
Figura 14: Configurações utilizadas na base reduzida	27
Figura 15: Composição do tráfego para a base H-2013.....	28
Figura 16: Cenários de tráfego de fluxo livre para situações de projeto.....	29
Figura 17: Corte Transversal da Estrutura	30
Figura 18: Corte Longitudinal da Estrutura	30
Figura 19: Modelo Tridimensional da Estrutura.....	31
Figura 20: Vínculos Rígidos Utilizados na Estrutura	32
Figura 21: Obra-de-Arte em destaque e Estrutura de Transição.....	32
Figura 22: Interação Obra-de-Arte – Estrutura de Transição antes do Veículo transitar na Ponte	33
Figura 23: Interação Obra-de-Arte – Estrutura de Transição quando o Veículo transita na Ponte	33
Figura 24: Janela de Configuração da Carga Móvel no ROBOT	34
Figura 25: Disposição do TB-450 na Obra-de-Arte.....	35
Figura 26: Disposição Geométrica das Classes de Veículos.....	35
Figura 27: Janela de Configuração do Comboio no ROBOT	39
Figura 28: Região de Aplicação da Carga de Multidão na Obra-de-Arte.....	39
Figura 29: Ação da Combinação das Cargas da NBR na Ponte	41
Figura 30: Posicionamento da Carga Móvel no sentido transversal da Ponte	41
Figura 31: Parcela do Comboio na Obra-de-Arte	42
Figura 32: Posicionamento do Comboio no sentido transversal da Ponte	42
Figura 33: Malha de Nós para o Processamento de Cálculo.....	43
Figura 34: Esforço Cortante Positivo Máximo da Carga Normativa	44
Figura 35: Esforço Cortante Positivo Máximo do Comboio.....	44
Figura 36: Esforço Cortante Negativo Máximo da Carga Normativa	44
Figura 37: Esforço Cortante Negativo Máximo do Comboio.....	45
Figura 38: Momento Fletor Positivo Máximo da Carga Normativa	45

Figura 39: Momento Fletor Positivo Máximo do Comboio.....	46
Figura 40: Momento Fletor Negativo Máximo da Carga Normativa.....	46
Figura 41: Momento Fletor Negativo Máximo do Comboio	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Caracterização das Classes de Veículos da Base de Dados	26
Tabela 2: Dimensões das Classes de Veículos	36
Tabela 3: Discretização do Comboio	36
Tabela 4: Distribuição de Peso por Eixo	37
Tabela 5: Distribuição de Peso por Eixo para Semi-Reboques.....	37
Tabela 6: Cargas Concentradas por Conjunto de Rodas	37
Tabela 7: Cargas Concentradas por Conjunto de Rodas nos Semi-Reboques	37
Tabela 8: Ordem de Veículos Constituintes do Comboio	38
Tabela 9: Resumo dos Esforços Cortantes	45
Tabela 10: Resumo dos Momentos Fletores	47

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIA	Coeficiente de Impacto Adicional
CIV	Coeficiente de Impacto Vertical
CNF	Coeficiente de Número de Faixas
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CVC	Combinação de Veículos de Carga
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELU	Estado Limite Último
NBR/NB	Norma Brasileira
STPG	Simulador de Tráfego para Pontes em Grelhas

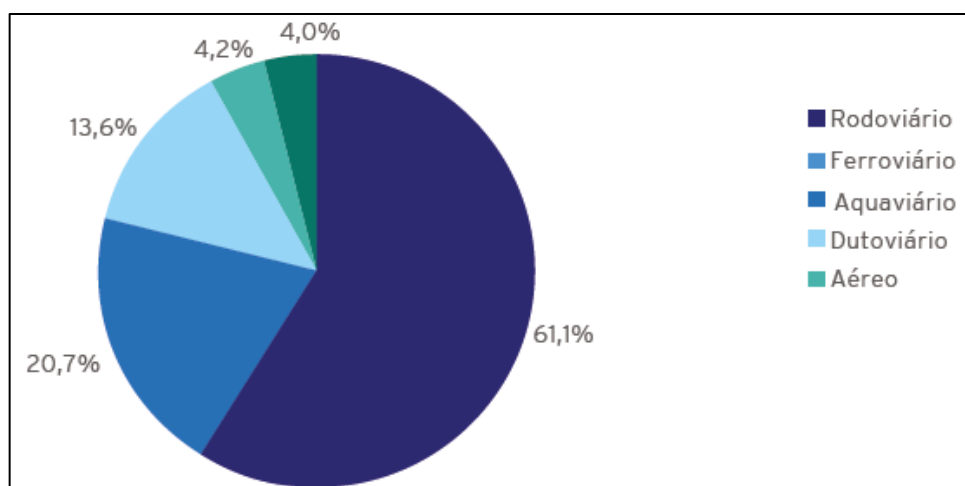
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1. NORMAS REGULAMENTADORAS	15
3.1.1. Um Breve Histórico	15
3.1.2. A NBR 7188/2013	18
3.2. DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS	20
3.2.1. Modelo Bidimensional	20
3.3. A MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1. MODELAGEM E CÁLCULO DA ESTRUTURA	30
4.2. MODELAGEM NO ROBOT	31
4.2.1. Estrutura.....	31
4.2.2. Cargas Atuantes	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1. ESFORÇO CORTANTE	43
5.2. MOMENTO FLETOR.....	45
6. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A - Cargas concentradas e as respectivas posições cartesianas	50

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas modais são de suma importância para qualquer país no mundo, pois são estes modais que são utilizados para o transporte de cargas. Por se tratar de um país com dimensões territoriais de escala continental, o Brasil é composto por vários destes sistemas. Atualmente, os sistemas existentes no país são: Rodoviário, Ferroviário, Aquaviário, Dutoviário e Aéreo. Segundo o levantamento realizado em 2019 pela Confederação Nacional do Transporte – CNT (BRASIL, 2019), o sistema rodoviário é responsável por 61,1% da matriz de transporte de cargas. Para sintetizar a importância do setor rodoviário, a Figura 1 mostra o gráfico com as contribuições de cada sistema no país.

Figura 1: Matriz de transporte de cargas no Brasil



Fonte: Confederação Nacional dos Transportes (2019)

Atrelado ao fato da superioridade no uso do sistema rodoviário brasileiro, neste mesmo levantamento feito pela CNT, foi observado um crescimento de 4,5% no fluxo de veículos pesados. Além disso, é notório salientar que em comparação a 2018, houve uma alta de 39,4% na quantidade de veículos pesados que foram licenciados no período de estudo. Há de se ressaltar que o crescimento deste setor varia de acordo com a volatilidade econômica do país (BRASIL, 2019).

Com o crescimento de vendas de veículos pesados, há o fato de que com o avanço da tecnologia, a frota de veículos presentes nas rodovias do país tende a se modernizar. Portanto, para uma melhor concepção, execução e manutenção das obras rodoviárias, é interessante que se faça um estudo que caracterize o tráfego real nas rodovias brasileiras.

É neste ambiente que se ressalta a importância dos postos de pesagem. De acordo com a última atualização do DNIT (BRASIL, 2010), dos 78 postos rodoviários existentes no país,

31 deles estão inoperantes. A escassez destes postos, somada com a extensa malha rodoviária do país, geram a problemática da deficiência na caracterização dos veículos que trafegam pelas rodovias. A utilização das balanças alia a identificação dos veículos pesados que compõem as rodovias com a fiscalização dos órgãos competentes com os regimentos presentes nas resoluções nº 210/06 (BRASIL, 2006a) e nº 211/06 (BRASIL, 2006b) do CONTRAN que dispõem sobre os limites de peso, dimensões dos veículos e requisitos para a Combinação de Veículos de Carga – CVC.

Diante deste cenário, faz-se necessário que as obras de infraestrutura rodoviária comportem essa demanda. Para o dimensionamento de pontes, a NBR 7188/2013 (ABNT, 2013) traz as diretrizes normativas para as cargas de projeto. Esta norma apresenta um veículo padrão para o dimensionamento da superestrutura da obra de arte. Os critérios para a elaboração do trem-tipo disposto nesta norma serão discutidos na fundamentação teórica.

Mediante a existência de veículos com diversas configurações de eixos e distribuição de peso, é de grande importância que haja a verificação quanto a adesão das especificações normativas para com o cenário de tráfego atual. Com esse estudo, será possível observar se o dimensionamento regido pela mesma está em consonância com as solicitações impostas por esta demanda de veículos pesados atuantes nas rodovias brasileiras.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre as solicitações impostas pela carga móvel disponibilizada pela NBR 7188/2013 e um comboio de veículos, no qual se utiliza uma quantidade de veículos pesados elaborada de acordo com os estudos de Rossigali (2006). Visando uma alternativa na metodologia de cálculo para as longarinas, será adotado um modelo tridimensional para uma melhor adesão dos resultados.

3. REVISÃO DA LITERATURA

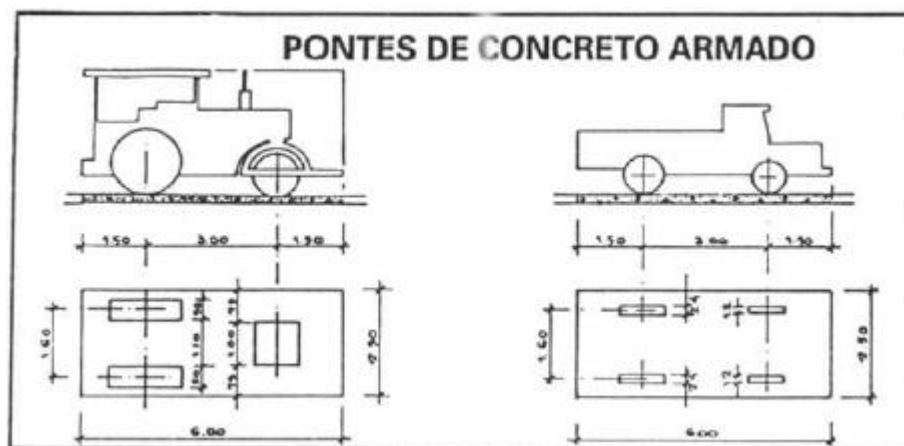
3.1. NORMAS REGULAMENTADORAS

3.1.1. Um Breve Histórico

- NB-6/1940

Na década de 1940, no Brasil, houve o surgimento da NB-1, a primeira norma regulamentadora da atuação de cargas em pontes. Com o passar da década, foram incrementadas outras normas para completar as diretrizes na NB-1. Em 1943 foi criada a NB-6: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias. O objetivo da norma era de regulamentar as cargas utilizadas no dimensionamento de acordo com a classe da rodovia em estudo. As cargas dispostas na norma eram compostas por caminhões, compressores e multidão. A carga de multidão tratava-se de uma carga distribuída que tinha como objetivo a simulação das cargas de veículos leves no tráfego da ponte. A Figura 2 indica os veículos utilizados para o dimensionamento.

Figura 2: Veículos da NB-6/1943



Fonte: ABNT (1943) *apud* Luchi (2006)

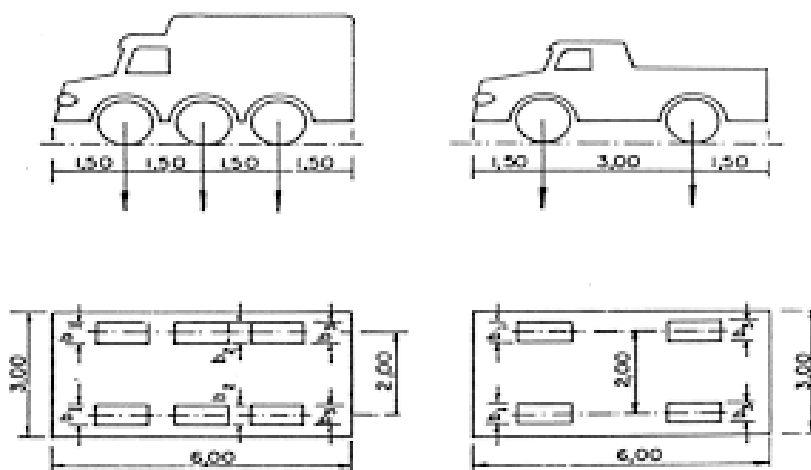
No que tange ao dimensionamento, a norma indicava que o trem-tipo fosse composto pela carga de multidão, de um compressor e de um número de caminhões para um número $n-1$ de faixas no leito carroçável. Estes veículos devem ser posicionados na condição mais desfavorável para o elemento estudado, além de estar posicionado na direção do tráfego.

Este era o procedimento padrão para o dimensionamento. Como dito, a norma elencava as rodovias por classes. Sendo assim, atrelado ao procedimento descrito, cada classe de rodovia tinha as suas particularidades no que tange aos tipos de veículos utilizados e as restrições impostas sobre a quantidade de veículos por faixa, o espaçamento e o tipo de compressor a ser utilizado para a verificação das estruturas.

- NB-6/1960

Já na década de 1960, a NB-6 foi atualizada para suprir as necessidades da época. Uma das mudanças implementadas foi a inserção de classes de veículos de acordo com as classes de rodovias que já eram utilizadas na NB-6/1943. Além dos veículos, cada classe de rodovia teria os valores de carga de multidão específicos. A Figura 3 mostra os veículos utilizados na NB-6/1960.

Figura 3: Veículos 36 e 24 (Esquerda) e 12 (Direita)



Fonte: Timerman e Beier (2012)

Cabe salientar que a utilização da carga distribuída se dá por toda a faixa de rolamento da ponte, com exceção da área utilizada pelo próprio veículo. As particularidades sobre a utilização de tal carga estão atreladas às dimensões do guarda-rodas.

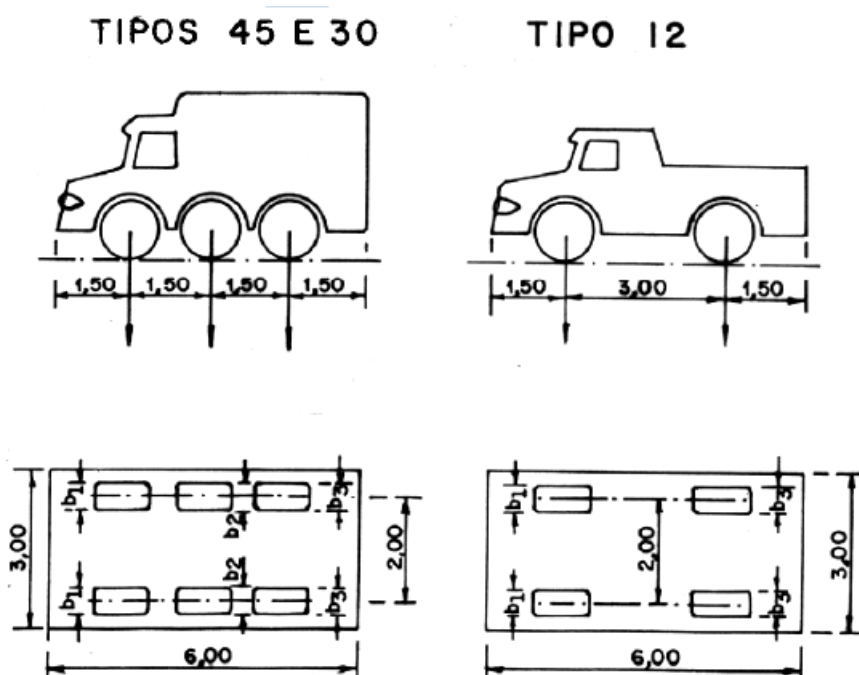
Nos procedimentos de cálculos, não houve mudanças significativas. Porém, para o cálculo dos elementos estruturais da ponte, é recomendado que a roda do trem-tipo esteja próxima ao guarda-roda.

- NBR 7188/1984

Nesta versão, houve a mudança nos pesos dos veículos utilizados. As cargas que antes eram de 240kN e 360kN foram alteradas para 300kN e 450kN, respectivamente. O intuito da mudança foi o atendimento a uma demanda maior e mais pesada nas rodovias brasileiras. Apesar da mudança nas cargas, as configurações de escolha dos veículos para o dimensionamento mantiveram-se de acordo com a necessidade da rodovia estudada.

De mesmo modo que a sua antecessora, os parâmetros utilizados para o cálculo foram mantidos nesta atualização. No eixo transversal da ponte, são utilizadas a carga de multidão, de passeio e a carga móvel. Além disso, houve a adição da possibilidade de homogeneizar o trem-tipo. Para que o trem-tipo final contivesse apenas um valor de carga distribuída, a norma recomendava que haja a subtração das cargas concentradas do veículo para que haja a compatibilização das cargas distribuídas. Porém, é necessário que não haja a diminuição das cargas finais do trem-tipo original. A Figura 4 indica os veículos utilizados nesta versão da norma, e a Figura 5 caracteriza a configuração de cada tipo destes veículos.

Figura 4: Veículos utilizados na NBR 7188/1984



Unid.: mm

Fonte: ABNT (1984)

Figura 5: Características dos Veículos na NBR 7188/1994

	Unidade	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total de veículo	kN-t _f	450 - 45	300 - 30	120 - 12
Peso de cada roda dianteira	kN-t _f	75 - 7,5	50 - 5	20 - 2
Peso de cada roda traseira	kN-t _f	75 - 7,5	50 - 5	40 - 4
Peso de cada roda intermediária	kN-t _f	75 - 7,5	50 - 5	-
Largura de contato b ₁ de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contato b ₃ de cada roda traseira	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contato b ₂ de cada roda intermediária	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m ²	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre os eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

Fonte: ABNT (1984)

Diante do histórico apresentado até a norma que antecede a NBR 7188/2013 (ABNT, 2013) e com a própria norma vigente, é fato inferir que desde a criação das normas para as cargas móveis, nunca houve alteração na quantidade de eixos dos veículos padrão. Com o avanço da necessidade de transporte de cargas, visto que este segmento move uma fatia da parte econômica do país, a evolução dos veículos pesados seria algo natural. Portanto, é sabido dizer que, neste ponto a norma, por segurança, não consegue retratar a realidade do tráfego brasileiro.

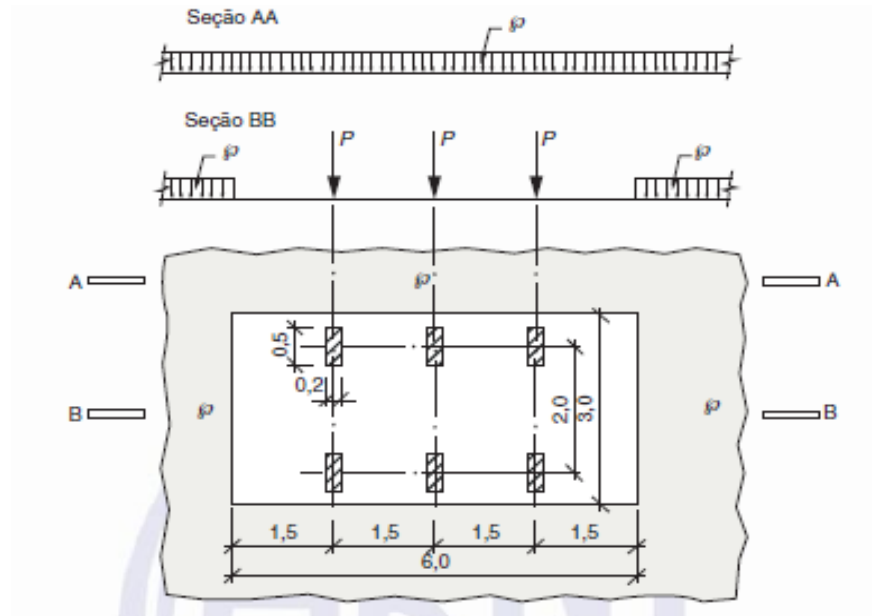
3.1.2. A NBR 7188/2013

Na sua atualização mediante a sua antecessora, foram inseridos alguns elementos que tangem as atuações das cargas horizontais e verticais na faixa de rolamento, cargas acidentais em pilares e a adição de coeficientes de majoração.

Antes de tudo, é necessário comentar a mudança no veículo padronizado pela norma. Nas normas anteriores, existiam a presença de diferentes tipos de veículos para as características de cada classe de rodovia. Nesta atualização, extinguiu-se a variedade de tipos de cargas móveis

e em substituição, houve a manutenção de um único veículo denominado como TB-450 cujo peso total é de 450kN e possui uma única carga de multidão no valor de 5kN/m². A Figura 6 indica a disposição do TB-450 e a atuação da carga de multidão no seu entorno.

Figura 6: Veículo TB-450 disposto na NBR 7188/2013



Fonte: ABNT (2013)

Vale ressaltar que a norma possibilita a utilização de um veículo denominado TB-240 cujo peso total é de 240kN e carga de multidão de 4 kN/m² para os casos de rodovias vicinais e obras particulares. Nos casos de pontes que apresentem faixa para trânsito de pedestres, é considerado uma carga distribuída de 3kN/m² em toda extensão transversal.

Para contabilizar os esforços gerados pelo efeito dinâmico do tráfego, foram adicionados coeficientes de majoração que levam em consideração a quantidade de faixas de tráfego, os vãos presentes na ponte e o tipo de material constituinte.

- Coeficiente de Impacto Vertical (CIV)

$CIV = 1,35$, para estruturas com vão menor do que 10,0 m;

$$CIV = 1 + 1,06 \times \left(\frac{20}{Liv+50} \right), \text{ para estruturas com vão entre 10,0 m e 200,0 m; } \quad (1)$$

Onde Liv é o vão em metros. O cálculo do Liv dependerá do tipo de estrutura analisada.

- Coeficiente de Número de Faixas (CNF)

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

Onde n é o número de faixas de tráfego na faixa de rolamento da estrutura.

- Coeficiente de Impacto Adicional (CIA)

Coeficiente referente ao material utilizado para a construção da estrutura. Seus valores característicos são:

$CIA = 1,25$, para estruturas em concreto ou mistas;

$CIA = 1,15$, para estruturas em aço;

Deste modo, as cargas concentradas e distribuídas de cálculo são obtidas a partir da seguinte equação:

$$Q = P \times CIV \times CNF \times CIA \quad (3)$$

$$q = p \times CIV \times CNF \times CIA \quad (4)$$

Onde:

Q é a carga concentrada estática ponderada expressa em kN;

P é a carga concentrada estática sem ponderação expressa em kN;

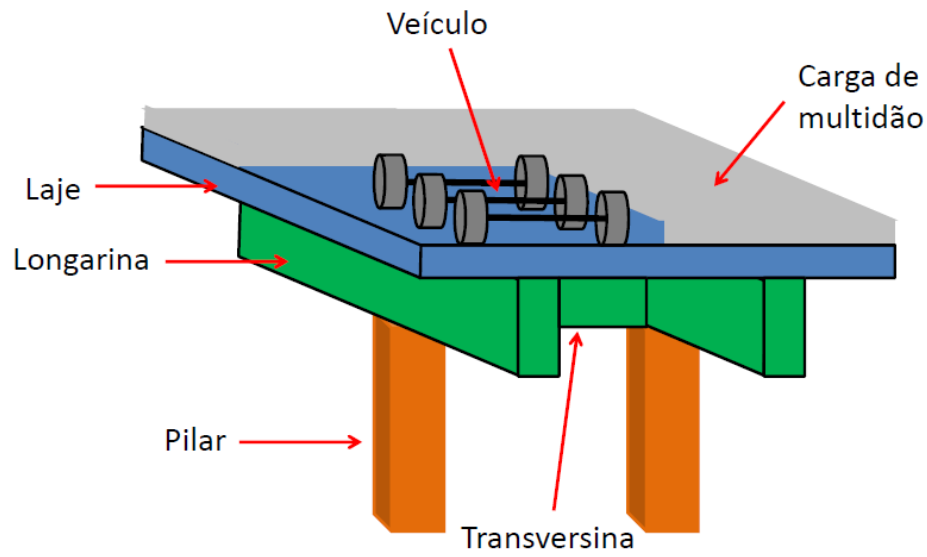
q é a carga distribuída ponderada expressa em kN/m²;

p é a carga distribuída sem majoração expressa em kN/m².

3.2. DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS

3.2.1. Modelo Bidimensional

Para a carga móvel disposta na Figura 7, a NBR 7188/2013 (ABNT, 2013) indica que o posicionamento das rodas deverá ser no local mais desfavorável do tabuleiro. Esta configuração implica em esforços mais intensos nas longarinas.

Figura 7: Disposição das Cargas na Ponte

Fonte: Santos (2021)

Criada em 1940, uma das metodologias mais utilizadas para a repartição de cargas nas longarinas é o de Engesser-Courbon. Em sua concepção, o método leva em consideração que a ponte é um sistema composto por longarinas paralelas, com inércias constantes e ligadas por transversinas cuja rigidez à flexão é infinita. Estas simplificações implicam em bons resultados em situações onde as deformações elásticas das transversinas apresentarem valores pequenos quando comparados com as deformações das longarinas. Deste modo, para a obtenção de resultados satisfatórios, o método requer que algumas condições sejam atendidas:

- O vão da ponte é superior a duas vezes a sua largura;
- A altura das transversinas é da mesma ordem de grandeza das longarinas;
- As espessuras das longarinas e das lajes são relativamente pequenas;
- $\lambda \leq 0,3$, onde:

$$\lambda = \frac{l}{2L} \sqrt[4]{\frac{L}{l} \times \frac{E \times \sum I_n}{E_T \times \sum I_{Tn}}} \quad (5)$$

Onde:

L é o comprimento do vão da ponte expresso em m;

l é a largura do tabuleiro (longarinas externas) expresso em m;

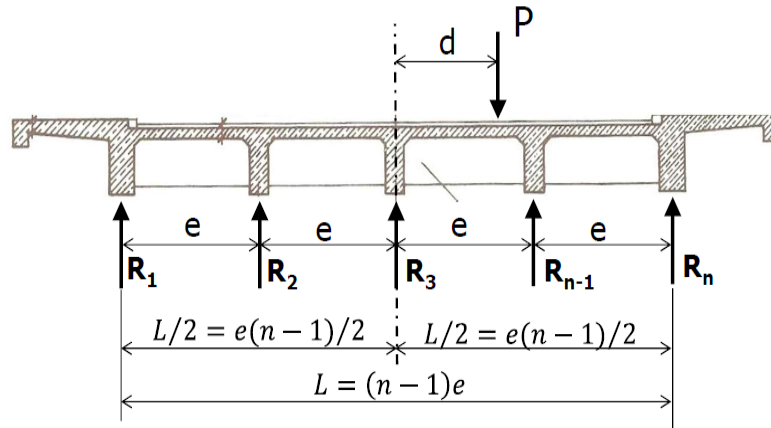
E é o módulo de elasticidade expresso em GPa;

I é o momento de inércia expresso em m^4 ;

T é o índice relacionado à transversina.

Uma vez que todas as condições são atendidas, os índices de repartição de cargas são calculados em função do número de longarinas, da sua respectiva ordem e posição da carga unitária em relação ao eixo. A Figura 8 esquematiza o cálculo para um número n de longarinas.

Figura 8: Esquematização da Repartição de Carga



Fonte: Santos (2021)

Desta forma, a parcela de repartição de carga para cada longarina é dada por:

$$r_i = \frac{1}{n} + 6 \left[\frac{2i - (n+1)}{2n(n+1)} \right] \frac{d}{\frac{L}{2}} \quad (6)$$

Onde:

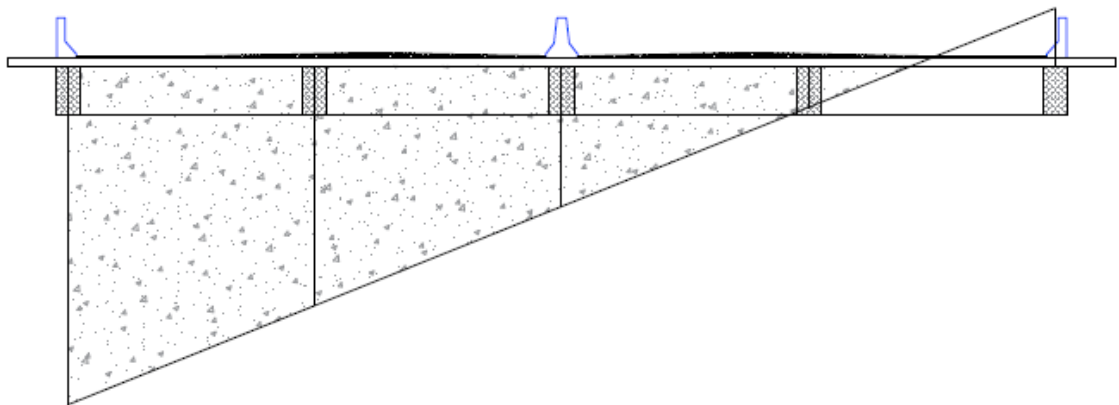
i é a ordem da longarina;

L é a distância das longarinas a serem analisadas expresso em m;

d é a distância da carga unitária em relação ao eixo expresso em m.

Como resultado do cálculo de repartição de carga, é gerada a linha de influência transversal para cada longarina analisada. A Figura 9 sintetiza um exemplo de linha de influência para longarinas externas.

Figura 9: Esquema de Linha de Influência para Longarinas Externas

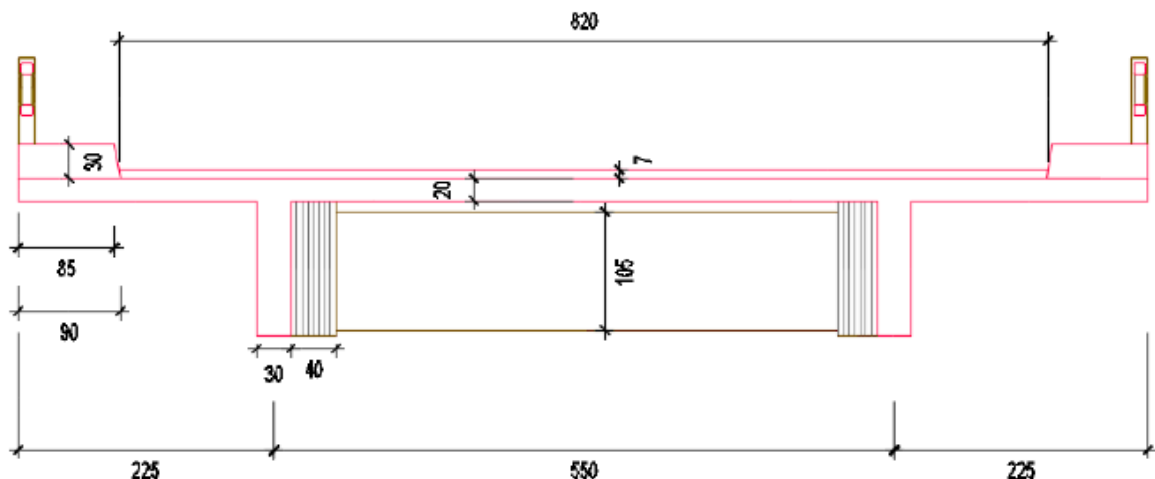


Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

As linhas de influência servem para definir o trem-tipo provenientes das cargas normativas. Como visto pela Figura 9, ao utilizar a linha em sua plenitude, o trem-tipo gerado não será o mais intenso devido ao tramo negativo que existe. Sendo assim, para configurar a carga mais intensa possível, é recomendável que utilize apenas o tramo positivo da linha de influência.

Com a atuação cada vez mais presente dos *softwares* que elaboram modelos tridimensionais para realizar os cálculos de estruturas, Santos (2021) propôs uma análise comparativa entre o dimensionamento de longarinas e lajes em 2D e 3D. Um dos seus objetos de estudo foi uma obra-de-arte composta por duas longarinas com transversinas desvinculadas à laje. A Figura 10 indica a geometria da estrutura utilizada.

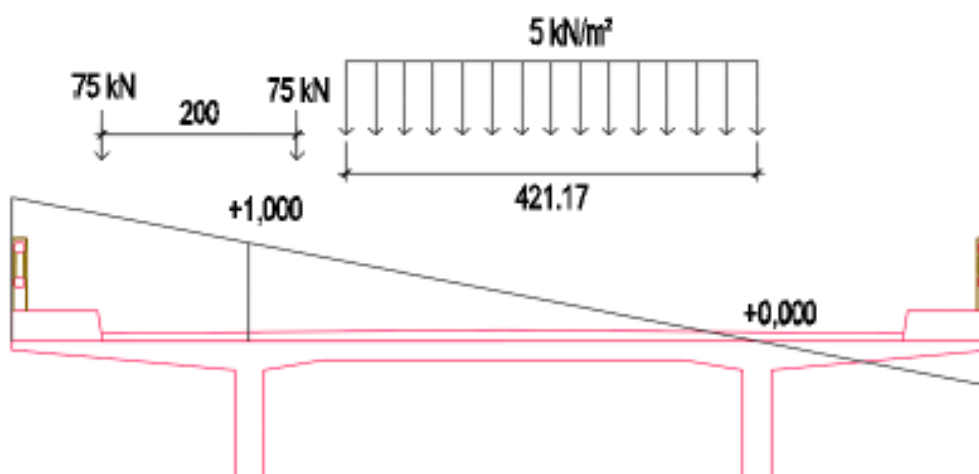
Figura 10: Geometria da Ponte com Duas Longarinas



Fonte: Santos (2021)

Na análise bidimensional, o método de repartição de carga utilizado foi o de Engesser-Courbon. Santos (2021) analisou os esforços gerados pelo veículo apresentado na NBR 7188/2013 e pela carga móvel em sua plenitude (veículo + carga de multidão) (Figura 11).

Figura 11: Aplicação da Carga Móvel na Obra-de-Arte



Fonte: Santos (2021)

De acordo com os resultados obtidos para as longarinas, os momentos fletores obtidos com o modelo tridimensional foram mais brandos que o método bidimensional. Como consequência disto, o estudo apresentou resultados mais econômicos na ordem de 17,7% para a área de aço utilizada para combater o momento fletor positivo da estrutura. A Figura 12 apresenta os valores obtidos na análise comparativa.

Figura 12: Resultado da Análise Comparativa da Ponte com Duas Longarinas

Long.	Método	Vão	My + 2D (kN.m)	My + 3D (kN.m)	Erro (kN.m)	Erro percentual (%)	My - 2D (kN.m)	My - 3D (kN.m)	Erro (kN.m)	Erro percentual (%)
1	Courbon	1	1143,7	943,41	200,29	21%	1063	962,52	100,48	10%
1	Courbon	2	1045,6	870,38	175,22	20%	1063	962,52	100,48	10%

Fonte: Santos (2021)

3.3. A MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA

Diante do que foi observado no estudo de evolução da norma regulamentadora, percebe-se o déficit de dados reais no que tange a classificação e quantificação dos veículos atuantes na malha rodoviária brasileira. Além disso, há de se considerar a circulação de veículos com excesso de carga nas rodovias. Atualmente, as resoluções nº 210/2006 e 211/2006 do CONTRAN regem a regulamentação sobre o limite de peso, dimensões dos veículos e as combinações de veículos de carga (CVC). Para contornar esta problemática, a NBR 7188/2013 possui uma configuração de carga móvel que contempla as várias classes de veículos e suas respectivas cargas. A Figura 13 indica a carga distribuída das classes de acordo com os parâmetros presentes na resolução vigente.

Figura 13: Tabela Comparativa das Cargas de Classes Veiculares com a Carga de Multidão da NBR 7188/2013

Tipo	L (m)	C (m)	Dist (m)	Área (m ²)	PBT (kN)	Q (kN/m ²)	q_NBR (kN/m ²)
 Não-articulado	2,60	14,00	15,00	75,40	290	3,85	5,00
 Ônibus não-articulado	2,60	15,00	15,00	78,00	290	3,72	5,00
 Ônibus articulado	2,60	18,60	15,00	87,36	395	4,52	5,00
 Semi-reboques (2und)	2,60	16,00	15,00	80,60	450	5,58	5,00
	2,60	19,80	15,00	90,48	485	5,36	5,00
 Semi-reboques (>2und)	2,60	17,50	15,00	84,50	450	5,33	5,00
	2,60	19,80	15,00	90,48	570	6,30	5,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Somado aos fatos citados acima, é necessário analisar as atuais condições das pontes no Brasil. Mendes (2009) realizou um levantamento das características gerais das pontes em operação no país. O estudo foi importante para selecionar a estrutura que mais se enquadrava com as características observadas. Tais características utilizadas estão elencadas abaixo:

- 94% das pontes foram concebidas em concreto armado ou protendido;
- 79% das pontes possuem largura total inferior a 12 m, sendo enquadradas como estreitas;

- 50% das pontes possuem apenas um vão ou um vão com dois balanços;
- 63% das pontes possuem extensão inferior a 50 m;

Com o resultado do levantamento, é endossada a necessidade da realização de inspeções sistemáticas e de ensaios para a obtenção de dados que possibilitem a confecção de modelos de determinação e previsão das condições futuras de seus elementos e componentes em termos de durabilidade, de capacidade de carga e de condições de tráfego, que possam servir como instrumentos de gestão desse valioso patrimônio. (MENDES, 2009)

Ao visar a modernização da norma brasileira de cargas móveis, Rossigali (2006) deu início a uma linha de estudo que se propusera em criar uma base reduzida de dados de veículos reais, para que assim pudesse analisar os esforços solicitantes nas estruturas.

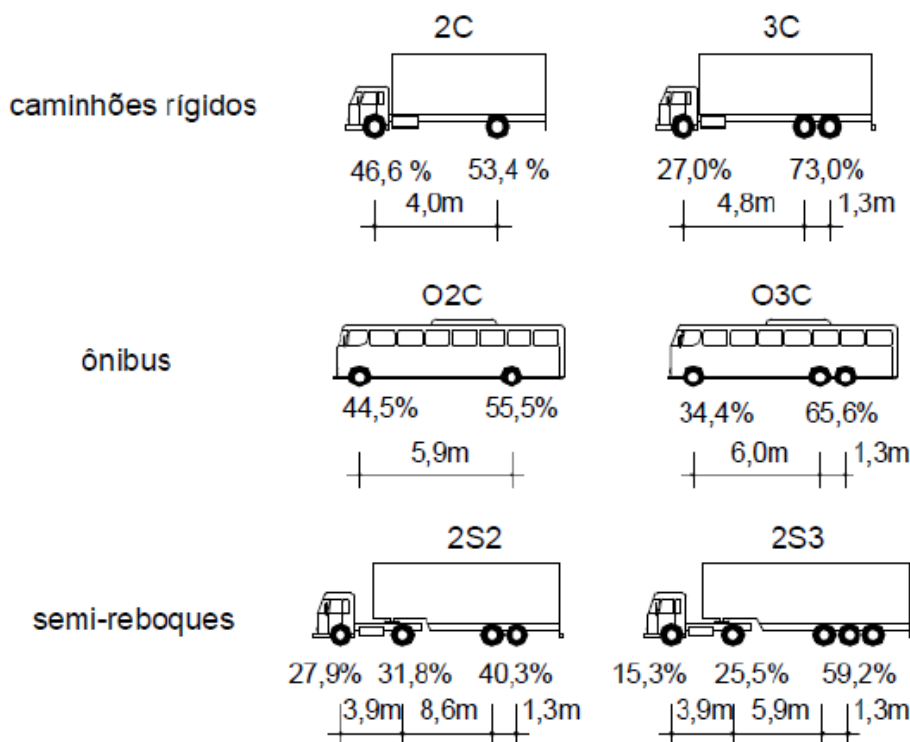
Com os dados obtidos através do DNIT entre os anos de 1999 e 2002, Rossigali (2006) obteve uma base reduzida de dados. As variáveis utilizadas para a realização do estudo são: os modelos dos veículos segundo a classificação do DNIT, número de eixos, tipo de ligação dos eixos e o peso bruto total. Em sua análise, foi identificado que os efeitos nas pontes são decorrentes da ação dos eixos dos veículos. Portanto, os CVC, veículos com mais de sete eixos e alguns veículos especiais foram excluídos da base de dados, pois, os esforços gerados por estes veículos não diferem dos efeitos gerados pelas classes veiculares mais frequentes na sua base de dados. Deste modo, a Tabela 1 mostra as frequências relativas e os seus respectivos pesos dos veículos utilizados.

Tabela 1: Caracterização das Classes de Veículos da Base de Dados

Classe de Veículo	Frequência Relativa	Peso Médio (kN)
2C	22,8%	58,5
3C	40,9%	134
2S2	6,0%	151
2S3	18,0%	304
O2C	7,0%	110
O3C	5,5%	144

Fonte: Rossigali (2006)

A Figura 14 sintetiza as nomenclaturas de cada classe de veículo, as respectivas distribuições de peso por eixo e as distâncias entre eles.

Figura 14: Configurações utilizadas na base reduzida

Fonte: Rossigali (2006)

No que tange as dimensões de cada classe de veículo presente na base de dados, Rossigali (2006) catalogou tais parâmetros através de informações coletadas através dos fabricantes, associações nacionais de veículos automotores e demais associações relacionadas aos fabricantes de implementos rodoviários. Os veículos catalogados foram os que apresentaram as maiores vendas de acordo com o período de amostragem presente na base de dados utilizada. Com isso, uma média ponderada das dimensões de cada veículo foi realizada para determinar os parâmetros finais.

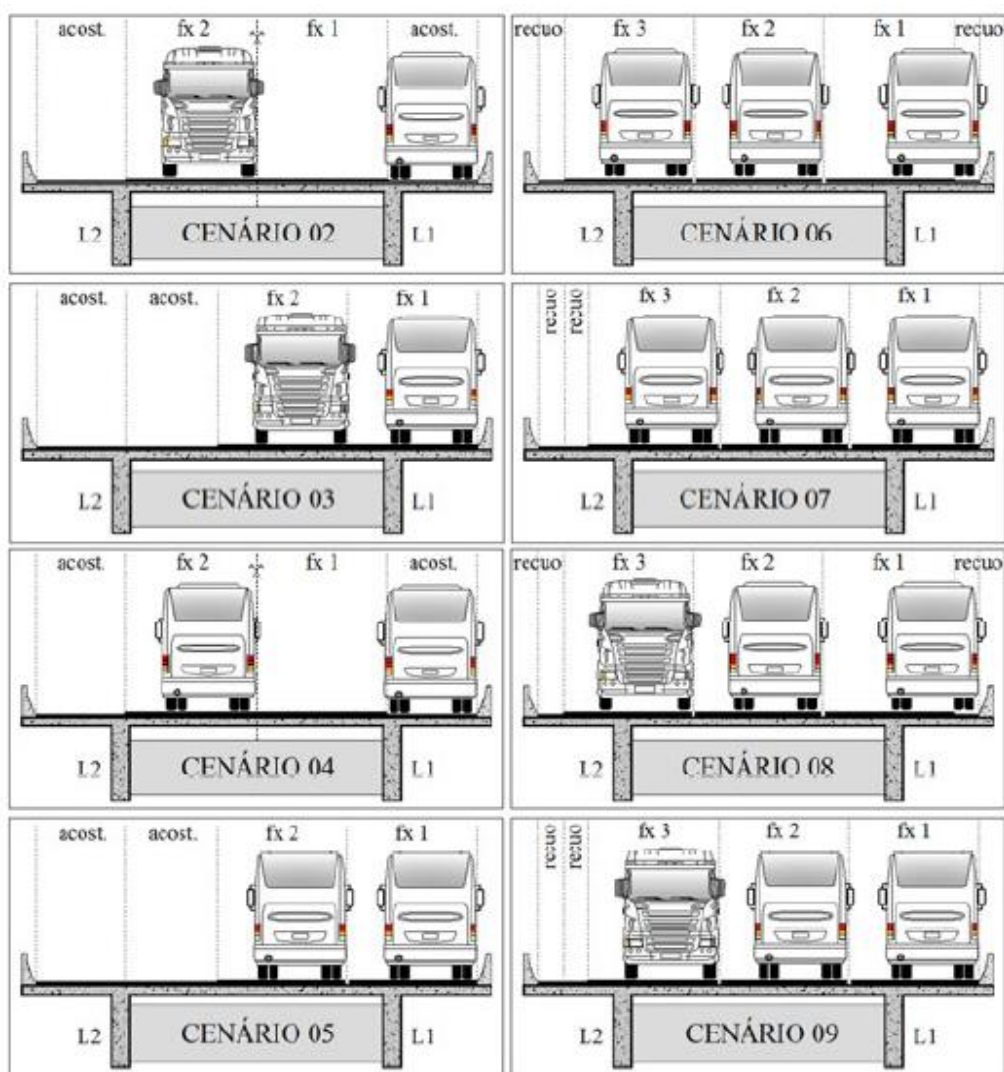
Em continuidade ao programa estabelecido, Rossigali (2013) propôs a atualização dos modelos de cargas móveis para obras-de-arte de pequenos vãos. Para o estudo foram consideradas pontes com duas longarinas de tabuleiros estreito e largo, cuja largura varia entre 2,5m e 10m e comprimento de vão variável entre 10m e 40m.

No que concerne sobre a base de dados elaborada por Rossigali (2006), foi necessária uma readequação através de novos estudos com novas fontes. Por se tratar de dados com características semelhantes no que tange a composição de tráfego e distribuição de peso, foi criada a base de dados H-2013 com base no posto PGF 58 (CCR AutoBAn) como referência de informações rodoviárias. A composição do tráfego para a base H-2013 pode ser observada na Figura 15.

Figura 15: Composição do tráfego para a base H-2013

Fonte: Rossigali (2013)

A base de dados H-2013 representa o tráfego pesado moderno no Brasil e objetiva primordialmente prover informações estatísticas necessárias à simulação do tráfego. Para este fim, desenvolveu-se uma ferramenta computacional denominada STPG, que gera filas de veículos, tantas quantas forem as faixas de rolamento da estrutura analisada, e registra valores representativos dos esforços estáticos causados pela passagem destes veículos. (ROSSIGALI, 2013). Com os resultados estáticos obtidos de acordo com as análises do STPG, foi realizado um estudo estatístico de extrapolação a fim de realizar uma simulação de 30 dias de tráfego, como mostra a Figura 16.

Figura 16: Cenários de tráfego de fluxo livre para situações de projeto

Fonte: Rossigali (2013)

Com a extrapolação estimaram-se os valores estáticos representativos de cada esforço solicitante em cada estrutura. Para a consideração da parcela estática dos valores-alvo, tomou-se como referência em cada caso o cenário de tráfego que gera o maior valor representativo da extrapolação. Comparando estes valores extrapolados estáticos com as cargas estáticas dos modelos de cargas das normas brasileiras (sem o impacto), verifica-se que as extrapolações superam tanto os esforços gerados pelo modelo de cargas da antiga NB-6 quanto os da NBR 7188 (ABNT, 2013), em todos os casos, exceto no momento fletor negativo das duas maiores estruturas contínuas abordadas (vãos de 30 m e 40 m) com tabuleiro largo. (ROSSIGALI, 2013)

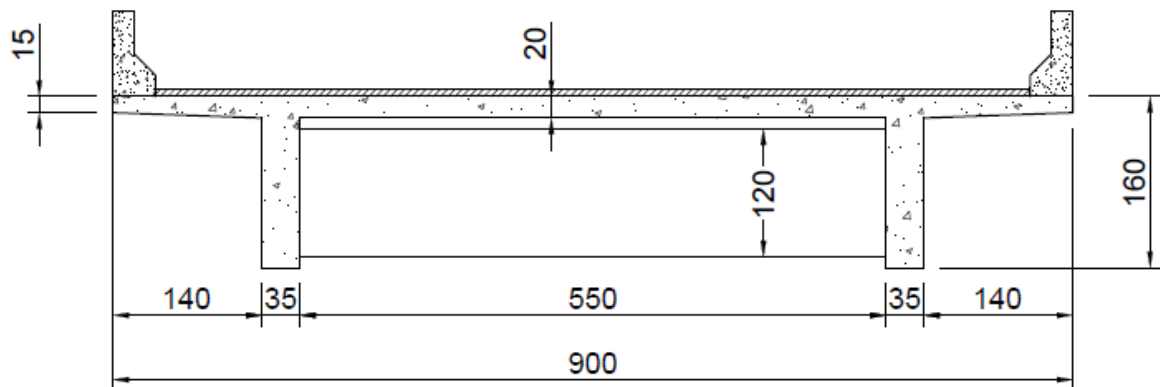
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MODELAGEM E CÁLCULO DA ESTRUTURA

Neste estudo, o ROBOT foi o *software* escolhido para a modelagem e resolução da estrutura em questão. Através das cargas atuantes que serão impostas, serão analisados os esforços solicitantes nas longarinas que compõem a obra-de-arte.

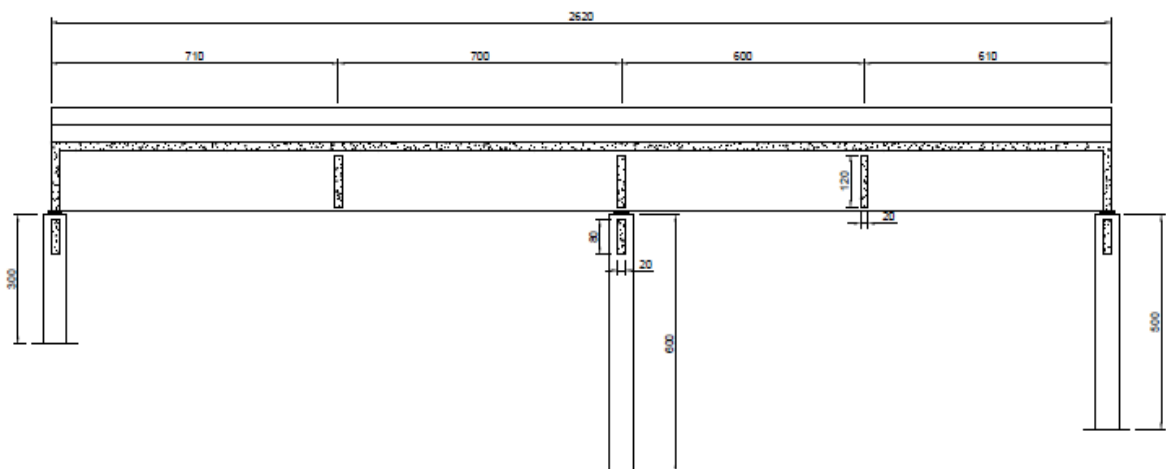
A partir disto, foi criada a concepção estrutural da ponte que será utilizada neste estudo. As Figuras 17 e 18 mostram a obra-de-arte idealizada.

Figura 17: Corte Transversal da Estrutura



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 18: Corte Longitudinal da Estrutura



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

A ponte concerne num tabuleiro de uma faixa de tráfego por sentido com uma extensão longitudinal de 26,20 m. Em suas características transversais, cada faixa de tráfego possui 4,50 m de largura. Além disso, a via está protegida por um guarda-corpo de 15 cm de largura. As lajes em balanço possuem uma extensão de 1,40 m.

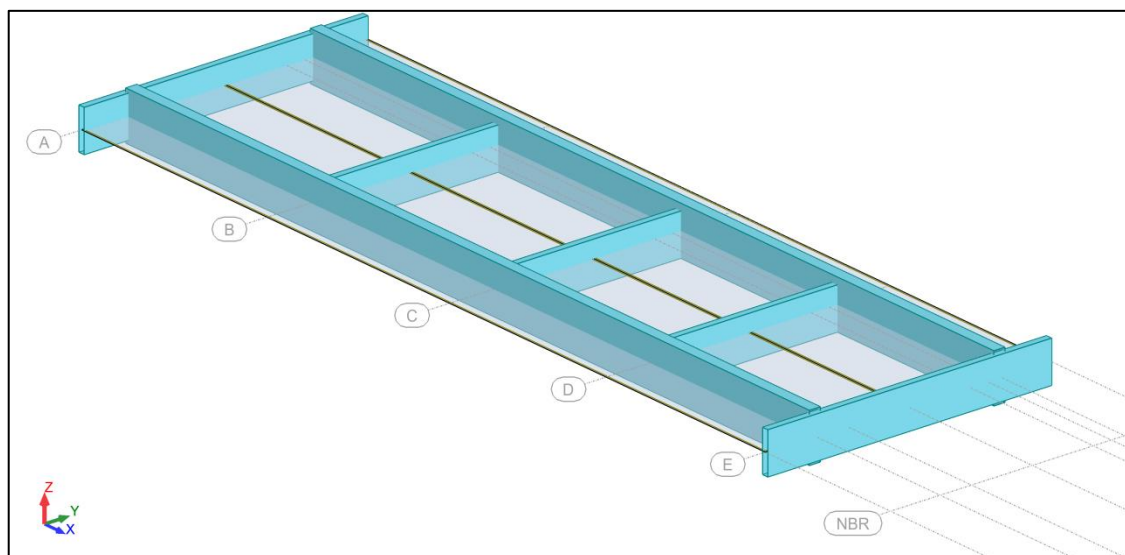
Na composição da estrutura, a ponte possui duas longarinas com dimensões de 35 cm x 140 cm, cinco transversinas com dimensões de 20 cm x 120 cm, as lajes possuem uma espessura variável entre 15 e 20 cm.

4.2. MODELAGEM NO ROBOT

4.2.1. Estrutura

Para efeito da obtenção dos esforços solicitantes nas longarinas e transversinas, as peças foram consideradas como elementos de viga (barras). De acordo com o suporte do *software*, o método utilizado no cálculo das vigas é o de elemento com dois nós padrão. Para as lajes, as peças foram estruturadas no modelo tipo casca.

Figura 19: Modelo Tridimensional da Estrutura



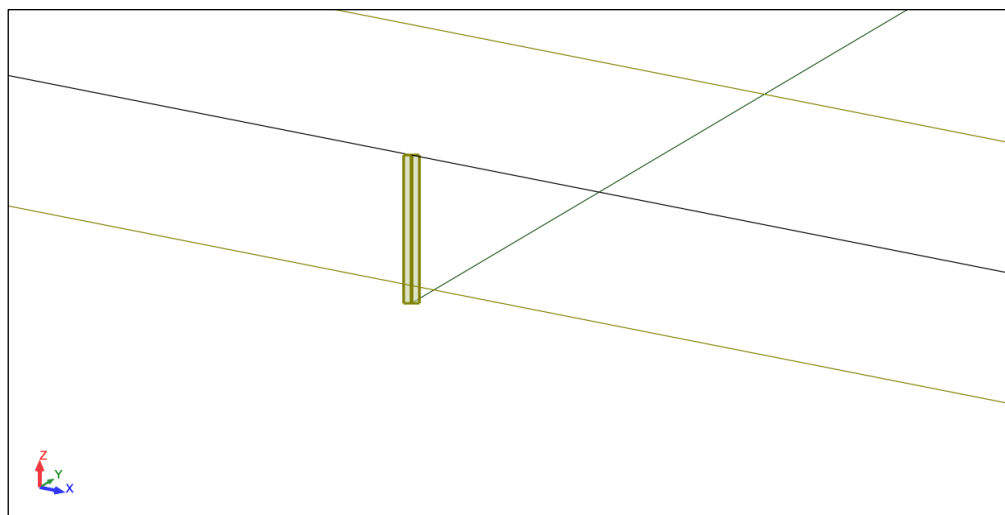
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Na simulação dos pilares da estrutura, foram adicionados apoios do segundo gênero de forma que houvesse o impedimento do deslocamento em todas as direções, porém, a rotação foi liberada para todas as direções.

Há de se ressaltar que neste modelo de obra-de-arte, as transversinas estão desvinculadas da laje. Desta forma, houve a necessidade de simular esta característica através

do deslocamento das transversinas em relação à laje e a criação de um vínculo rígido entre a longarina e transversina, como observado na Figura 20. A atribuição desta característica à estrutura é importante, pois, quando há a vinculação da laje com a transversinas, o momento fletor nas longarinas tende a ser menor.

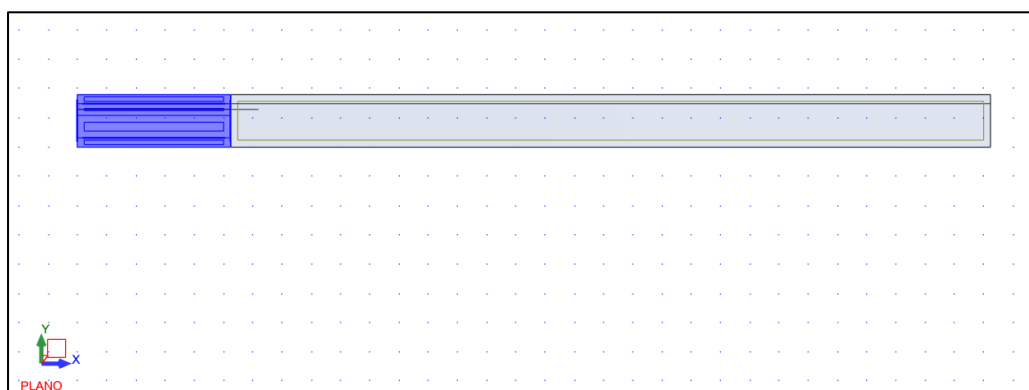
Figura 20: Vínculos Rígidos Utilizados na Estrutura



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

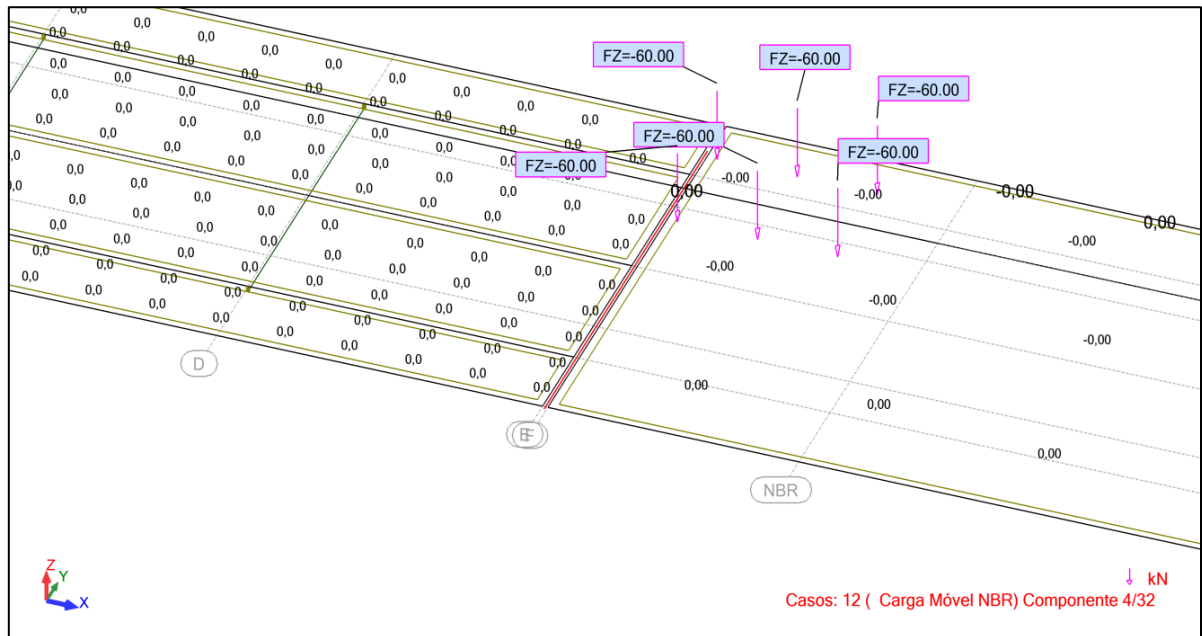
Para garantir que o comboio trafegasse em sua totalidade na obra-de-arte, uma vez que tal comboio possui 99,2 m de extensão, foi criada uma estrutura de transição. Por se tratar de um artifício utilizado com a finalidade já mencionada, a mesma não possui função estrutural para este estudo. Além disso, para que essa estrutura de transição não interferisse nos resultados obtidos na obra-de-arte, foi imposto um espaçamento de 10 cm entre as estruturas. Ademais, o tipo de apoio a ser determinado para a estrutura de transição foi do tipo planar. As Figuras 21, 22 e 23 denotam a estrutura de transição e a não-influência entre elas, respectivamente.

Figura 21: Obra-de-Arte em destaque e Estrutura de Transição



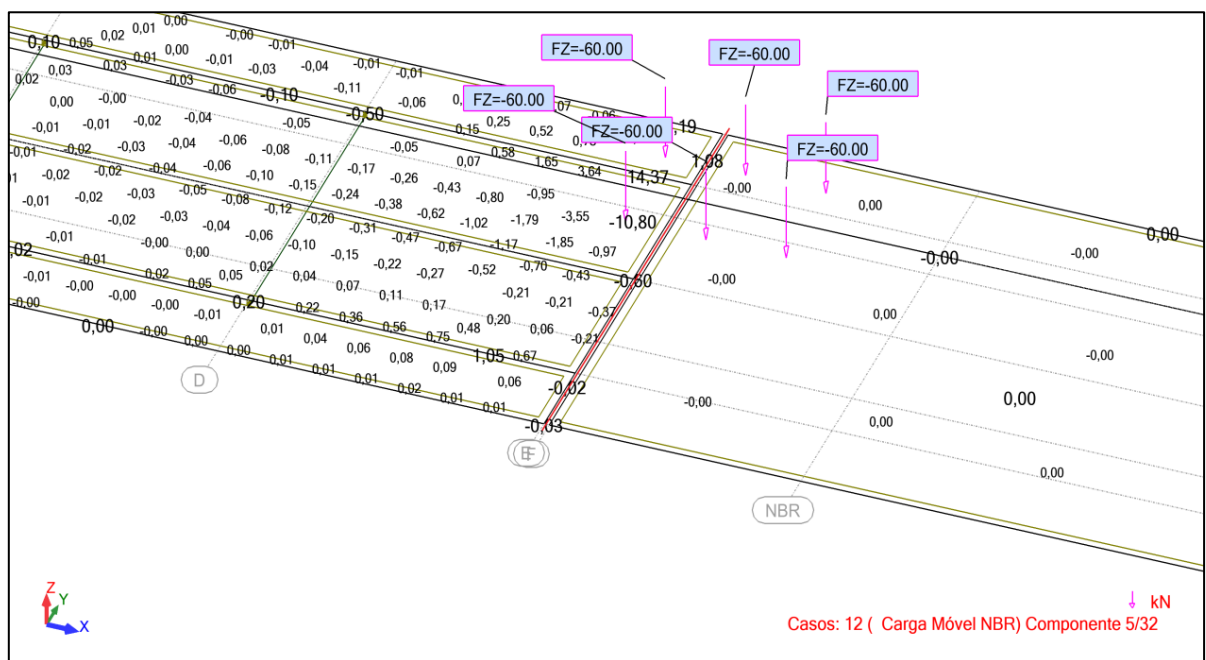
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 22: Interação Obra-de-Arte – Estrutura de Transição antes do Veículo transitar na Ponte



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 23: Interação Obra-de-Arte – Estrutura de Transição quando o Veículo transita na Ponte



Fonte: Elaborada pelo Autor (2021)

4.2.2. Cargas Atuantes

Na composição das cargas, é factível salientar que o estudo em questão tange à adesão da carga móvel presente na NBR 7188/2013 (ABNT, 2013) para com os eventuais tráfegos atuantes nas rodovias brasileiras. Sendo assim, a contribuição das forças provenientes do peso

próprio da estrutura e a carga de passeio serão dispensadas deste trabalho. Com isso, as cargas que serão moldadas e utilizadas para este estudo são a carga móvel TB-450, a carga de multidão e o comboio que foi discretizada na fundamentação teórica.

De acordo com a NBR 7188/2013 (ABNT, 2013), é conceituado que a carga de multidão não esteja aplicada na área de influência da carga móvel. De maneira simplificada, essa recomendação foi alterada a ponto de se realizar uma compensação entre a carga de multidão e as cargas concentradas do TB-450. Então, para que a carga de multidão fosse aplicada em tal área, foi realizada uma suavização de 15kN em cada carga concentrada do veículo normativo. Deste modo, as cargas que inicialmente seriam de 75kN (como indica o item 2.1.2. do presente estudo) foram alteradas para 60kN, procedimento utilizado para determinação do trem-tipo simplificado.

A rota da carga móvel foi elaborada de maneira que fosse possível obter os maiores esforços solicitantes possíveis. Esta definição foi inferida com base nos conceitos de linha de influência aplicados nos cálculos de longarinas em estruturas bidimensionais. A Figura 24 indica as configurações utilizadas na modelagem da carga móvel no *software*.

Figura 24: Janela de Configuração da Carga Móvel no ROBOT

Cargas em movimento

Seleção de veículo

Código (base)

Nome do veículo

Veículos simétricos ☒ Veículos arbitrários ☐

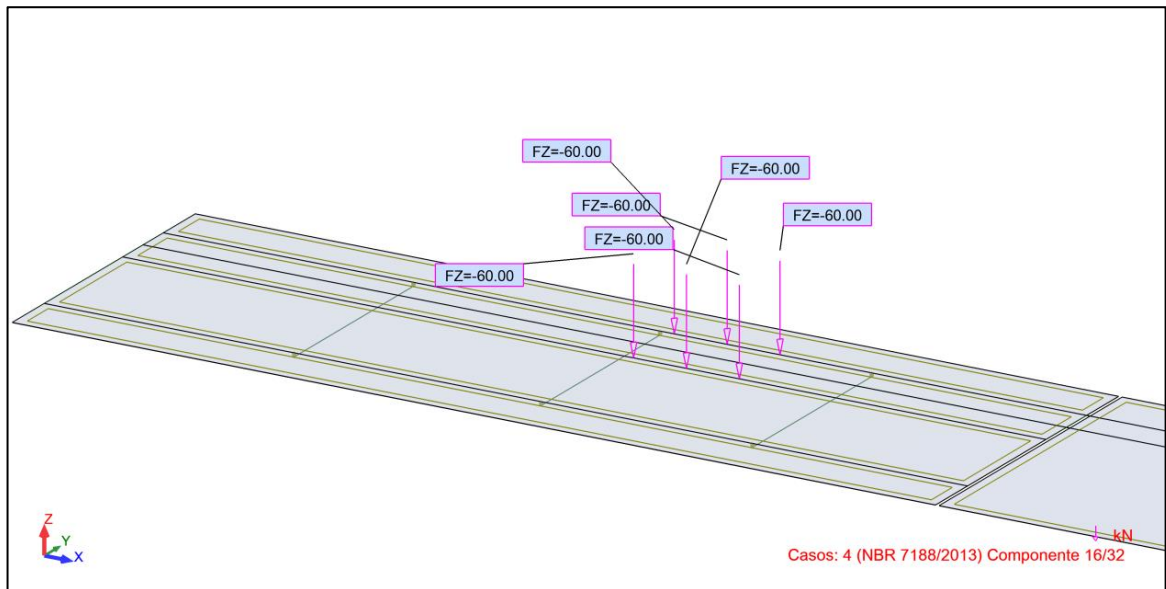
	Tipo de carga					
1	força concentrada	F=60	X=-1,5	S=2		
2	força concentrada	F=60	X=0	S=2		
3	força concentrada	F=60	X=1,5	S=2		
*						

Limites do veículo

b= d1= d2=

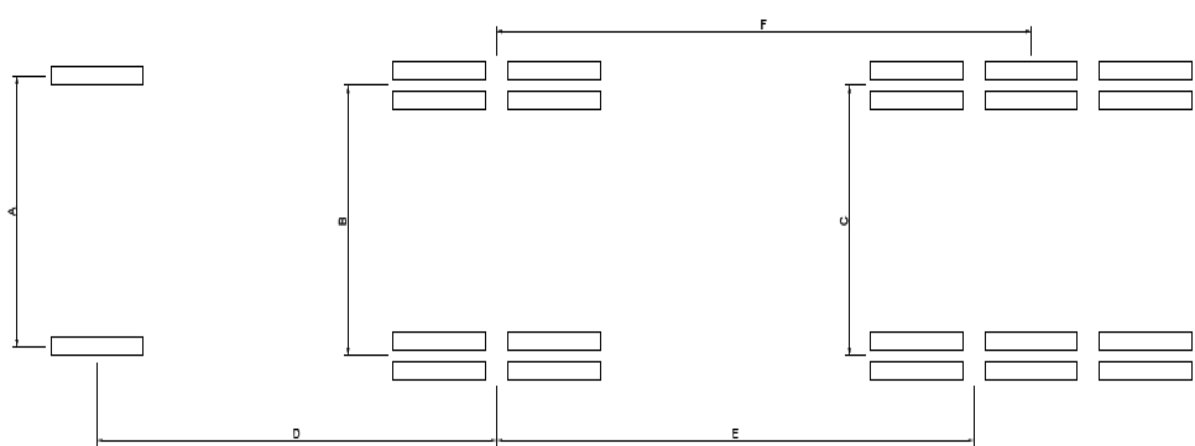
Unidades de comprimento - (m) força - (kN)

Fonte: AutoDesk ROBOT (2021)

Figura 25: Disposição do TB-450 na Obra-de-Arte

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Para simplificar a modelagem do comboio, as dimensões utilizadas neste estudo foram apenas as que caracterizavam a largura e comprimento. Além disso, não serão consideradas as distâncias longitudinais entre pneus para as classes que possuírem eixos traseiros. Deste modo, eixos traseiros do tipo tandem duplo ou triplo serão simplificados para eixos simples com rodas duplas. A Figura 26 apresenta o formato geométrico dos veículos e os respectivos valores dimensionais e as dimensões das classes de veículos na Tabela 2.

Figura 26: Disposição Geométrica das Classes de Veículos

Fonte: Adaptado de Rossigali (2006)

Tabela 2: Dimensões das Classes de Veículos

CLASSE	DIMENSÕES (m)					
	A	B	C	D	E	F
2C	2,0	2,0	-	4,0	-	-
3C	2,0	2,0	-	4,8	-	-
O2C	2,0	2,0	-	5,9	-	-
O3C	2,0	2,0	-	6,0	-	-
2S2	2,0	2,0	2,0	3,9	8,6	9,9
2S3	2,0	2,0	2,0	3,9	5,9	7,2

Fonte: Adaptado de Rossigali (2006)

Para a elaboração das cargas atuantes na ponte, foi estipulado um número total de 15 veículos. O critério adotado para a utilização deste valor deve-se ao fato da relação proporcional da extensão do comboio de acordo com o aumento do número total de veículos. Uma vez que o objetivo não é compor um grande comboio, mas sim, analisar os esforços solicitantes quando a ponte está carregada em sua extensão. Além disso, ao relacionar com a frequência relativa, o valor estipulado é o mínimo para que haja pelo menos um veículo de cada classe em sua composição. Deste modo, a Tabela 3 indica a distribuição de veículos de acordo com a frequência de cada classe utilizada no estudo.

Tabela 3: Discretização do Comboio

Classe	Frequência Relativa	Número de Veículos
2C	0,228	3
3C	0,409	6
O2C	0,07	1
O3C	0,055	1
2S2	0,058	1
2S3	0,18	3

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Após a distribuição quantitativa das classes de veículos utilizados no comboio, é necessário que haja a configuração da distribuição de peso entre os eixos de cada veículo. Para isso, foram utilizadas as informações de peso total e a respectiva repartição de carga para cada eixo apresentado nas classes de veículos constituintes. Sendo assim, as tabelas 4 e 5 apresentam as informações descritas.

Tabela 4: Distribuição de Peso por Eixo

Classe	Peso Médio (kN)	Distribuição De Peso (%)	
		Eixo Diant.	Eixo Traseiro
2C	58,5	0,466	0,534
3C	134	0,27	0,73
O2C	110	0,445	0,555
O3C	144	0,344	0,656

Fonte: Rossigali (2006)

As classes de semi-reboques possuem uma distribuição diferente das apresentadas anteriormente devido ao uso do caminhão-trator para o transporte das cargas.

Tabela 5: Distribuição de Peso por Eixo para Semi-Reboques

Classe	Peso Médio (kN)	Distribuição De Peso (%)		
		Caminhão-Trator		Reboque
2S2	151	0,279	0,318	0,403
2S3	304	0,153	0,255	0,592

Fonte: Rossigali (2006)

Deste modo, sabendo das cargas solicitantes em cada eixo, é necessário que haja a distribuição de tais cargas para cada conjunto de rodas que compõem os eixos dos veículos. As Tabelas 6 e 7 relatam as parcelas de carga que tais conjuntos recebem.

Tabela 6: Cargas Concentradas por Conjunto de Rodas

Classe	Peso por conjunto de rodas (kN)	
	Eixo Diant.	Eixo Traseiro
2C	13,63	7,81
3C	18,09	24,46
O2C	24,48	15,26
O3C	24,77	23,62

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Tabela 7: Cargas Concentradas por Conjunto de Rodas nos Semi-Reboques

Classe	Peso por conjunto de rodas (kN)		
	Caminhão-Trator		Reboque
2S2	21,06	12,00	15,21
2S3	23,26	19,38	44,99

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

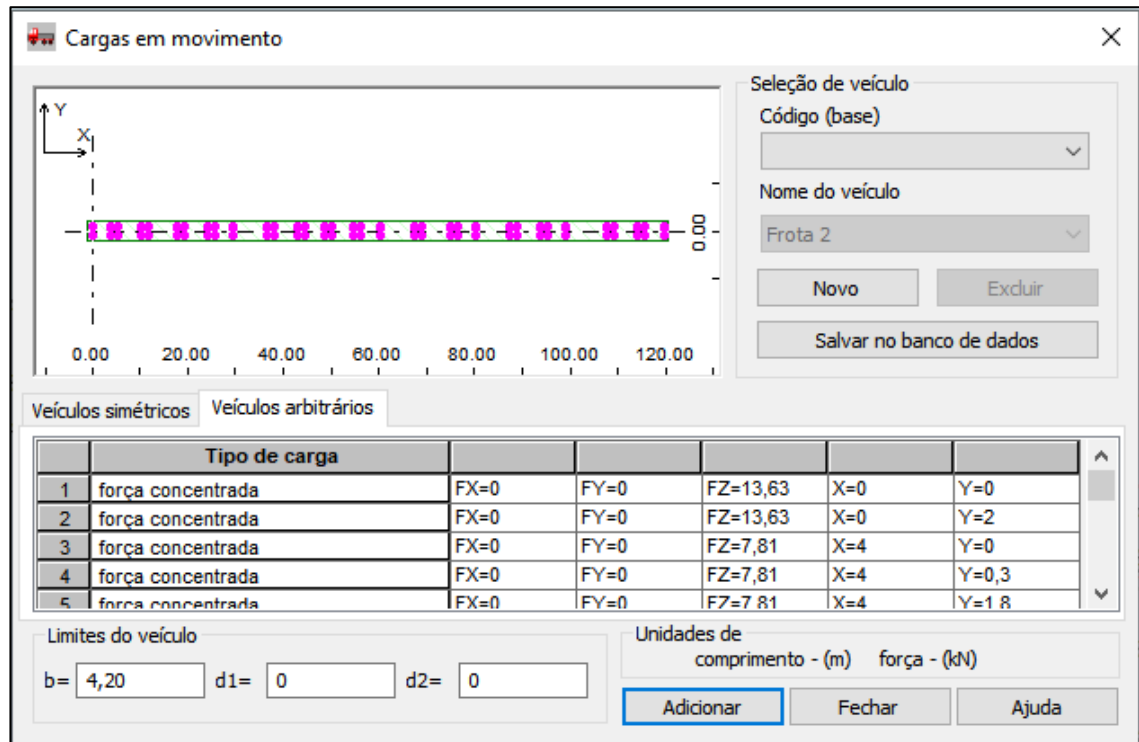
Uma vez que os veículos estão devidamente caracterizados, há de se tratar no que diz respeito à configuração dos veículos para com o comboio. Ao levar em consideração a imprevisibilidade da ordem de passagem dos veículos nas rodovias, a simulação foi caracterizada de maneira majoritariamente aleatória. Porém, a única condição imposta para a elaboração do comboio é que os veículos com mais peso estejam na região central do comboio, esta condição faz com que a estrutura da ponte seja mais solicitada. Diante disto, a Tabela 8 indica a ordem utilizada neste estudo.

Tabela 8: Ordem de Veículos Constituintes do Comboio

Posição	Classe	Posição	Classe
1	2C	9	2S3
2	3C	10	O2C
3	O3C	11	2S3
4	3C	12	3C
5	2S3	13	2S2
6	3C	14	3C
7	2C	15	2C
8	3C	-	-

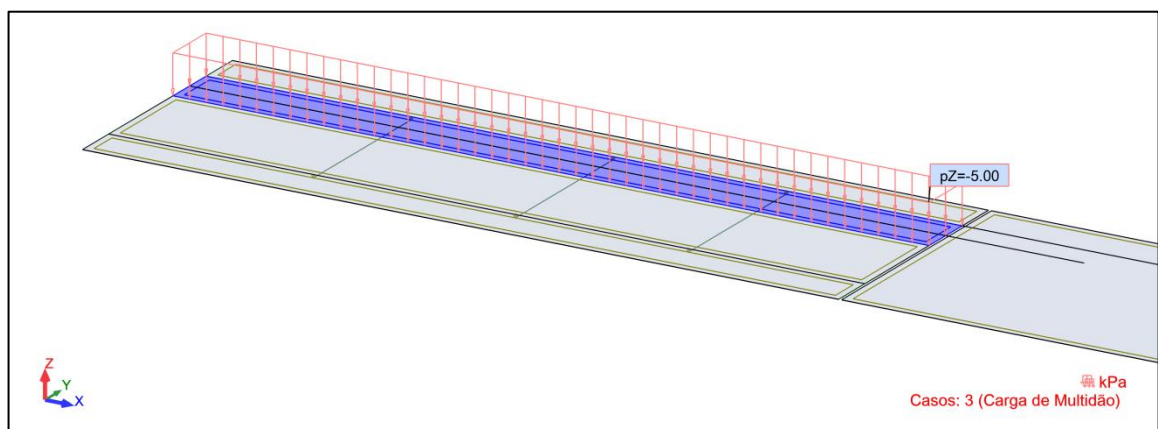
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Para a composição do comboio, foi considerado uma distância de 10 cm entre cada veículo, uma vez que a carga de multidão é contínua. Com isso, o comboio totalizou-se numa extensão de 99,2 m. Os dados relacionados às cargas concentradas e as respectivas posições cartesianas encontram-se no **Apêndice A**. Na Figura 27 mostram-se a configuração do comboio no *software* e a rota utilizada pelas cargas neste estudo.

Figura 27: Janela de Configuração do Comboio no ROBOT

Fonte: AutoDesk ROBOT (2021)

Para a alocação da carga de multidão, foi considerado que ela agisse na mesma região que o comboio trafegasse na estrutura. Esta hipótese torna-se válida, pois, o princípio para a utilização deste carregamento na norma é de simular as cargas dos demais veículos automotores que permeiam a carga móvel. Deste modo, é palpável que seja utilizada desta forma, uma vez que o objetivo do estudo é a avaliação da adesão da simulação condicionada na norma com a realidade. A Figura 28 ressalta a região do leito carroçável que a carga de multidão foi aplicada.

Figura 28: Região de Aplicação da Carga de Multidão na Obra-de-Arte

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

No entanto, para que os carregamentos previstos na NBR 7188/2013 atuassem de forma conjunta na estrutura, houve a necessidade de utilizar a ferramenta de combinação de cargas disponível no *software*. Nesta análise, o tipo de combinação a ser configurada foi para o Estado Limite Último (ELU).

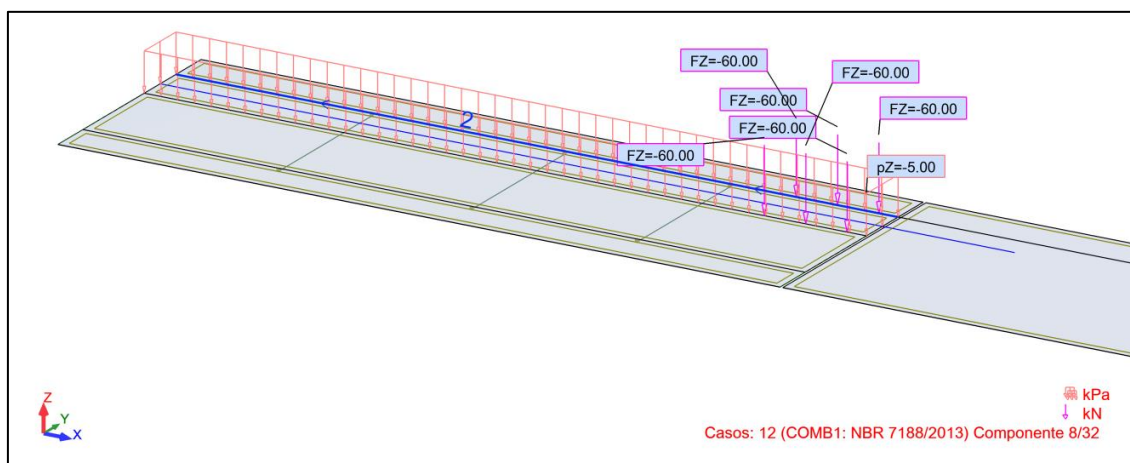
Há de ressaltar os fatores unitários utilizados na configuração da combinação das cargas. No dimensionamento das estruturas, este fator é preenchido com o produto dos coeficientes dispostos no item 2.1.2. No estudo em questão, optou-se em não utilizar tais valores para que pudesse observar apenas os esforços solicitantes provenientes das cargas disponíveis. Uma vez que estes coeficientes são utilizados para amplificar as cargas estáticas mediante as ações diretas ou indiretas das mesmas na estrutura, como por exemplo o efeito dinâmico das cargas em movimento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a definição da composição das cargas que atuarão na estrutura, foi realizado o processamento de cálculo da obra-de-arte. A análise partirá da tratativa de coletar os esforços solicitantes nas longarinas quando existe a presença de uma carga móvel trafegando pela ponte. Porém, é importante frisar que o *software* não efetua os cálculos com base em ações dinâmicas nas estruturas, mas realiza uma análise estática em cada ponto de passagem das cargas, onde em cada passo são coletadas as informações acerca da resposta da estrutura quanto à ação das forças atuantes. Sendo assim, as cargas percorrerão por completo o trajeto definido e o *software* organizam o montante de informações, resultando em formas de gráficos e tabelas.

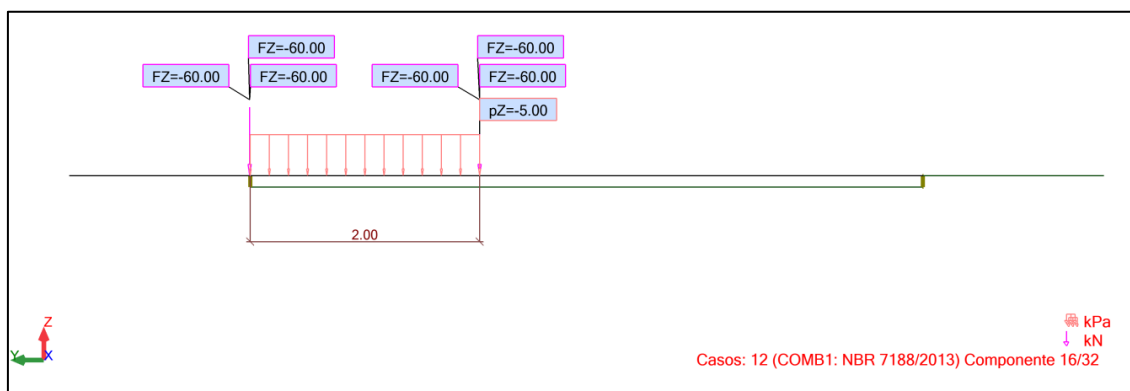
As Figuras 29, 30 31 e 32 salientam as cargas utilizadas e o devido trajeto a ser percorrido por cada uma das situações impostas na estrutura.

Figura 29: Ação da Combinação das Cargas da NBR na Ponte

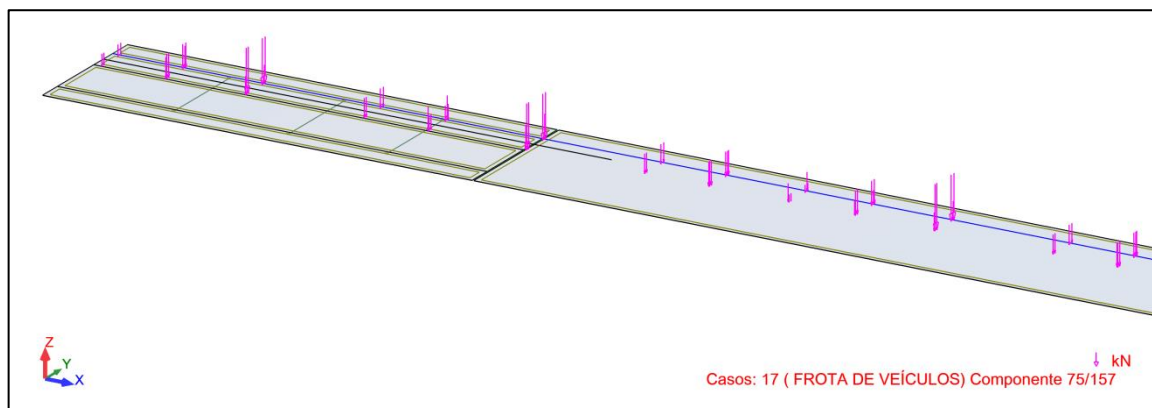


Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

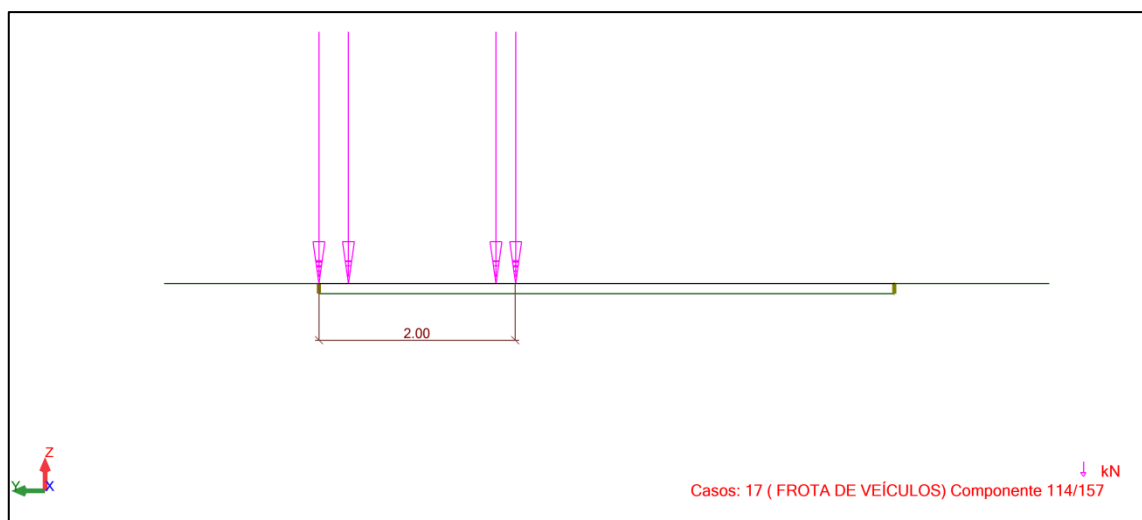
Figura 30: Posicionamento da Carga Móvel no sentido transversal da Ponte



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

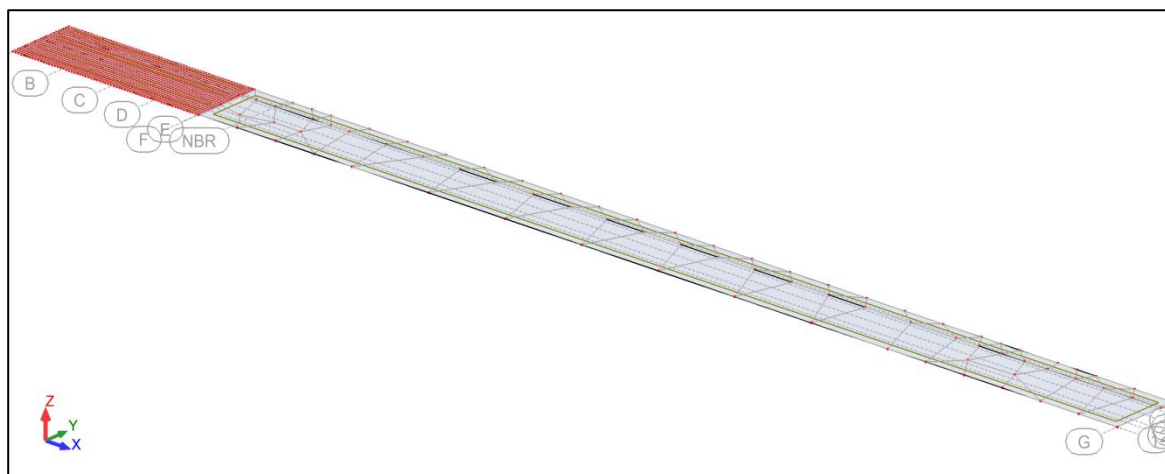
Figura 31: Parcela do Comboio na Obra-de-Arte

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 32: Posicionamento do Comboio no sentido transversal da Ponte

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Para efetuar o cálculo através do método dos elementos finitos, foram geradas duas malhas de nós com espaçamentos diferentes para as estruturas. Na obra-de-arte foi utilizada uma malha com espaçamento de 40 cm. Por se tratar de uma estrutura de transição, cuja obtenção dos esforços solicitantes não são o objetivo do estudo, a malha de nós determinada para tal foi concebida com um espaçamento de 50 m entre cada nó (Figura 33).

Figura 33: Malha de Nós para o Processamento de Cálculo

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

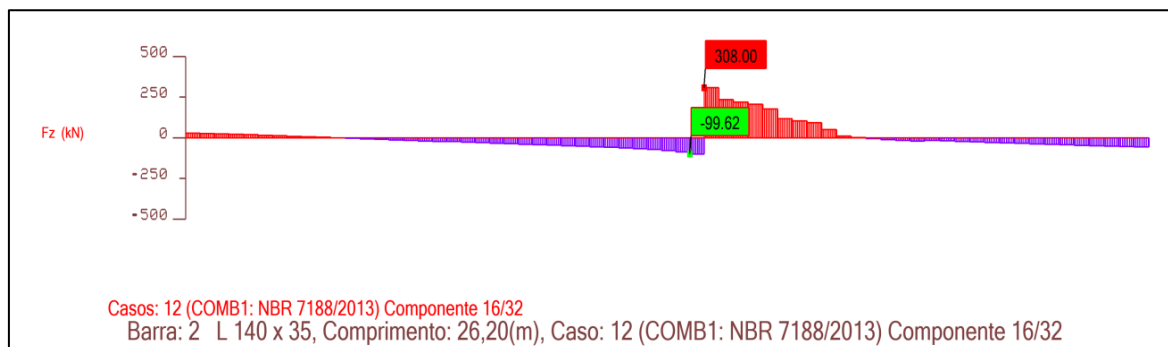
Para ratificar os objetivos deste trabalho, os resultados obtidos deverão servir de parâmetro para a análise da possibilidade de aplicação uma metodologia alternativa na concepção do dimensionamento de longarinas através da utilização de comboios. Apesar de se tratar de um estudo sobre cargas móveis, os esforços solicitantes obtidos são de natureza puramente estática, como explicado no item 3.2.

Na análise dos resultados, o foco serão os esforços solicitantes obtidos para as longarinas, mais precisamente na longarina mais carregada da obra-de-arte. Neste caso, todos os resultados aqui discutidos terão relação com a Longarina 2. Para os carregamentos, o *software* gerou gráficos de esforço cortante e momento fletor para cada posição do veículo normativo.

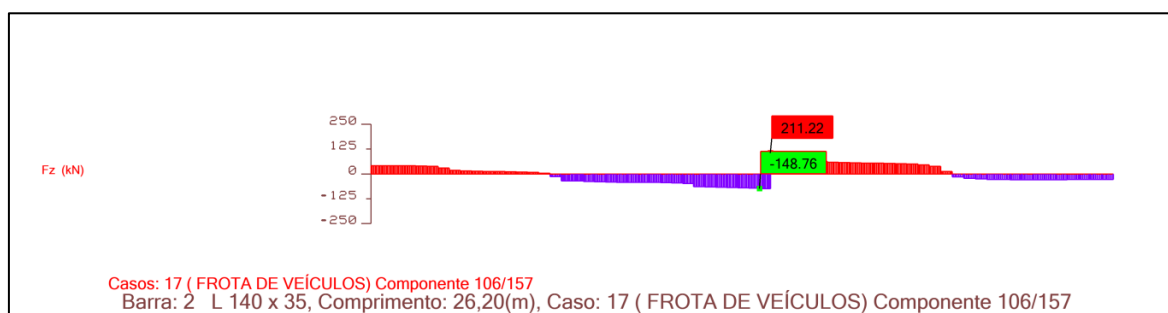
No carregamento composto pela frota de veículos, por se tratar de um comboio de extensão considerável, foram coletados apenas os maiores esforços solicitantes gerados pela passagem completa dos veículos. Com isso, tais valores serão comparados com os parâmetros obtidos pelo carregamento normativo.

5.1. ESFORÇO CORTANTE

No que tange ao esforço cortante, a comparação será diretamente feita com os valores máximos obtidos de acordo com os carregamentos, como apresentado nas Figuras 34 a 37.

Figura 34: Esforço Cortante Positivo Máximo da Carga Normativa

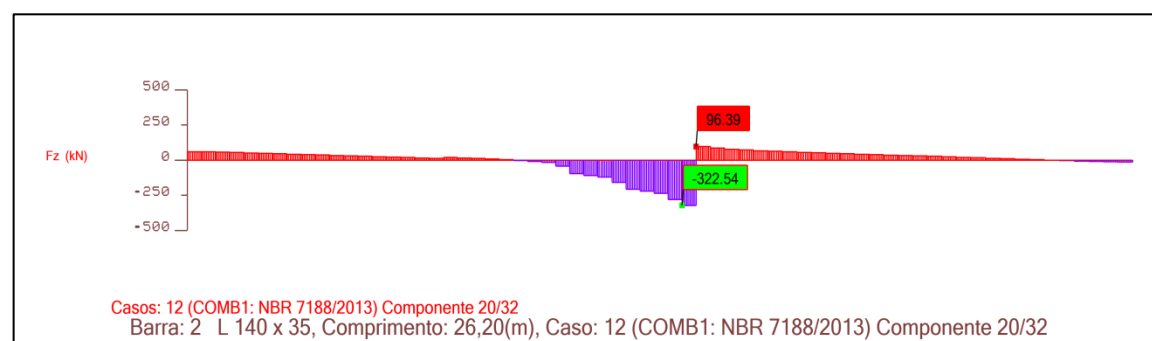
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 35: Esforço Cortante Positivo Máximo do Comboio

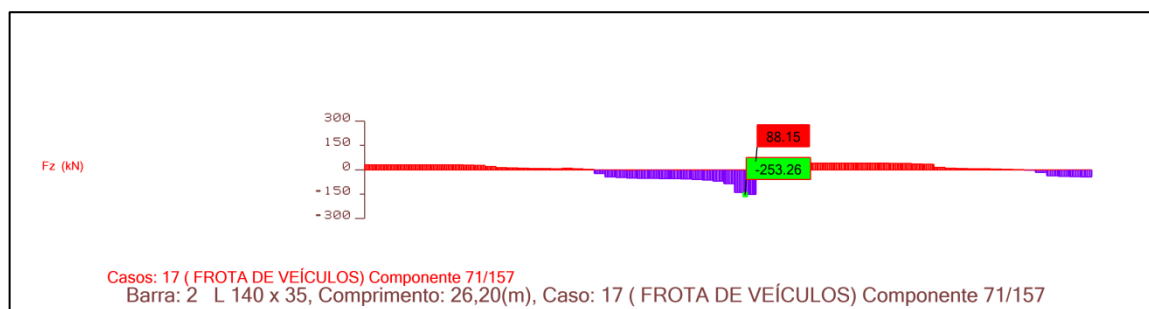
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Ao analisar os cortantes positivos, percebe-se que o comboio performou de modo a gerar um esforço de aproximadamente 31,42% menor que o veículo normativo. A diferença na configuração gráfica deve-se ao fato de a carga de multidão tentar simular a presença de outros veículos na estrutura, de modo mais uniforme que o tráfego de veículos reais, os quais apresentam carga distribuída variável.

De forma análoga ao esforço positivo, o cortante negativo também foi analisado.

Figura 36: Esforço Cortante Negativo Máximo da Carga Normativa

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 37: Esforço Cortante Negativo Máximo do Comboio

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Para os cortantes negativos, o comboio obteve em termos percentuais, um valor de aproximadamente 21,48% menor que as cargas normativas. Em resumo, foi observado que para os esforços cortantes, as cargas provenientes da norma obtiveram valores consideravelmente maiores que a simulação do comboio. A Tabela 9 abaixo ressalta o desempenho da atuação das cargas com a estrutura.

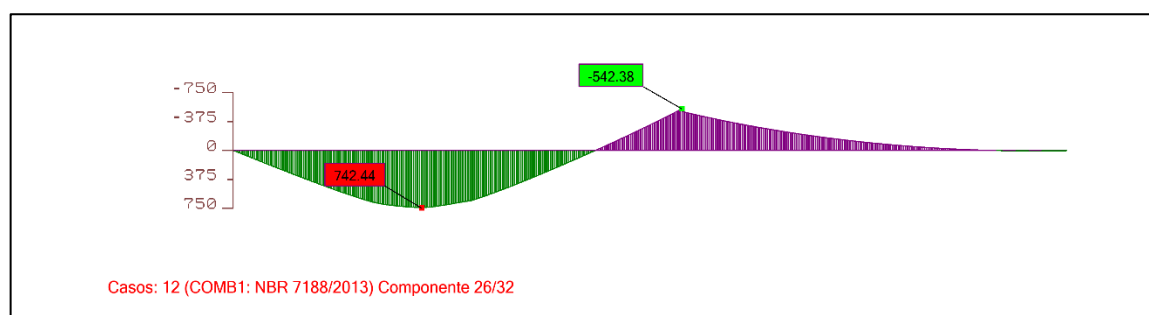
Tabela 9: Resumo dos Esforços Cortantes

Esforço	NBR (kN)	Comboio(kN)	Percentual (%)
+	308,00	211,22	31,42
-	322,54	253,26	21,48

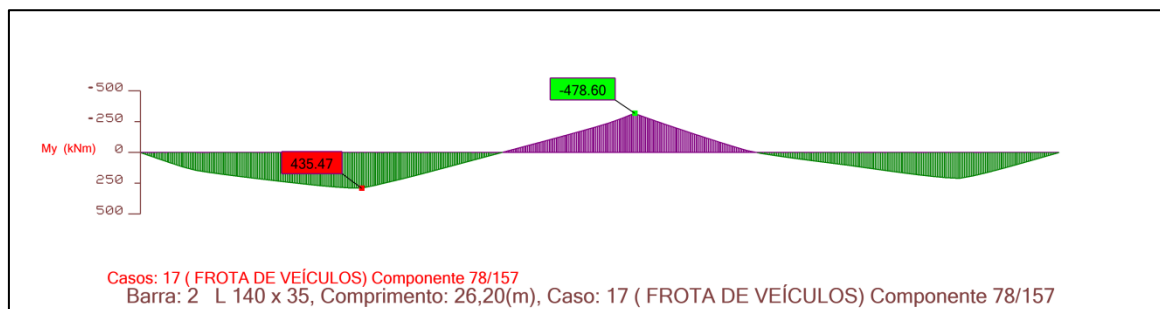
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

5.2. MOMENTO FLETOR

De forma minuciosa, foram coletados o ponto máximo de cada gráfico e seus valores nominais foram comparados com os valores máximos obtidos pelo comboio. As Figuras 38 a 41 sintetizam o comportamento de cada carregamento.

Figura 38: Momento Fletor Positivo Máximo da Carga Normativa

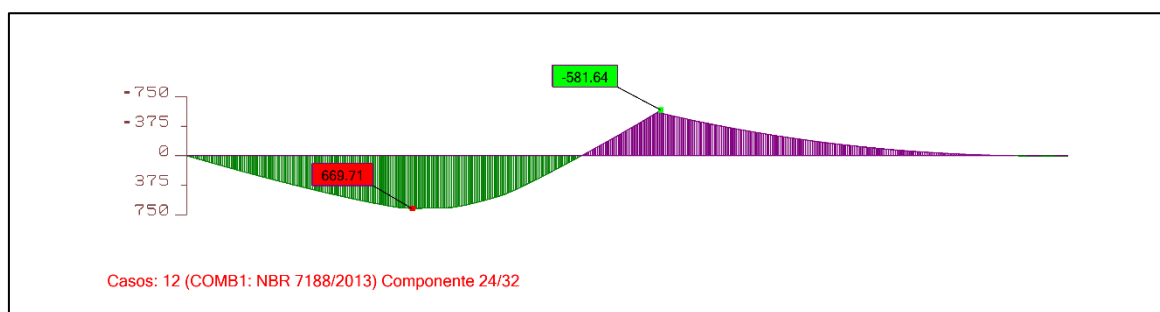
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 39: Momento Fletor Positivo Máximo do Comboio

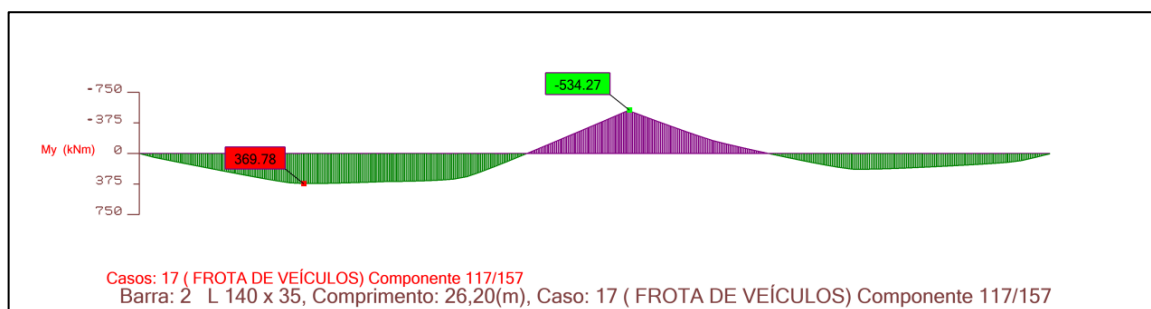
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Em termos percentuais, o comboio gerou um esforço aproximadamente 41,35% menor do que a carga normativa. Porém, durante a obtenção dos gráficos, percebeu-se a atuação simultânea de momentos fletores positivos nos dois tramos da obra-de-arte quando as diversas cargas concentradas trafegaram sobre a ponte. Este é um efeito que a carga normativa não gerou, pois, devido a limitação de dimensão do veículo normativo, cada vão da ponte foi carregado separadamente por suas cargas concentradas. Porém, como visto nos gráficos elaborados, o carregamento normativo impõe mais esforços em grande parte das posições verificadas do que o valor máximo alcançado pelo comboio.

De mesmo modo, os momentos fletores negativos também foram mensurados e comparados.

Figura 40: Momento Fletor Negativo Máximo da Carga Normativa

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 41: Momento Fletor Negativo Máximo do Comboio

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Para o momento fletor negativo, o comboio gerou um esforço, em termos percentuais de 8,14% menor do que a carga normativa. De maneira geral, a carga normativa gerou esforços solicitantes acima dos obtidos pela frota de veículos. A Tabela 10 abaixo indica um resumo dos valores nominais obtidos pelo estudo.

Tabela 10: Resumo dos Momentos Fletores

Esforço	NBR (kNm)	Comboio (kNm)	Percentual (%)
+	742,44	435,47	41,35
-	581,64	534,27	8,14

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

6. CONCLUSÕES

Na análise dos resultados, percebe-se que para o esforço cortante, o comboio gerou esforços menores que o veículo normativo. Para os resultados de momento fletor, percebe-se que para os valores positivos, a frota obteve valores abaixo do veículo normativo. A carga móvel do veículo de norma (PBT-450) representa uma carga distribuída quase 5 vezes superior à carga de multidão, representando uma carga concentrada na estrutura, elevando os momentos positivos. Esse efeito de carga concentrada não tem efeito no momento fletor negativo, o qual apresentou resultado muito próximo ao obtido com o veículo normativo.

De acordo com os resultados apresentados, infere-se que para a estrutura apresentada, o veículo prescrito pela NBR7188:2013 (ABNT, 2013) apresenta valores bastante conservadores em relação aos esforços principais, frente àqueles com tráfego real de veículos, cuja carga equivalente distribuída apresenta valor semelhante à carga de multidão.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se utilizar outra configuração do comboio e verificação dos esforços em lajes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas: NBR 7188/2013. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. Transporte em números, 2019. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/ea14e970-c1e2-455e-950b-88a956467812.pdf>. Acesso em 31 jul 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 210 de 13 de novembro de 2006.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 211 de 13 de novembro de 2006. Disponível em: http://www.guiadotrc.com.br/lei/RESOLUCAO_211.pdf. Acesso em: 31 jul 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de implantação básica de rodovia, 3 ed. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/742_manual_de_implantacao_basica.pdf>. Acesso em 31 jul. 2021.

LUCHI, L. A. R. Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

MENDES, P. T. C. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras. Tese de D.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

ROSSIGALI, C. E. Atualização do modelo de cargas móveis para pontes rodoviárias de pequenos vãos no Brasil. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

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

SANTOS, T. S. C. Análise comparativa em modelos de cálculo de ponte rodoviária. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Sergipe, 2021.

TIMERMAN, J., BEIER, M. Considerações sobre a revisão da ABNT NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, 2012. Disponível em <
http://www.deecc.ufc.br/Download/TB803_Pontes%20I/Nova%20NBR7188.pdf>. Acesso em 31 jul 2021.

APÊNDICE A - Cargas concentradas e as respectivas posições cartesianas

APÊNDICE A			
Classe	Força (kN)	Posição (m)	
2C	FZ=13,63	X=0	Y=0
	FZ=13,63	X=0	Y=2
	FZ=7,81	X=4	Y=0
	FZ=7,81	X=4	Y=0,3
	FZ=7,81	X=4	Y=1,8
	FZ=7,81	X=4	Y=2
3C	FZ=18,09	X=4,05	Y=0
	FZ=18,09	X=4,05	Y=2
	FZ=24,26	X=8,85	Y=0
	FZ=24,26	X=8,85	Y=0,3
	FZ=24,26	X=8,85	Y=1,8
	FZ=24,26	X=8,85	Y=2
O3C	FZ=24,77	X=8,9	Y=0
	FZ=24,77	X=8,9	Y=2
	FZ=23,62	X=14,9	Y=0
	FZ=23,62	X=14,9	Y=0,3
	FZ=23,62	X=14,9	Y=1,8
	FZ=23,62	X=14,9	Y=2
3C	FZ=18,09	X=14,95	Y=0
	FZ=18,09	X=14,95	Y=2
	FZ=24,46	X=19,75	Y=0
	FZ=24,26	X=19,75	Y=0,3
	FZ=24,26	X=19,75	Y=1,8
	FZ=24,26	X=19,75	Y=2
2S3	FZ=23,26	X=19,8	Y=0
	FZ=23,26	X=19,8	Y=2
	FZ=19,38	X=23,7	Y=0
	FZ=19,38	X=23,7	Y=0,3
	FZ=19,38	X=23,7	Y=1,8
	FZ=19,38	X=23,7	Y=2
	FZ=45	X=30,9	Y=0
	FZ=45	X=30,9	Y=0,3
	FZ=45	X=30,9	Y=1,8
	FZ=45	X=30,9	Y=2
3C	FZ=18,09	X=30,95	Y=0
	FZ=18,09	X=30,95	Y=2
	FZ=24,26	X=35,75	Y=0
	FZ=24,26	X=35,75	Y=0,3
	FZ=24,26	X=35,75	Y=1,8
	FZ=24,26	X=35,75	Y=2
2C	FZ=13,63	X=35,8	Y=0

	FZ=13,63	X=35,8	Y=2
	FZ=7,81	X=39,8	Y=0
	FZ=7,81	X=39,8	Y=0,3
	FZ=7,81	X=39,8	Y=1,8
	FZ=7,81	X=39,8	Y=2
3C	FZ=18,09	X=39,85	Y=0
	FZ=18,09	X=39,85	Y=2
	FZ=24,46	X=44,65	Y=0
	FZ=24,46	X=44,65	Y=0,3
	FZ=24,46	X=44,65	Y=1,8
	FZ=24,46	X=44,65	Y=2
2S3	FZ=23,26	X=44,7	Y=0
	FZ=23,26	X=44,7	Y=2
	FZ=19,38	X=48,6	Y=0
	FZ=19,38	X=48,6	Y=0,3
	FZ=19,38	X=48,6	Y=1,8
	FZ=19,38	X=48,6	Y=2
	FZ=45	X=55,8	Y=0
	FZ=45	X=55,8	Y=0,3
	FZ=45	X=55,8	Y=1,8
	FZ=45	X=55,8	Y=2
O2C	FZ=24,48	X=55,85	Y=0
	FZ=24,48	X=55,85	Y=2
	FZ=15,26	X=61,75	Y=0
	FZ=15,26	X=61,75	Y=0,3
	FZ=15,26	X=61,75	Y=1,8
	FZ=15,26	X=61,75	Y=2
2S3	FZ=23,26	X=61,8	Y=0
	FZ=23,26	X=61,8	Y=2
	FZ=19,38	X=65,7	Y=0
	FZ=19,38	X=65,7	Y=0,3
	FZ=19,38	X=65,7	Y=1,8
	FZ=19,38	X=65,7	Y=2
	FZ=45	X=72,9	Y=0
	FZ=45	X=72,9	Y=0,3
	FZ=45	X=72,9	Y=1,8
	FZ=45	X=72,9	Y=2
3C	FZ=18,09	X=72,95	Y=0
	FZ=18,09	X=72,95	Y=2
	FZ=24,46	X=77,75	Y=0
	FZ=24,46	X=77,75	Y=0,3
	FZ=24,46	X=77,75	Y=1,8
	FZ=24,46	X=77,75	Y=2
2S2	FZ=21,06	X=77,8	Y=0
	FZ=21,06	X=77,8	Y=2
	FZ=12	X=81,7	Y=0
	FZ=12	X=81,7	Y=0,3

	FZ=12	X=81,7	Y=1,8
	FZ=12	X=81,7	Y=2
	FZ=15,21	X=90,3	Y=0
	FZ=15,21	X=90,3	Y=0,3
	FZ=15,21	X=90,3	Y=1,8
	FZ=15,21	X=90,3	Y=2
3C	FZ=18,09	X=90,35	Y=0
	FZ=18,09	X=90,35	Y=2
	FZ=24,46	X=95,15	Y=0
	FZ=24,46	X=95,15	Y=0,3
	FZ=24,46	X=95,15	Y=1,8
	FZ=24,46	X=95,15	Y=2
2C	FZ=13,63	X=95,2	Y=0
	FZ=13,63	X=95,2	Y=2
	FZ=7,81	X=99,2	Y=0
	FZ=7,81	X=99,2	Y=0,3
	FZ=7,81	X=99,2	Y=1,8
	FZ=7,81	X=99,2	Y=2