

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS MACAÉ – DR. ALOÍSIO TEIXEIRA
ENGENHARIA CIVIL

LUÍZA FROSSARD SILVA

**CÁLCULO AUTOMÁTICO DE CARREGAMENTOS E SOLICITAÇÕES
PARA PROJETOS DE PONTES RODOVIÁRIAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MACAÉ

2018

LUÍZA FROSSARD SILVA

**CÁLCULO AUTOMÁTICO DE CARREGAMENTOS E SOLICITAÇÕES
PARA PROJETOS DE PONTES RODOVIÁRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como requisito parcial para aquisição do título de engenheiro civil.

Orientador: Prof. Msc. Anselmo Leal Carneiro

MACAÉ

2018

CÁLCULO AUTOMÁTICO DE CARREGAMENTOS E SOLICITAÇÕES PARA PROJETOS DE PONTES RODOVIÁRIAS

LUÍZA FROSSARD SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – CAMPUS MACAÉ, COMO REQUISITO PARCIAL PARA AQUISIÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Anselmo Leal Carneiro, M.Sc.
Orientador-UFRJ-Macaé

Prof. Esdras Pereira de Oliveira, M.Sc
Membro interno - UFRJ-Macaé

Prof. Thais da Silva Rocha, M.Sc
Membro interno - UFRJ-Macaé

MACAÉ

2018

Silva, Luíza
Frossard
Cálculo
Automático de
Carregamentos e
Solicitações Para
Projetos de Pontes
Rodoviárias/ Luíza
Frossard Silva -
Macaé: UFRJ, 2018.

Orientador:

Anselmo Leal Carneiro

Trabalho de
Conclusão de Curso
(graduação) – UFRJ-
Macaé/ Engenharia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar durante toda a minha vida, especialmente durante minha trajetória neste curso de graduação e me permitir concluí-lo.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, em especial aos meus pais, Marco Antônio de Almeida Silva e Ana Maria Frossard Silva, e minha irmã, Nathália Frossard Silva. Sem o apoio e motivação deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Agradeço a meu orientador Prof. Msc. Anselmo Leal Carneiro, pela sabedoria e atenção com que me auxiliou nesta trajetória e tornou este trabalho possível.

Agradeço a todos os meus professores, do colégio e da universidade, pelos conhecimentos e ensinamentos compartilhados que me permitiram ingressar e concluir este curso.

Agradeço em especial aos meus amigos do colégio e da graduação que participaram da minha caminhada. Com quem pude compartilhar momentos difíceis e minhas vitórias.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão deste curso e para a realização deste trabalho.

“... Desde que o homem habita este mundo, as pontes são a expressão de sua vontade de superar os obstáculos que encontra no caminho para atingir o seu objetivo. As pontes são testemunho do progresso, poder e decadência; nos falam da cultura dos povos e de sua mentalidade. Desde a obra modesta, somente funcional, até o monumento de formas aperfeiçoadas – mais ou menos carregada artisticamente – encontramos tal multiplicidade de expressões.” WITTFOHT, H (1975).

RESUMO

SILVA, Luíza Frossard. **Cálculo Automático de Carregamentos e Solicitações Para Projeto de Pontes Rodoviárias**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Macaé, 2018.

Elaboração de planilhas capazes de realizar os cálculos das cargas permanentes e cargas móveis (trens-tipo) atuantes em cada viga de pontes com seção transversal de duas vigas, de grelhas (vigas múltiplas, entre elas: três, quatro, cinco, seis e sete vigas) e de seção celular. Além destas, também foram elaboradas planilhas que realizam o cálculo dos esforços solicitantes máximos, através das cargas já calculadas pelas outras planilhas, para pontes em viga com o vão longitudinal biapoiado com e sem balanço, o que as tornam, assim, instrumentos facilitadores no dimensionamento das mesmas.

Palavras-chave: Pontes; Pontes em Duas Vigas; Pontes em Grelha; Pontes com Seção Celular; Carga Permanente; Carga Móvel; Trem-tipo; Pontes Biapoiadas.

ABSTRACT

SILVA, Luíza Frossard. **Automatic Calculation of Loading and Requests for the Project of Road Bridges.** Completion of a Course in Civil Engineering - Federal University of Rio de Janeiro. Macaé, 2018.

Elaboration of spreadsheets capable of calculating permanent loads and moving loads (type-trains) acting on each beam of bridges with cross section of two beams, gratings (multiple beams, including three, four, five, six and seven beams) and cell section. In addition, spreadsheets have been developed to calculate the maximum applicant efforts, using loads already calculated by the other spreadsheets, for beam bridges with the longitudinal span biased with and without balance, which makes them a facilitating tool in their sizing.

Keywords: Bridges; Bridges in Two Beams; Bridges in Grid; Bridges with Cell Section; Permanent Charge; Mobile Load; Train-type; Biapoiadas Bridges.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Esquema ilustrativo de ponte.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2 - Esquema ilustrativo de viaduto.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3 - Elementos componentes das pontes.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4 - Esquemas estruturais de pontes de laje.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5 - Esquemas estruturais de pontes de viga.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 6 - Esquema estrutural de uma ponte em viga.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7 - Esquemas estáticos de pontes em vigas simplesmente apoiadas sem balanços.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8 - Esquema estático de ponte em vigas simplesmente apoiadas com balanços.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9 - Esquema estático de ponte em vigas contínuas.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10 - Esquema estático de ponte em viga Gerber.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11 - Esquema estrutural de uma ponte em pórticos.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12 - Esquema estrutural de uma ponte em arco.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 - Esquema estrutural de uma ponte pênsil.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14 - Esquema estrutural de uma ponte estaiada.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15 - Disposição das cargas estáticas do TB – 450.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 16 - Print da tela da planilha de cálculo para pontes de duas vigas.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17- Print da tela da planilha de cálculo para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 18 - Print da tela da planilha de cálculo para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19 - Esquema ilustrativo: Pontes de duas vigas.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20 - Legenda dos dados das planilhas de cálculo dos trens-tipos e cargas permanentes.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 21 - Medidas guarda-rodas padrão.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 22 - Dados referentes à planilha para pontes com seção transversal de duas vigas.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23 - Dados referentes ao TB-450 (NBR 7188).</i>	<i>47</i>
<i>Figura 24 - Dados referentes às especificações do revestimento e do guarda-rodas.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 25 - Representação da área de influência da viga V1.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 26 - Representação do pavimento em pontes de duas vigas.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 27 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de Influência de reação de apoio das vigas V1 e V2 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 28 - Posicionamento do TB - 450.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 29 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de Influência de reação de apoio das vigas V1 e V2 para determinação do trem-tipo negativo.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 30 - Trem-tipo longitudinal positivo.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31 - Trem-tipo longitudinal negativo.....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 32 - Resultado: Cargas permanentes para as vigas V1 e V2.</i>	55
<i>Figura 33 - Resultado: Trens-tipos positivo e negativo (cargas móveis) para as vigas V1 e V2</i>	55
<i>Figura 34 - Legenda e descrição das cargas móveis (trens-tipo).</i>	56
<i>Figura 35 - Esquema ilustrativo: Pontes de três vigas.</i>	56
<i>Figura 36 - Esquema ilustrativo: Pontes de quatro vigas.</i>	56
<i>Figura 37 - Esquema ilustrativo: Pontes de cinco vigas.</i>	57
<i>Figura 38 - Esquema ilustrativo: Pontes de seis vigas.</i>	57
<i>Figura 39 - Esquema ilustrativo: Pontes de sete vigas.</i>	57
<i>Figura 40 - Dados de entrada para a planilha de pontes de três vigas.</i>	58
<i>Figura 41 - Dados de entrada para a planilha de pontes de quatro vigas.</i>	59
<i>Figura 42 - Dados de entrada para a planilha de pontes de cinco vigas.</i>	60
<i>Figura 43 - Dados de entrada para a planilha de pontes de seis vigas.</i>	61
<i>Figura 44 - Dados de entrada para a planilha de pontes de sete vigas.</i>	62
<i>Figura 45 - Modelo de corpo rígido sobre apoios elásticos com rigidez k.</i>	63
<i>Figura 46 - Deformada da viga.</i>	65
<i>Figura 47 - Exemplo: Carga unitária aplicada para o caso de pontes de três vigas.</i>	65
<i>Figura 48 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3.</i>	67
<i>Figura 49 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V2.</i>	67
<i>Figura 50 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4.</i>	68
<i>Figura 51 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V3.</i>	68
<i>Figura 52 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5.</i>	69
<i>Figura 53 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4.</i>	69
<i>Figura 54 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V3.</i>	70
<i>Figura 55 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6.</i>	70
<i>Figura 56 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5.</i>	71
<i>Figura 57 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V4.</i>	71
<i>Figura 58 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7.</i>	72

<i>Figura 59 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 60 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência das vigas de reação de apoio das vigas V3 e V5.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 61 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V4.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 62 - Representação das áreas de influência das vigas V1, V2 e V3 para o caso de pontes simétricas com seção transversal de cinco vigas.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 63 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 64 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 65 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V2 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 66 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 67 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 68 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V3 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 69 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 70 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 71 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 72 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 73 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V3 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 74 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 75 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 76 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 77 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5 para determinação do trem-tipo negativo.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 78 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.....</i>	<i>83</i>

<i>Figura 79 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7 para determinação do trem-tipo positivo.</i>	84
<i>Figura 80 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7 para determinação do trem-tipo negativo.</i>	84
<i>Figura 81 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6 para determinação do trem-tipo positivo.</i>	85
<i>Figura 82 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6 para determinação do trem-tipo negativo.</i>	85
<i>Figura 83 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.</i>	86
<i>Figura 84 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V4 para determinação do trem-tipo positivo.</i>	86
<i>Figura 85 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de três vigas.</i>	87
<i>Figura 86 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2 e V3.</i>	88
<i>Figura 87 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de quatro vigas.</i>	88
<i>Figura 88 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3 e V4.</i>	89
<i>Figura 89 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de cinco vigas.</i>	89
<i>Figura 90 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4 e V5.</i>	90
<i>Figura 91 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de seis vigas.</i>	91
<i>Figura 92 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4, V5 e V6.</i>	92
<i>Figura 93 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de sete vigas.</i>	93
<i>Figura 94 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7.</i>	94
<i>Figura 95 - Esquema ilustrativo: Pontes de seção celular.</i>	95
<i>Figura 96 - Esquema ilustrativo: Tabuleiro todo carregado (seção no eixo do veículo).</i>	95
<i>Figura 97 - Esquema ilustrativo: Tabuleiro todo carregado (seção fora do eixo do veículo).</i>	96
<i>Figura 98 - Esquema ilustrativo: Meio tabuleiro carregado (seção no eixo do veículo).</i>	96
<i>Figura 99 - Esquema ilustrativo: Meio tabuleiro carregado (seção fora do eixo do veículo).</i>	96
<i>Figura 100 - Dados de entrada planilha de pontes de seção celular.</i>	97
<i>Figura 101 - Representação do pavimento e da área de influência para pontes com seção celular.</i>	99
<i>Figura 102 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de seção celular.</i>	101
<i>Figura 103 - Resultado: Trens-tipo (cargas móveis) para seção celular.</i>	101
<i>Figura 104- Legenda dos dados das planilhas de cálculo dos esforços solicitantes máximos.</i>	102
<i>Figura 105 - Seção longitudinal: Vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	102
<i>Figura 106 - Dados de entrada referentes à viga da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	103

<i>Figura 107 - Determinação da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	103
<i>Figura 108 - Determinação da viga a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	103
<i>Figura 109 - Dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	104
<i>Figura 110 - Outros dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	104
<i>Figura 111 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.</i>	105
<i>Figura 112 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.</i>	106
<i>Figura 113 - Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção no apoio.</i>	107
<i>Figura 114 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção no apoio.</i>	108
<i>Figura 115 - Resultados: Coeficiente de impacto e esforços devido às cargas permanentes e móveis para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	109
<i>Figura 116 - Coeficientes de ponderação para as ações permanentes (agrupadas).</i>	110
<i>Figura 117- Coeficientes de ponderação para as ações variáveis (consideradas conjuntamente).</i>	111
<i>Figura 118 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis.</i>	112
<i>Figura 119 - Resultados: Momento fletor (ELU e ELS) para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	112
<i>Figura 120 - Resultados: Força cortante (ELU e ELS) para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.</i>	113
<i>Figura 121 - Seção longitudinal: Vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	113
<i>Figura 122 - Dados de entrada referentes à viga da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	114
<i>Figura 123 - Determinação da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	114
<i>Figura 124 - Determinação da viga a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	114
<i>Figura 125 - Dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	115
<i>Figura 126 - Outros dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	115
<i>Figura 127 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.</i>	116

<i>Figura 128- Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 129 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no apoio.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 130 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no apoio.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 131 - Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção a esquerda do apoio.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 132 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção a esquerda do apoio.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 133- Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção a direita do apoio.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 134 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção a direita do apoio.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 135 - Resultados: Coeficiente de impacto e esforços devido às cargas permanentes e móveis para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	<i>126</i>
<i>Figura 136 - Resultados: Momento fletor (ELU e ELS) para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	<i>126</i>
<i>Figura 137 - Resultados: Força cortante (ELU e ELS) para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 138 - Dimensões da transversina.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 139 - Dimensões da transversina a ser analisada.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 140 - Carga das transversinas posicionadas na seção longitudinal.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 141 - Força cortante devido às transversinas.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 142 - Momento fletor devido às transversinas.....</i>	<i>130</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 HISTÓRICO.....	17
1.2 OBJETIVO.....	18
1.3 MOTIVAÇÃO.....	19
2. CONCEITOS GERAIS.....	20
2.1 DEFINIÇÃO DE PONTE.....	20
2.2 COMPONENTES DAS PONTES.....	21
2.2.1 Superestrutura.....	21
2.2.2 Mesoestrutura.....	21
2.2.3 Infraestrutura.....	22
2.3 CLASSIFICAÇÕES DAS PONTES.....	22
3. REQUISITOS DE UMA PONTE.....	30
4. O PROJETO DE UMA PONTE.....	31
4.1 PROJETO GEOMÉTRICO.....	31
4.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS.....	31
4.3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS.....	32
4.4 ESTUDOS GEOTÉCNICOS.....	32
4.5 ANÁLISE DAS CARGAS ATUANTES NA PONTE.....	33
4.6 ANÁLISE DE FADIGA.....	33
4.7 COMBINAÇÃO DE AÇÕES.....	33
4.7.1 Combinações Últimas.....	33
4.7.2 Combinações de Serviço.....	34
5. OBTENÇÃO DOS CARREGAMENTOS ATUANTES NA PONTE.....	36
5.1 CARGAS PERMANENTES.....	36
5.2 CARGAS MÓVEIS.....	36
5.3 CARGAS ACIDENTAIS.....	39
5.4 CARGAS DE PEDESTRES.....	39
6. PLANILHAS DE CÁLCULO DE CARGAS PERMANENTES, CARGAS MÓVEIS (TRENS-TIPOS) E SOLICITAÇÕES MÁXIMAS EM PONTES RODOVIÁRIAS.....	41
6.1 PLANILHAS DE CÁLCULO DA CARGA PERMANENTE TOTAL E CARGAS MÓVEIS (TRENS-TIPO).....	45
6.1.1 Pontes de Duas Vigas.....	45
6.1.1.1 Dados de Entrada.....	46
6.1.1.2 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes.....	48

6.1.1.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis.....	51
6.1.1.4 Resultados.....	55
6.1.2 Pontes de Grelha (Vigas Múltiplas)	56
6.1.2.1 Dados de Entrada.....	58
6.1.2.2 Procedimento de Cálculo – Método de Courbon.....	63
6.1.2.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes.....	66
6.1.2.4 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis.....	75
6.1.2.5 Resultados.....	87
6.1.3 Pontes de Seção Celular.....	95
6.1.3.1 Dados de Entrada.....	97
6.1.3.2 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes.....	97
6.1.3.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis.....	99
6.1.3.4 Resultados.....	101
6.2 CÁLCULOS DOS ESFORÇOS SOLICITANTES MÁXIMOS.....	102
6.2.1 Pontes Em Viga Com Vão Longitudinal Simplesmente Biapoiado Sem Balanço.....	102
6.2.1.1 Dados de Entrada.....	103
6.2.1.2 Procedimento de Cálculo - Momento Fletor Máximo no Meio do Vão.....	105
6.2.1.3 Procedimento de Cálculo – Força Cortante Máxima no Apoio.....	107
6.2.1.4 Resultados.....	109
6.2.2 Pontes Em Viga Com Vão Longitudinal Simplesmente Biapoiado Com Balanço.....	113
6.2.2.1 Dados de Entrada.....	113
6.2.2.2 Procedimento de Cálculo – Esforços Máximos.....	115
6.2.2.3 Resultados.....	125
6.2.3 Esforços Devido às Transversinas.....	127
6.2.3.1 Exemplos de Cálculos dos Esforços Devido às Transversinas para Pontes em Viga com o Vão Longitudinal Simplesmente Biapoiado e Simétrica.....	128
7. CONCLUSÃO.....	131
8. BIBLIOGRAFIA.....	132

1. INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

As pontes representam uma das mais importantes e significativas formas de expressão da capacidade criadora da engenharia. Este tipo de estrutura está presente na vida do homem desde os tempos primitivos, onde o homem utilizava troncos de árvores para transpor obstáculos e dar continuidade a seu trajeto, até os dias de hoje. Atualmente, além de atenderem seu objetivo principal de transpor obstáculos, as pontes desafiam as leis da gravidade e a própria imaginação humana pela ousadia de seus enormes vãos.

O grande avanço tecnológico e o desenvolvimento de novos métodos na área do cálculo estrutural, cada vez mais precisos, têm permitido superar as limitações e dificuldades inerentes à concepção e execução dessas obras fundamentais da engenharia civil.

As primeiras Normas Brasileiras referentes ao cálculo e execução de estruturas em concreto armado foram editadas segundo os critérios vigentes na década de 40, época em que a malha rodoviária federal foi implantada. No período citado, foram publicadas as normas NB-1 (Projeto e execução de obras de concreto armado), NB-2 (Cálculo e Execução de Pontes de Concreto Armado) e NB-6 (Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias).

A sistemática da versão de 1943 da NB6 foi baseada nas versões antigas da norma alemã DIN 1072, que considerava tanques e compressores para simular as cargas móveis nas pontes.

Uma nova versão da NB-6 foi publicada em 1960. Esta nova versão estabelecia uma relação entre as classes de rodovia I, II e III e as classes de ponte 36, 24 e 12, respectivamente, em que o nome da classe corresponde ao peso do veículo-tipo em toneladas. Esta versão da NB-6 também foi amplamente baseada na norma alemã DIN 1072, que considerava, na versão vigente de 1952, a mesma sistemática de uma faixa de projeto, a mesma geometria do veículo-tipo, além de uma expressão muito similar para o coeficiente de impacto.

Em 1966, entrou em vigor o Código Nacional de Trânsito (CNT) que definiu um limite máximo para o peso bruto total (PBT) de 40 toneladas. Em 1978, o CNT autorizou a circulação de caminhões com PBTC de até 45 toneladas.

Em face do aumento de carga permitido pelo CNT, a NB-6 foi reeditada em 1982 e publicada em 1984 passando a vigorar como NBR 7188: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas para Pedestres. As classes de pontes 36 e 24 da NB-6/1960 foram substituídas pelas classes 45 e 30 em que, novamente, o nome da classe corresponde ao peso do veículo-tipo em toneladas. A classe 12 e a geometria dos veículos ficaram inalteradas, assim como a definição do fator de impacto.

Estudos mais recentes indicaram a necessidade de revisão da norma NBR 7188 de 1984 com base no aumento da densidade do tráfego, da magnitude das ações verticais e da verificação de anomalias observadas em elementos estruturais adjacentes às juntas de dilatação. As principais mudanças se referem a uma redefinição dos coeficientes de impacto a serem aplicados nas cargas móveis.

Desde a implantação da primeira norma brasileira que definia os critérios para o projeto de pontes até a presente data, algumas das pontes que foram construídas com esses critérios ultrapassados foram substituídas, restauradas, reforçadas e alargadas. Portanto, o perfil das pontes no Brasil é bastante heterogêneo.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de planilhas interativas para a determinação das cargas permanentes e cargas móveis (trens-tipos) para pontes com seção transversal de duas vigas, de grelha (vigas múltiplas, entre elas: três, quatro, cinco, seis e sete vigas) e de seção celular. Além da elaboração de mais duas planilhas para o cálculo dos esforços solicitantes máximos para pontes rodoviárias em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoado com e sem balanço.

1.3 MOTIVAÇÃO

Sabe-se que o processo manual de cálculo para determinação dos trens-tipos e das cargas permanentes em pontes é um processo bastante trabalhoso e minucioso.

Atualmente, não se encontra um software livre e gratuito no qual é possível entrar com dados referentes à seção transversal de uma ponte rodoviária de concreto armado e, com isso, obter as cargas móveis (trens-tipo) e permanentes para o cálculo dos esforços máximos solicitantes da mesma.

As planilhas desenvolvidas neste trabalho são divididas em duas partes, de acordo com seu objetivo de cálculo.

As primeiras sete planilhas permitem que o usuário entre com os dados de pontes com seção transversal de duas, três, quatro, cinco, seis e sete vigas ou de seção celular e obtenha as cargas permanentes e as cargas móveis (trem-tipo positivo e trem-tipo negativo) referentes à mesma.

As duas últimas planilhas são alimentadas pelos resultados das primeiras e, através delas, torna-se possível o cálculo dos esforços máximos (Momento Fletor e Força Cortante) para pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoiado com e sem balanço.

2. CONCEITOS GERAIS

2.1 DEFINIÇÃO DE PONTE

A norma brasileira NBR 7188(2013) apresenta as seguintes definições para pontes, viadutos e passarelas:

Ponte:

Estrutura sujeita a ação de carga em movimento, com posicionamento variável (chamada de carga móvel), utilizada para transpor um obstáculo natural (rio, córrego, vale, etc.).

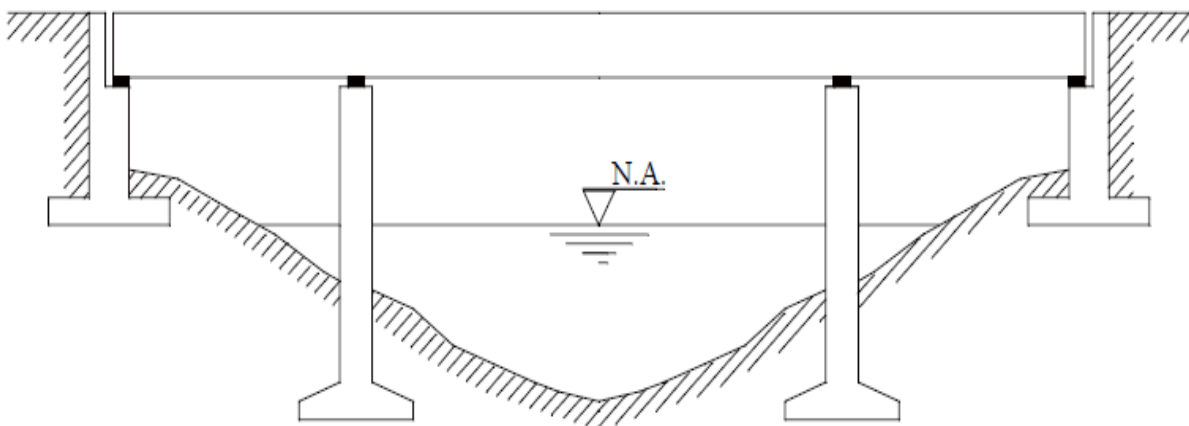
Viaduto:

Estrutura para transpor um obstáculo artificial (avenida, rodovia, etc.).

Passarela:

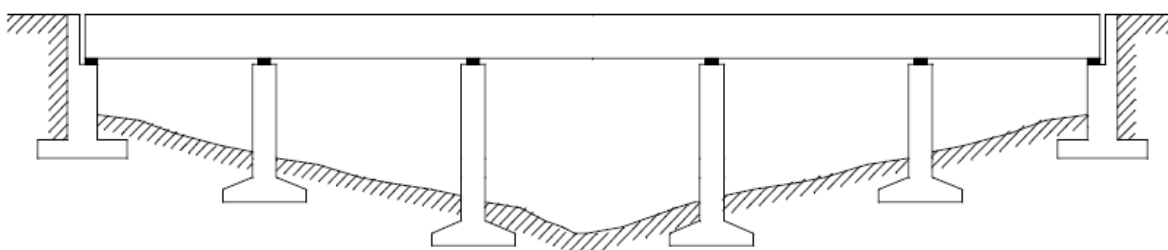
Estrutura longilínea, destinada a transpor obstáculos naturais e/ou artificiais exclusivamente para pedestres e/ou ciclistas.

Figura 1 - Esquema ilustrativo de ponte.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

Figura 2 - Esquema ilustrativo de viaduto.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

2.2 COMPONENTES DAS PONTES

As pontes são constituídas dos seguintes elementos:

2.2.1 Superestrutura

Conjunto de elementos estruturais, geralmente localizados na porção superior de uma ponte, que são responsáveis pelo transporte horizontal das cargas e sua transmissão à mesoestrutura, absorvendo diretamente os esforços resultantes do tráfego rodoviário, ferroviário, ciclovário ou pedonal. A superestrutura das pontes rodoviárias é constituída dos seguintes elementos:

- Lajes do tabuleiro;
- Vigamento do tabuleiro;
- Passeios de pedestres, guarda-corpo e beirais;
- Cortinas e alas;
- Placa de transição;
- Juntas de dilatação;
- Sistema de drenagem;
- Pista de rolamento dos veículos.

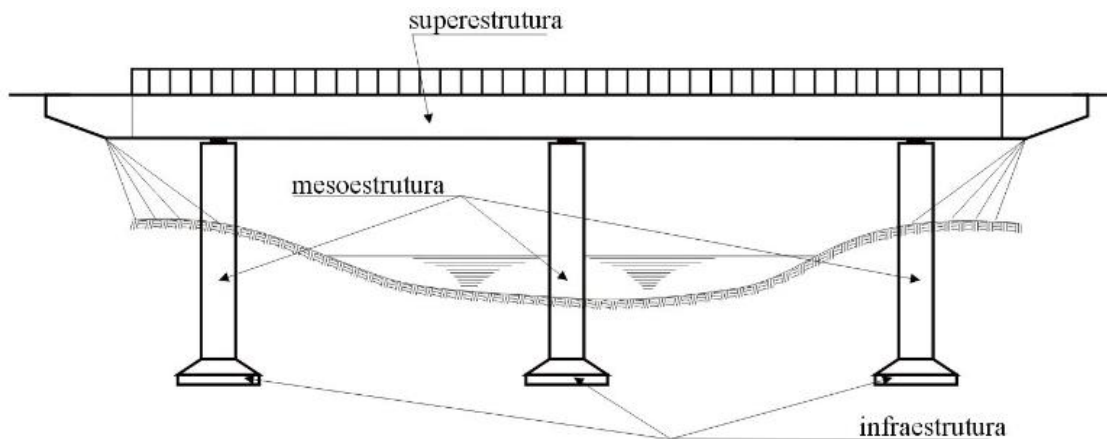
2.2.2 Mesoestrutura

A mesoestrutura das pontes tem a função de transmitir as cargas da superestrutura para a infraestrutura, e é constituída pelos pilares, travessas, aparelhos de apoio e vigas de contraventamento.

2.2.3 Infraestrutura

É a parte da ponte constituída por elementos que se destinam a transmitir ao terreno (rocha ou solo) os esforços transmitidos da mesoestrutura. Esses elementos geralmente são estacas, sapatas e tubulões. A infraestrutura de uma ponte também é conhecida como a fundação da mesma.

Figura 3 - Elementos componentes das pontes.



Fonte: (VITÓRIO, 2002)

2.3 CLASSIFICAÇÕES DAS PONTES

As pontes podem ser classificadas segundo diversos critérios, dentre eles estão o material, a extensão do vão (total), a durabilidade, a natureza do tráfego, o sistema estrutural da superestrutura e sua seção transversal.

➤ Quanto ao material

- Pontes de concreto (armado e/ou protendido);
- Pontes metálicas;
- Pontes mistas (aço/concreto, aço/madeira, etc.);
- Pontes de pedras;
- Pontes de madeira.

➤ Quanto à extensão do vão (total)

- Vão até 2 metros.....Bueiros;
- Vão de 2 a 10 metros.....Pontilhões;
- Vão com mais de 10 metros.....Pontes.

➤ Quanto à durabilidade

- Pontes permanentes;
- Pontes provisórias;
- Pontes desmontáveis (podem ser reaproveitadas).

➤ Quanto à natureza do tráfego

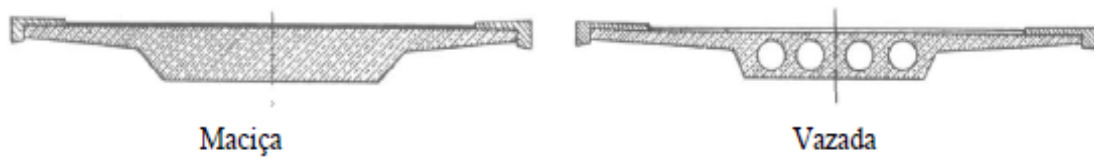
- Pontes rodoviárias;
- Pontes ferroviárias;
- Pontes aeroviárias (destinam-se ao trânsito de aviões em suas operações nos aeroportos sobre obstáculos diversos);
- Pontes para pedestres (passarelas);
- Pontes canal (também conhecidas como pontes navegáveis, destinam-se ao tráfego de embarcações com a finalidade de ligar dois canais ou mais);
- Pontes aqueduto;
- Pontes mistas (destinadas a mais de um tipo de tráfego, por exemplo, ponte rodo-ferroviária que serve para estabelecer a continuidade de um rodovia e de uma ferrovia).

➤ Quanto à seção transversal

- Pontes de Laje:

As pontes de laje são subdivididas em pontes de laje maciça e em pontes de laje vazada.

Figura 4 - Esquemas estruturais de pontes de laje.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

- Pontes de Viga:

As pontes de viga são subdivididas em pontes de viga com seção celular e pontes com vigas com seção T, esta última podendo ser constituídas de duas ou múltiplas vigas (grelha).

Figura 5 - Esquemas estruturais de pontes de viga.



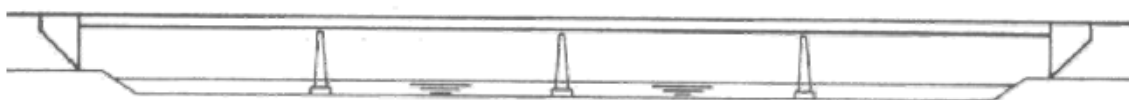
Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

➤ Quanto ao sistema estrutural da superestrutura

Por ser o sistema estrutural a ser analisado neste trabalho, a seguir tem-se uma breve explicação sobre a estrutura de pontes em viga.

- Pontes em Viga:

Figura 6 - Esquema estrutural de uma ponte em viga.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

A ponte em viga é o tipo estrutural mais antigo, pois uma tora de árvore caída sobre um rio caracteriza uma ponte em viga em sua forma mais simples. Estruturalmente este tipo de ponte é basicamente uma estrutura rígida colocada sobre dois pilares, assim o tabuleiro é solicitado por tração nas fibras inferiores e, por compressão, nas superiores. Uma das principais características de ponte em viga é que suas vinculações não transmitem momentos fletores da superestrutura para a infraestrutura.

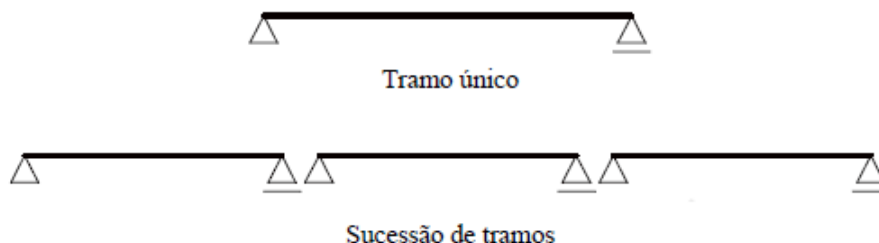
Conforme Pfeil (1983), “As pontes em vigas de concreto armado podem classificar-se segundo a disposição das vigas na seção transversal, ou segundo o esquema estrutural de cada viga considerada estruturalmente”.

Segundo El Debs e Takeya (2009), as pontes em vigas possuem quatro tipos de vinculações típicas, que são:

a) Vigas simplesmente apoiadas sem balanços

Este tipo de viga pode ser usado com um tramo único ou com sucessão de tramos, de acordo com a figura a seguir.

Figura 7 - Esquemas estáticos de pontes em vigas simplesmente apoiadas sem balanços.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

A sucessão de tramos simplesmente apoiados geralmente é utilizada em pontes com processo construtivo em vigas pré-moldadas. Neste tipo de viga é usual executar a laje do tabuleiro contínua em três ou quatro tramos, com o intuito de diminuir o número de juntas. Vale ressaltar que neste caso haverá reflexos benéficos também na distribuição de esforços nos apoios, em virtude das ações horizontais, como por exemplo, na ação da frenagem.

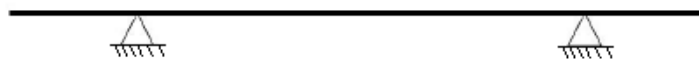
As vigas simplesmente apoiadas sem balanços são um tipo estrutural relativamente pobre, pois limita o tamanho do vão e existem poucas possibilidades

de melhorar a distribuição dos esforços. Por isso, os vãos utilizados com este tipo estrutural, dificilmente ultrapassam a casa dos 50 metros.

b) Vigas simplesmente apoiadas com balanços

Este tipo de vinculação possibilita uma melhor distribuição de esforços solitantes, uma vez que ao introduzir momentos negativos nos apoios haverá uma diminuição dos momentos positivos no meio do vão. Além dessa vantagem, o tipo estrutural em questão permite a eliminação do encontro, que é uma estrutura relativamente cara.

Figura 8 - Esquema estático de ponte em vigas simplesmente apoiadas com balanços.



Fonte: Autoria própria

No entanto, este tipo estrutural apresenta um ponto negativo relacionado à manutenção, que é a dificuldade de evitar a saída de material nas extremidades da ponte junto ao aterro. Por conta disso, seu uso está cada vez mais diminuindo.

O comprimento do balanço deve ser definido de forma que se tenha uma boa distribuição de esforços, atendendo às condições topográficas. Para o pré-dimensionamento, pode-se adotar para o comprimento do balanço um valor igual a cerca de 15% a 20% do comprimento da ponte. Devem ser evitados balanços muito grandes para não introduzir vibrações excessivas nas suas extremidades e também para que não haja prejuízos em relação à já comentada contenção do solo nas extremidades da ponte.

c) Vigas contínuas

Este tipo de viga apenas pode ser utilizado quando o comprimento da ponte pode ser subdividido em vãos parciais.

Figura 9 - Esquema estático de ponte em vigas contínuas.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

Se não houver restrições de ordem urbanística, topográfica ou construtiva, deve-se fazer os vãos extremos cerca de 20% menores que os vãos internos de forma que os máximos momentos fletores sejam aproximadamente iguais, resultando assim em uma melhor distribuição das solicitações.

A distribuição de momentos fletores pode também ser melhorada através da adoção de momentos de inércia das seções variáveis ao longo dos vãos. O aumento do momento de inércia das seções junto aos apoios implicará no aumento do momento fletor negativo dessas seções e na diminuição do momento fletor positivo das seções do meio dos vãos. A redução da altura das seções no meio dos vãos facilita o atendimento dos gabaritos relativos à transposição.

Outro aspecto relevante das pontes de vigas contínuas é o fato de não se ter juntas no tabuleiro. No entanto, quando o comprimento da ponte é muito grande, os efeitos de variação de temperatura se tornam importantes, e neste caso é conveniente introduzir juntas.

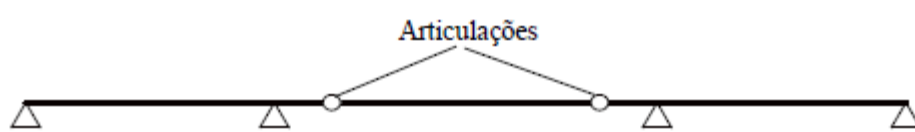
Como indicação inicial, pode ser adotado espaçamento de 100 m entre as juntas, no caso de se empregarem aparelhos de apoio comuns. No caso de aparelhos de apoio especiais à base de teflon, o espaçamento entre as juntas pode ser aumentado chegando até cerca de 400 m, como por exemplo é o caso da ponte Rio-Niterói.

Em princípio, as pontes de vigas contínuas devem ser evitadas em situações nas quais estão previstos deslocamentos de apoio significativos, pois recalques diferenciais provocarão esforços adicionais neste tipo de estrutura.

d) Vigas Gerber

A viga Gerber pode ser entendida como derivada da viga contínua, na qual são colocadas articulações para tornar o esquema isostático e, como consequência disto, não receberá esforços adicionais devidos aos recalques diferenciais.

Figura 10 - Esquema estático de ponte em viga Gerber.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

Se as articulações forem dispostas nos pontos de momento nulo do diagrama de momentos fletores provocados pela carga permanente, tem-se, o comportamento da viga Gerber, em relação às cargas permanentes, igual ao das vigas contínuas. Assim, para pontes de grandes vãos, em que o peso próprio representa uma grande parcela da totalidade das cargas, as vigas Gerber teriam um comportamento próximo ao das vigas contínuas, sem sofrer a influência danosa dos recalques diferenciais.

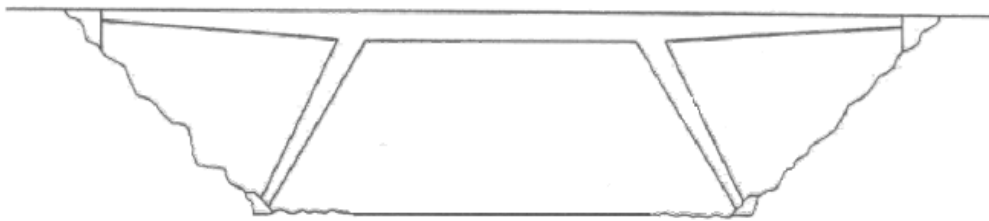
As vigas Gerber podem também ser entendidas como uma sucessão de tramos simplesmente apoiados com balanços e de tramos suspensos.

Cabe destacar ainda que se de um lado as juntas (dentes Gerber) acarretam as vantagens já mencionadas, de outro lado, elas representam trechos em que devem ser tomados cuidados redobrados tanto no detalhamento da armadura como na execução, em razão da grande redução da seção resistente ao esforço cortante que será transmitido pela articulação.

A seguir são expostos os outros tipos usuais de sistema estrutural da superestrutura:

- Pontes em Pórticos:

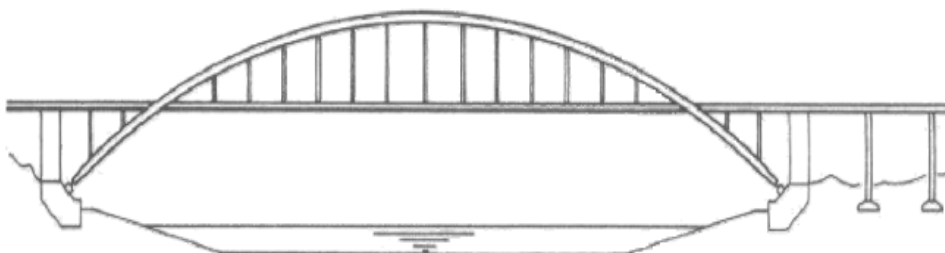
Figura 11 - Esquema estrutural de uma ponte em pórticos.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

- Pontes em Arco:

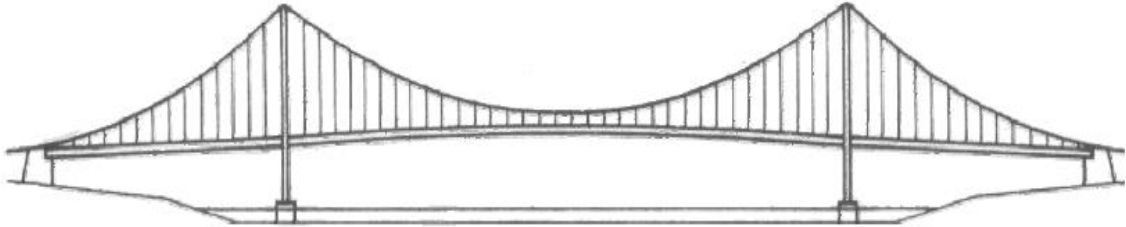
Figura 12 - Esquema estrutural de uma ponte em arco.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

- Pontes Pênseis:

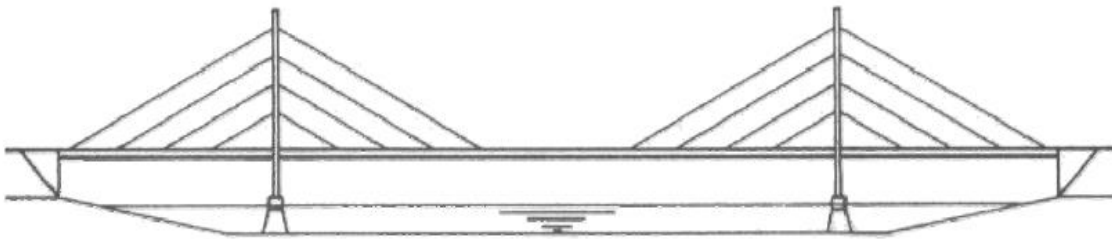
Figura 13 - Esquema estrutural de uma ponte pênsil.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

- Pontes Estaiadas:

Figura 14 - Esquema estrutural de uma ponte estaiada.



Fonte: (EL DEBS; TAKEYA, 2009)

3. REQUISITOS DE UMA PONTE

Segundo Pfeil (1983) as pontes devem atender a cinco requisitos principais, sejam eles:

➤ **Funcionalidade:**

O projeto de uma ponte deve atender perfeitamente as exigências de tráfegos, vazão, entre outras, para que se mantenha a funcionalidade da mesma.

➤ **Segurança:**

Para atender o requisito quanto à segurança, as pontes devem ser executadas com materiais cujas solicitações atuantes provoquem tensões inferiores as admissíveis ou que possam provocar rupturas.

➤ **Estética:**

As pontes devem ser projetadas de modo que harmonizem com o ambiente onde a mesma será construída.

➤ **Durabilidade:**

Será estabelecido um período em que a ponte deverá atender suas exigências de uso.

➤ **Economia:**

Devem ser realizados vários estudos de modo que se possam comparar as possíveis soluções. Aquela que atender aos requisitos citados acima com o menor custo será a que apresenta melhor viabilidade.

4. O PROJETO DE UMA PONTE

O projeto de uma ponte inicia-se, naturalmente, pelo conhecimento de sua futura finalidade. Definida a mesma, decorrem diversos estudos, a partir dos quais se torna possível realizar o correto dimensionamento da estrutura.

Os principais estudos que devem ser realizados para subsidiar o projeto de uma ponte estão especificados abaixo. Outras informações acessórias, tais como processo construtivo, capacidade técnica das empresas responsáveis pela execução e aspectos econômicos também podem influenciar na escolha do tipo de obra.

4.1 PROJETO GEOMÉTRICO

Entende-se por projeto geométrico a definição da largura das pontes e do gabarito da mesma, definido como o conjunto de espaços livres que deve apresentar o projeto de uma ponte de modo a permitir o escoamento do fluxo de veículos sobre a mesma. Estes elementos são definidos de acordo com as características e condições técnicas das vias especificadas pelos órgãos públicos responsáveis pela construção e manutenção dessas vias. Por exemplo, no caso de rodovias federais o órgão responsável pelas mesmas é o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

4.2 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

Segundo o Manual de Projeto de Obras de Arte Especial (1996), elaborado pelo antigo DNER, atual DNIT, os levantamentos topográficos necessários para o projeto de uma ponte são:

- Traçado do perfil longitudinal do terreno, ao longo do eixo do traçado, com greide cotado, desenhado em escala de 1/100 ou 1/200 e numa extensão tal que seja exequível a definição da obra e dos aterros de acesso;

- Execução de planta topográfica do trecho em que será implantada a obra, com curvas de nível de metro a metro, contendo o eixo do traçado, interferências existentes, tais como limites de divisas, linhas de transmissão, etc., e obstáculos a serem vencidos, com suas respectivas esconsidades, abrangendo área suficiente para a definição da obra e de seus acessos;
- Estudos detalhados da transição obra-de-arte-rodovia seja ela feita através de encontros ou de dispositivos de transição das pontes com extremos em balanço;
- Conhecimento de todas as condições topográficas de implantação das fundações, evitando-se escavações exageradas que venham a comprometer a estabilidade de encostas.

4.3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os estudos hidrológicos são importantes, pois visam caracterizar as condições de vazão máxima do curso d'água, para que a obra seja dimensionada de tal forma que impeça a inundação do leito viário ou das regiões vizinhas, bem como evitar o colapso da estrutura ou, numa pior situação, a perda de vidas humanas.

De posse dessas informações, procede-se ao cálculo da cota de máxima cheia e, após adicionar as alturas livre e de construção, é definida a altura livre e a cota da face superior do tabuleiro da ponte.

4.4 ESTUDOS GEOTÉCNICOS

Os elementos geotécnicos necessários à elaboração do projeto de uma ponte são:

- Relatório de prospecção de geologia aplicada no local de provável implantação da obra;
- Relatório completo de sondagem de reconhecimento do subsolo;
- Estudos geotécnicos especiais que permitam a elaboração de projeto do conjunto terreno-aterro-obra de arte, sempre que a estabilidade dos

terrenos contíguos à obra possa ser ameaçada pelas solicitações dos aterros de acesso.

4.5 ANÁLISE DAS CARGAS ATUANTES NA PONTE

Para que uma ponte seja dimensionada da forma correta e atenda as especificações de segurança, funcionalidade e durabilidade, todas as cargas as quais a ponte será submetida devem ser minuciosamente analisadas e calculadas.

4.6 ANÁLISE DE FADIGA

A Norma Brasileira não prevê nenhum tipo de carregamento especial para a verificação do Estado Limite Último de Fadiga. Esta verificação é feita para a Combinação Frequente das Ações.

4.7 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Segundo a NBR 6118 (2014), um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido.

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

A verificação da segurança em relação aos estados-limites últimos e aos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e de combinações de serviço, respectivamente.

4.7.1 Combinações Últimas

Uma combinação última pode ser classificada como normal, especial ou de construção e excepcional. Neste trabalho a combinação última a ser utilizada nos cálculos é a combinação última normal, descrita a seguir.

Na combinação última normal devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

A expressão é dada de acordo com a NBR 8186 (2003) e está expressa na equação (1) a seguir:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_g \cdot F_{G_{i,k}}) + \gamma_q \left[F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{0j} \cdot F_{Q_{j,k}}) \right] \quad (1)$$

Em que:

$F_{G_{i,k}}$ = Valor característico das ações permanentes;

$F_{Q_{1,k}}$ = Valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Q_{j,k}}$ = Valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

$\Psi_{0j} \cdot F_{Q_{j,k}}$ = Valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis.

Ψ_{0j} = Fator de redução que leva em conta o tipo de construção e material considerados;

γ_g = Coeficiente de ponderação para as ações permanentes, podendo este ser favorável ou desfavorável;

γ_q = Coeficiente de ponderação para as ações variáveis.

4.7.2 Combinações de Serviço

São classificadas de acordo com sua permanência na estrutura e devem ser verificadas como estabelecido a seguir:

a) quase permanentes: podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas;

b) frequentes: repetem-se muitas vezes durante o período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação dos estados-limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibrações excessivas. Podem também ser consideradas para verificações de estados-limites de deformações excessivas decorrentes de vento ou temperatura que podem comprometer as vedações;

c) raras: ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de formação de fissuras.

Como explicitado no item 4.6, para a verificação do Estado Limite Último de Fadiga em pontes, utiliza-se a Combinação Frequente das Ações, descrita a seguir:

$$F_{cf} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \Psi_1 \cdot F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n \left(\Psi_{2j} \cdot F_{Q_{j,k}} \right) \quad (2)$$

Em que:

Ψ_1 e Ψ_2 = Fatores de redução para as ações variáveis.

5. OBTENÇÃO DOS CARREGAMENTOS ATUANTES NA PONTE

Segundo a NBR 7188 (2013), a partir das cargas atuantes em determinada ponte é possível realizar o dimensionamento dos elementos constituintes da mesma. Essas cargas são divididas em:

5.1 CARGAS PERMANENTES

São representadas pelo peso próprio dos elementos estruturais da ponte e também dos elementos que estão fixados nas mesmas (Ex.: guarda-corpo, guarda-rodas, pavimentação, entre outros).

As cargas permanentes podem ser distribuídas ao longo de toda a extensão da ponte ou concentradas. O peso próprio da pavimentação é um exemplo de carga permanente distribuída e o peso próprio da transversina é um exemplo de carga permanente concentrada.

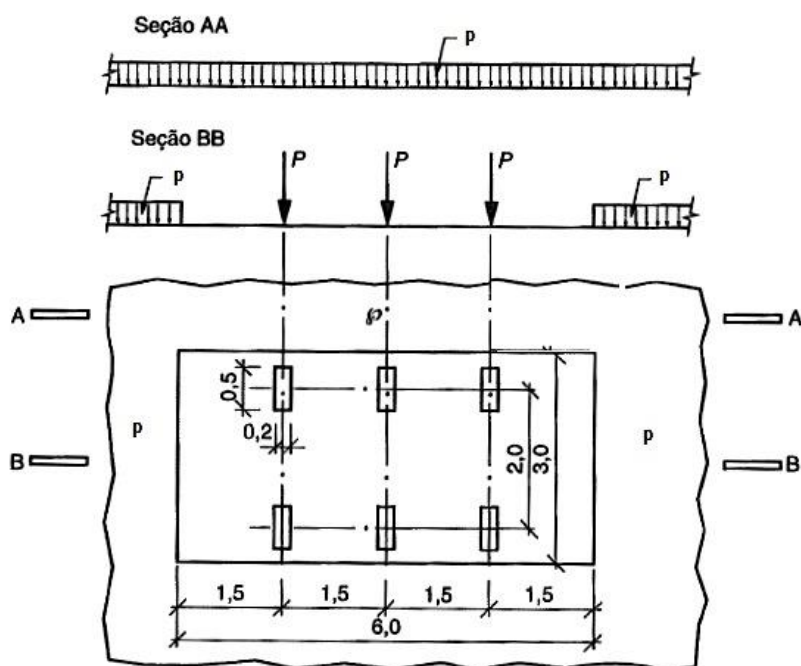
5.2 CARGAS MÓVEIS

São representadas pelas cargas produzidas pelos veículos que circulam pela ponte e cargas de multidão. Essa representação se dá através do chamado trem-tipo, determinado pela NBR 7188 (2013), também conhecido como TB-450.

Este trem-tipo representa um veículo de 450 kN, com seis rodas (cada uma com $P = 75$ kN), três eixos de cargas afastados entre si em 1,5 metros, com área de ocupação de 18 m², circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5$ kN/m².

Para obras em anel rodoviário e obras com distância inferior a 100 km em rodovias de acesso a terminais portuários, as cargas móveis características definidas acima devem ser majoradas em 10%, a critério da autoridade competente.

Figura 15 - Disposição das cargas estáticas do TB – 450.



Fonte: NBR 7188 (2013)

Devem ser estudadas as situações que produzem os esforços máximos e mínimos, ou seja, devem-se posicionar as cargas concentradas e distribuídas na linha de influência de forma a obter as situações mais desfavoráveis.

A atual norma NBR 7188 (2013), que define as cargas móveis rodoviárias, passou a definir, além do coeficiente de majoração para considerar o impacto vertical, mais dois coeficientes. Estes novos coeficientes consideram o impacto devido ao número de faixas carregadas e a proximidade em relação às juntas. Assim, os coeficientes de impacto considerados na atualização da norma citada são:

- a) Coeficiente de Impacto Vertical (CIV)

$CIV = 1,35$, para estruturas com vão menor que 10 metros;

$CIV = 1 + 1,06 \cdot \left(\frac{20}{Liv+50} \right)$, para estruturas com vão entre 10 e 200 metros.

Onde:

Liv é o vão em metros para o cálculo CIV , conforme o tipo de estrutura,

Sendo:

- $L_{iv} = L$ para estruturas de vão isostático (L é o vão, expresso em metros);
- L_{iv} é média aritmética dos vãos nos casos de vãos contínuos;
- L_{iv} é o comprimento do próprio balanço para estruturas em balanço.

Para estruturas com vãos acima de 200,0 m, deve ser realizado estudo específico para a consideração da amplificação dinâmica e definição do coeficiente de impacto vertical.

Esta expressão para o cálculo do CIV foi baseada na definição do coeficiente de impacto da norma japonesa Specifications for Highway Bridges.

b) Coeficiente de Números de Faixa (CNF)

$CNF = 1 - 0,05 \cdot (n - 2) > 0,9$, onde n é o número (inteiro) de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo.

Este coeficiente não se aplica ao dimensionamento de elementos estruturais transversais ao sentido do tráfego (Ex.: lajes, transversinas, etc).

c) Coeficiente de Impacto Adicional (CIA)

Os esforços das cargas móveis devem ser majorados nas regiões das juntas estruturais e extremidades da obra. Todas as seções dos elementos estruturais a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5 metros para cada lado da junta ou descontinuidade estrutural, devem ser dimensionadas com os esforços das cargas móveis majorados pelo CIA, abaixo definido:

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

$CIA = 1,15$, para obras em aço.

Portanto, o valor estático das cargas do trem-tipo acrescido de todos os coeficientes de majoração é assim definido:

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

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

Em que:

p = valor estático da carga móvel uniformemente distribuída;

q = valor estático p acrescido de todos os coeficientes de majoração;

P = valor estático de uma roda do veículo;

Q = valor estático de uma roda do veículo acrescido de todos os coeficientes de majoração;

CIV = Coeficiente de Impacto Vertical;

CNF = Coeficiente do Número de Faixas;

CIA = Coeficiente de Impacto Adicional.

5.3 CARGAS ACIDENTAIS

Geralmente são levadas em conta no cálculo da infraestrutura das pontes. As cargas acidentais podem ser de frenagem (ou aceleração), variação da temperatura, vento, retração do concreto, deformação lenta, impacto lateral, força centrífuga, protensão, atritos nos apoios, recalque de apoio, empuxo de terra (ou água), força no guarda-corpo e no guarda-rodas, pressões causadas pela água nos pilares, ação na neve, forças sísmicas, impactos nos pilares e forças de construção.

5.4 CARGAS DE PEDESTRES

Segundo a NBR 7188 (2013), nos passeios para pedestres das pontes deve-se adotar uma carga uniformemente distribuída de 3kN/m² na posição mais

desfavorável concomitante com a carga móvel rodoviária, para verificações e dimensionamentos dos diversos elementos estruturais, assim como para verificações globais.

Os elementos estruturais do passeio são dimensionados para uma carga distribuída de 5kN/m^2 . Deve-se ressaltar que as ações consideradas no dimensionamento dos mesmos não são ponderadas pelos coeficientes de impacto (CIV, CNF e CIA).

6. PLANILHAS DE CÁLCULO DE CARGAS PERMANENTES, CARGAS MÓVEIS (TRENS-TIPOS) E SOLICITAÇÕES MÁXIMAS EM PONTES RODOVIÁRIAS

Como já visto anteriormente, em pontes, o carregamento é dividido em carga permanente e carga móvel. O primeiro depende da seção transversal e material utilizado, e o segundo da finalidade da estrutura. A análise das cargas móveis deve ser feita por meio da variação da posição do trem-tipo no tabuleiro na direção transversal e longitudinal.

Para cada seção transversal, obtém-se um trem-tipo positivo e um trem-tipo negativo e a carga permanente total. Posteriormente, estas cargas serão posicionadas nas respectivas linhas de influência de suas seções longitudinais (neste trabalho foram analisadas as pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com e sem balanço) de modo a obter os esforços máximos em cada seção da ponte em estudo.

Para a realização destes cálculos foram desenvolvidas planilhas eletrônicas no Microsoft Excel.

Primeiramente, são apresentadas as planilhas que calculam os trens-tipos positivos e negativos (cargas móveis) e calculam também a carga permanente total para cada seção transversal (item 6.1)

Logo em seguida são apresentadas as planilhas que calculam os esforços solicitantes máximos, através das cargas permanentes e cargas móveis (trens-tipo) calculadas pelas planilhas apresentadas no item 6.1, para pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoiado com e sem balanço (item 6.2)

A seguir são apresentadas as telas iniciais das planilhas de cálculo das cargas permanentes e cargas móveis (como exemplo será apresentada a planilha para seção transversal de duas vigas) e das duas planilhas de cálculo dos esforços solicitantes máximos.

Figura 16 - Print da tela da planilha de cálculo para pontes de duas vigas.

LEGENDA		DADOS A SEREM PREENCHIDOS PELO USUÁRIO		DADOS TB-450	
1	DADOS A SEREM PREENCHIDOS PELO USUÁRIO	RESULTADOS			
2		CARGAS PERMANENTES			
3		CARGAS MÓVEIS		VIGA Y1= VIGA Y2 (PONTE SIMÉTRICA)	
4	CALCULO DO TREM-TIPO POSITIVO E NEGATIVO PARA PONTES COM SEÇÃO TRANSVERSAL DE DUAS VIGAS UTILIZANDO O TB-450	CARGAS TREM-TIPO POSITIVO (SEM IMPACTO)		VIGA Y1= VIGA Y2 (PONTE SIMÉTRICA)	
5		DADOS DE ENTRADA		CARGAS PERMANENTES	
6		DADOS DE ENTRADA		CARGAS PERMANENTES	
7	Distância entre o eixo das vigas	SÍMBOLO	VALOR	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO UNIDADE VALOR
8	Distância entre os eixos das vigas até a extremidade do tabuleiro	l	7.50	Carga concentrada de cada roda	P kN 75.00
9	Largura do guarda-rodas	a	2.75	Carga uniformemente distribuída	p kN/m 5.00
10	Distância entre as rodas	g	0.40	Distância entre a roda e o fim do veículo	d m 2.00
11	Espessura do laje	e	0.25	Distância entre os eixos	x m 0.50
12	Largura das vigas	b	0.45		
13	Altura das vigas	h	2.15		
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					

Fonte: Autoria própria

Figura 17- Print da tela da planilha de cálculo para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

DADOS DE ENTRADA		SEÇÃO LONGITUDINAL - PONTE BIAPOIADA SEM BALANÇO		COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA COMBINAÇÕES	
CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR E FORÇA CORTANTE PARA DIMENSIONAMENTO DE PONTES RODOVIARIAS EM VIGA COM VÃO LONGITUDINAL SIMPLEMENTE BIAPOIADO SEM BALANÇO UTILIZANDO O TB-450					
SEÇÃO TRANSVERSAL		TRÊS VIGAS		COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL - ELU	
VIGA A SER ANALISADA		V1 - TRÊS VIGAS		Favorável / Desfavorável	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (kN/m)		74,86		VALOR	
CARGA MÓVEL					
Carga concentrada em cada eixo (kN)		Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (kN/m)		Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (kN/m)	
q		q _{eixo}		q _{fora_eixo}	
TREM-TIPO POSI		11,42		24,68	
TREM-TIPO NEGA		-0,24		-4,31	
TREM-TIPO POSITIVO					
DEFINIÇÃO		q _{fora_eixo} (kN/m)		q _{eixo} (kN/m)	
SÍMBOLO		Q		Q (kN)	
TREM-TIPO POSI		147,08		24,68	
TREM-TIPO NEGA		-46,32		-4,31	
DISTÂNCIAS SEÇÃO LONGITUDINAL (m)		SÍMBOLO		VALOR	
Comprimento do Vão		l		40,00	
DADOS DAS TRANSVERSINAIS					
DESCRIBÇÃO		SÍMBOLO		VALOR	
Momento fletor devido à carga permanente das transversinas (kN.m)		M _{t,v}		1338,60	
Força Cortante devido à carga permanente das transversinas (kN)		V _{t,v}		100,47	
DADOS ADICIONAIS					
DESCRIBÇÃO		SÍMBOLO		VALOR	
Número (linear) de faixas de tráfego rodoviário		n		4	
Fator de redução de combinação frequente para ELS		ψ ₁		0,5	
Coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas		γ _d		1,5	
Coeficiente de ponderação para as ações variáveis indiretas		γ _i		1,00	
Coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas		γ _d		1,35	
MOMENTO FLETOR devido à Carga Permanente (kN.m)		M _g		16310,61	
FORÇA CORTANTE devido à Carga Permanente (kN)		V _g		1597,57	

OBS.: Para o Trem-tipo Negativo, o sentido das cargas é oposto ao da figura (Trem-tipo Positivo), ou seja, as mesmas são voltadas para cima.

Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Print da tela da planilha de cálculo para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

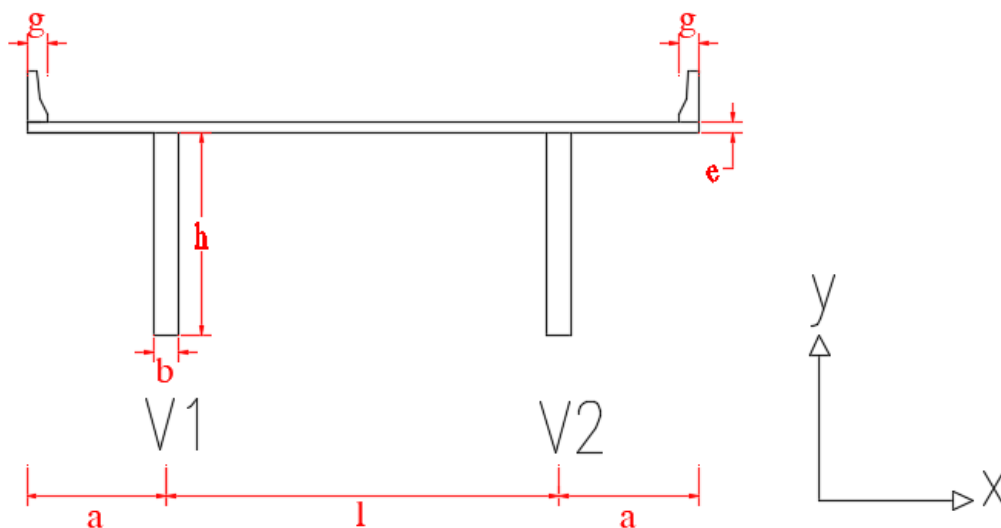
DADOS A SEREM PREENCHIDOS PELO USUÁRIO		DADOS CALCULADOS ATRAVÉS DAS PLANILHAS EM QUESTÃO		RESULTADOS DA PLANILHA EM QUESTÃO	
4 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR E FORÇA CORTANTE DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE PONTES RODOVÁRIAS EM VIGA COM VÃO LONGITUDINAL SIMPLEMENTE BIAPOIADO COM BALANÇO EM CONCRETO UTILIZANDO O TB-450					
DADOS DE ENTRADA					
SEÇÃO TRANSVERSAL			SEÇÃO LONGITUDINAL: PONTE BIAPOIADA COM BALANÇO		
VIGA A SER ANALISADA			COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL - ELU		
VIGAS PERMANENTE LONGARINAS (kNm)			Favorável / Desfavorável		
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (kNm)			VALOR		
CARGA MÓVEL			VALOR		
Carga concentrada em cada eixo (kN)			VALOR		
Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (kN/m)			VALOR		
Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (kN/m)			VALOR		
DEFINIÇÃO	q	q _{eixo}	q _{fora_eixo}	VALOR	Momento Fletor devido à Carga Permanente (kNm)
SÍMBOLO	Q	q _{eixo}	q _{fora_eixo}	VALOR	Momento Fletor devido à Carga Permanente (kNm)
TREM-TIPO PO	63,32	4,89	10,82	1,5	428,77
TREM-TIPO ME	-20,70	-0,11	-1,91	1,5	-359,38
TREM-TIPO POSITIVO					
DISTÂNCIAS SEÇÃO LONGITUDINAL (m)			SITUAÇÃO		
DESCRİÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	DESCRİÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Comprimento do Balanço	a	2,90			
Comprimento do Vão	l	10,00			
DADOS DA(S) TRANSVERSAL(S)					
DESCRİÇÃO			VALOR		
Momento menor devido à carga permanente das transversais			M _{1,v}		
Seção no meio do vão			4,94		
Seção no apoio			-218,10		
Força Cortante devido à carga permanente das transversais			V _{1,v}		
Seção no meio do vão			-116,32		
Seção no apoio			66,88		
OBS: Para o Trem-tipo Negativo, o sentido das cargas é oposto ao da figura (Trem-tipo Positivo), ou seja, as mesmas são voltadas para cima.					
DEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA COMBINAÇÃO DE					
DESCRİÇÃO			VALOR		
Coeficiente de ponderação para as ações permanentes			γ _p		
			1,00		
Coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas			γ _d		
			1,5		
COMBINAÇÃO FREQUENTE DE SERVIÇO - ELS			VALOR		
DESCRİÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	DESCRİÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Fator de redução de combinação frequente para ELS	ψ ₁	0,5			
DADOS ADICIONAIS					
DESCRİÇÃO			VALOR		
Número (inteiro) de faixas de tráfego			n		
			4		
FORÇAS					
DESCRİÇÃO			VALOR		
Força Cortante devido à Carga Permanente (kN)			Força Cortante devido à Carga Permanente (kN)		
SEÇÃO À ESQUERDA DO APOIO			-229,34		
SEÇÃO À DIREITA DO APOIO			293,02		

Fonte: Autoria própria

6.1 PLANILHAS DE CÁLCULO DA CARGA PERMANENTE TOTAL E CARGAS MÓVEIS (TRENS-TIPO)

6.1.1 Pontes de Duas Vigas

Figura 19 - Esquema ilustrativo: Pontes de duas vigas.



Fonte: Autoria própria

Nestas planilhas os dados são divididos em: dados preenchidos por livre escolha do usuário, dados fixos do Trem-tipo determinado pela NBR 7188 e dados calculados pela planilha em questão. Estes dados são diferenciados através da legenda a seguir:

Figura 20 - Legenda dos dados das planilhas de cálculo dos trens-tipos e cargas permanentes.

LEGENDA	DADOS A SEREM PREENCHIDOS PELO USUÁRIO	DADOS FIXOS	RESULTADOS DA PLANILHA EM QUESTÃO

Fonte: Autoria própria

Os procedimentos de cálculo dos trens-tipos e das cargas permanentes para pontes com seções transversais em duas vigas, grelha (vigas múltiplas) e seção celular serão explicados a seguir.

6.1.1.1 Dados de Entrada

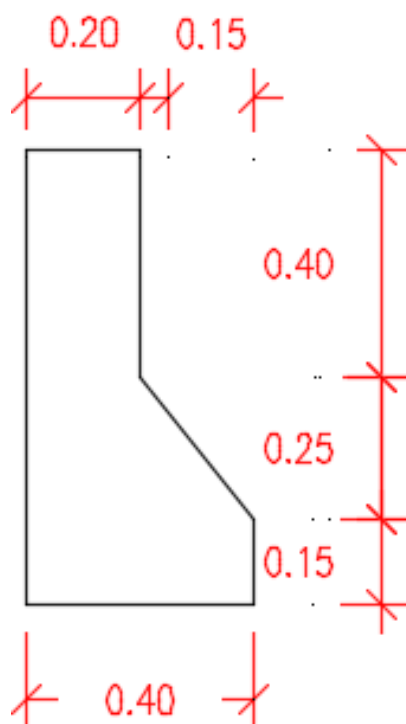
Dentre os dados de entrada se encontram os dados referentes à própria seção transversal em questão (em duas vigas), ao trem-tipo determinado pela NBR 7188 (2013), também conhecido como TB-450, e as especificações do revestimento e do guarda-rodas da ponte a ser estudada.

A NBR 7187 (2003) recomenda que, na avaliação das cargas devidas ao peso próprio dos elementos estruturais, o peso específico deve ser tomado no mínimo igual a 24 kN/m^3 para o concreto simples e 25 kN/m^3 para o concreto armado ou protendido.

Já para a avaliação da carga devida ao peso da pavimentação, a mesma recomenda que o peso específico do material empregado seja de no mínimo de 24 kN/m^3 , prevendo-se uma carga adicional de 2 kN/m^2 para atender a um possível recapeamento. A consideração desta carga adicional pode ser dispensada, a critério do proprietário da obra, no caso de pontes de grandes vãos.

Para os dados do guarda-rodas, foram adotadas as medidas de um guarda-rodas padrão, conforme a figura a seguir.

Figura 21 - Medidas guarda-rodas padrão.



Fonte: Autoria própria

Figura 22 - Dados referentes à planilha para pontes com seção transversal de duas vigas.

DISTÂNCIAS (m)		
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Distância entre o eixo das vigas	l	7.50
Distância entre os eixos das vigas até a extremidade do tabuleiro	a	2.75
Largura do guarda-rodas	g	0.40
Espessura da Laje	e	0.25
Largura das vigas	b	0.45
Altura das vigas	h	2.15

Fonte: Autoria própria

Figura 23 - Dados referentes ao TB-450 (NBR 7188).

DADOS TB-450			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda	P	KN	75.00
Carga uniformemente distribuída	p	KN/m	5.00
Distância entre as rodas	D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo	d	m	0.50
Distância entre os eixos	x	m	1.50

Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Dados referentes às especificações do revestimento e do guarda-rodas.

CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS			
DESCRIÇÃO		UNIDADE	VALOR
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00
	Recapeamento	kN/m ²	2.00
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00

Fonte: Autoria própria

6.1.1.2 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes

A carga permanente total atuante sobre a viga a ser analisada é composta pelas cargas devido ao peso próprio, ao revestimento e ao guarda-rodas segundo a equação (5).

$$G = g_p + g_g + g_r \quad (5)$$

Onde:

G = Carga permanente total atuante sobre a viga analisada;

g_p = Carga permanente devido ao peso próprio atuante sobre a viga analisada;

g_g = Carga permanente devido ao guarda-rodas atuante sobre a viga analisada;

g_r = Carga permanente devido ao revestimento atuante sobre a viga analisada.

A parcela da carga permanente devido ao peso próprio, ao guarda-rodas e ao revestimento é calculada através das equações (6), (7) e (8), respectivamente.

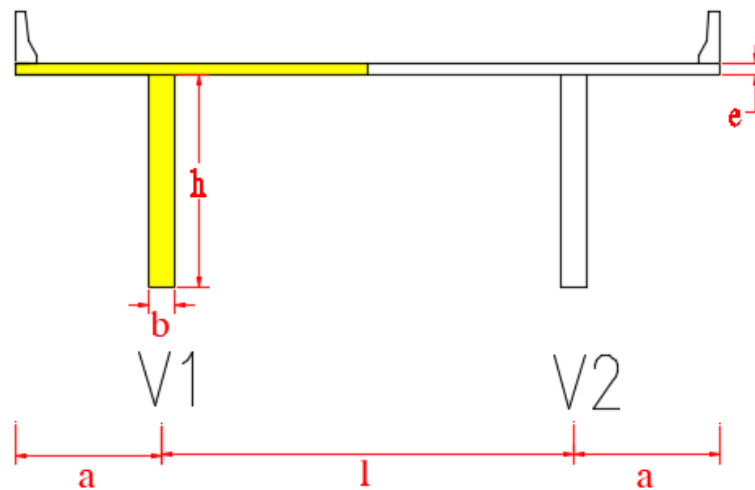
$$g_p = \text{Área}_{\text{influência}} \cdot \gamma_{\text{concreto}} \quad (6)$$

Onde:

g_p = Carga permanente devido ao peso próprio atuante sobre a viga analisada;

$\text{Área}_{\text{influência}}$ = Parcela da seção transversal referente à viga analisada (Para pontes com seção transversal de duas vigas, tem-se que a área de influência da viga V1 é a área representada em amarelo, conforme a figura a seguir).

Figura 25 - Representação da área de influência da viga V1.



Fonte: Autoria própria

Como se trata de uma ponte simétrica, a área de influência da viga V2 é a mesma da viga V1.

$\gamma_{concreto}$ = Peso específico do concreto (A NBR 7187 (2003) recomenda que os pesos específicos sejam de, no mínimo, 24 kN/m³ para concreto simples e de 25KN/m³ para concreto armado)

$$g_g = \frac{2 \cdot \text{Área}_{guarda_rodas} \cdot \gamma_{concreto}}{2} \quad (7)$$

Onde:

g_g = Carga permanente devido ao guarda-rodas atuante sobre a viga analisada;

$\text{Área}_{guarda_rodas}$ = Área do guarda-rodas obtida através das dimensões apresentadas na Figura 21;

$\gamma_{concreto}$ = Peso específico do concreto.

Obs.: Multiplica-se a equação (7) por dois visto que são dois guarda-rodas e divide-se a mesma por dois uma vez que a ponte de duas vigas é simétrica, ou seja, metade da carga dos guarda-rodas é transmitida a cada viga.

$$g_r = (e_p \cdot \gamma_{pav} + Recap) \cdot \frac{(B')}{2} \quad (8)$$

Onde:

g_r = Carga permanente devido ao revestimento atuante sobre a viga analisada;

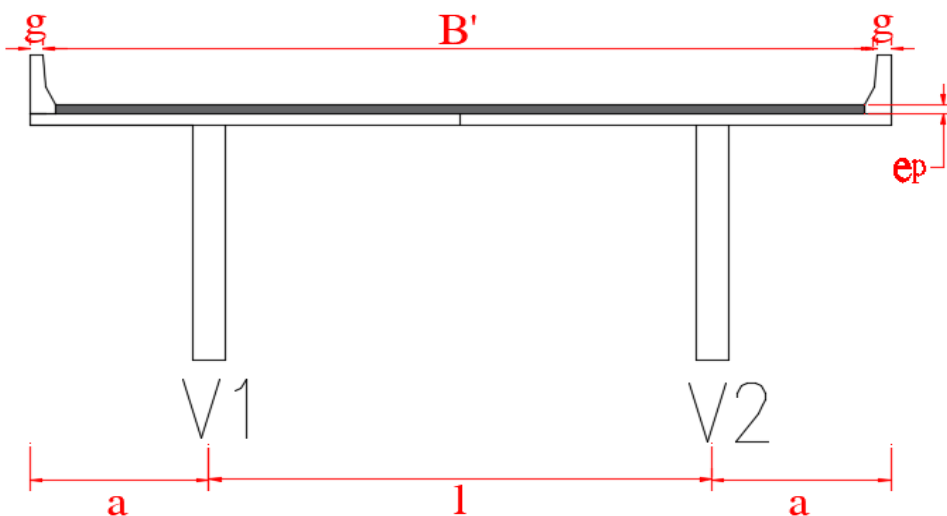
e_p = Espessura do pavimento;

γ_{pav} = Peso específico do pavimento;

$Recap$ = Recapeamento (A NBR 7187 (2003) recomenda uma carga de 2 kN/m² para o recapeamento);

B' = Largura trafegável.

Figura 26 - Representação do pavimento em pontes de duas vigas.



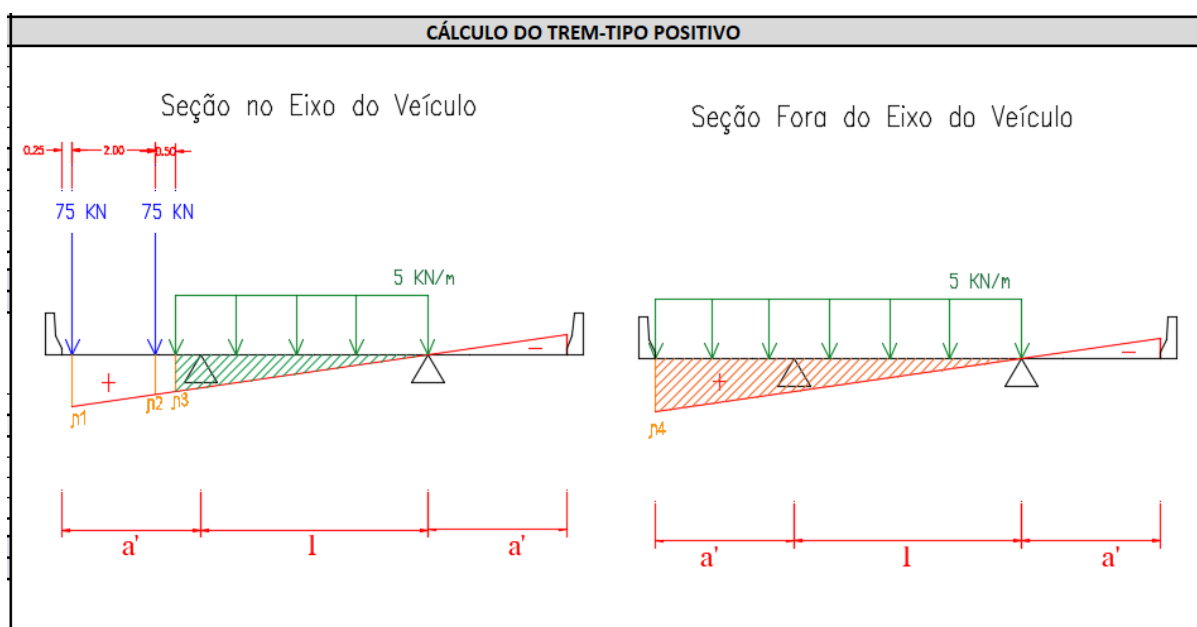
Fonte: Autoria própria

Divide-se a equação (8) por dois uma vez que a carga distribuída referente ao revestimento atua de forma semelhante nas duas vigas, pois se trata de uma ponte duas vigas e simétrica.

6.1.1.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis

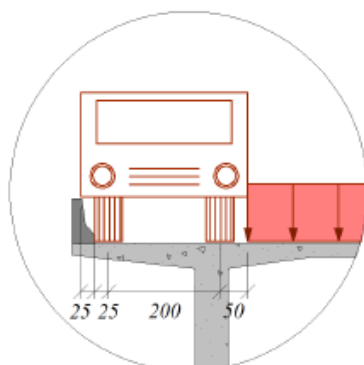
Consistem na distribuição transversal das cargas do trem-tipo TB-450 nas linhas de influência. Para tanto, traça-se a linha de influência de reação de apoio para a seção transversal da ponte, para cada um dos apoios (que são as vigas). Em seguida aplica-se o trem-tipo sobre essas linhas de influência de reação de apoio, buscando-se a posição que resultará na maior e menor reação de apoio para cada um dos apoios (vigas). As figuras 27 a 29 exemplificam o procedimento descrito.

Figura 27 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de Influência de reação de apoio das vigas V1 e V2 para determinação do trem-tipo positivo.



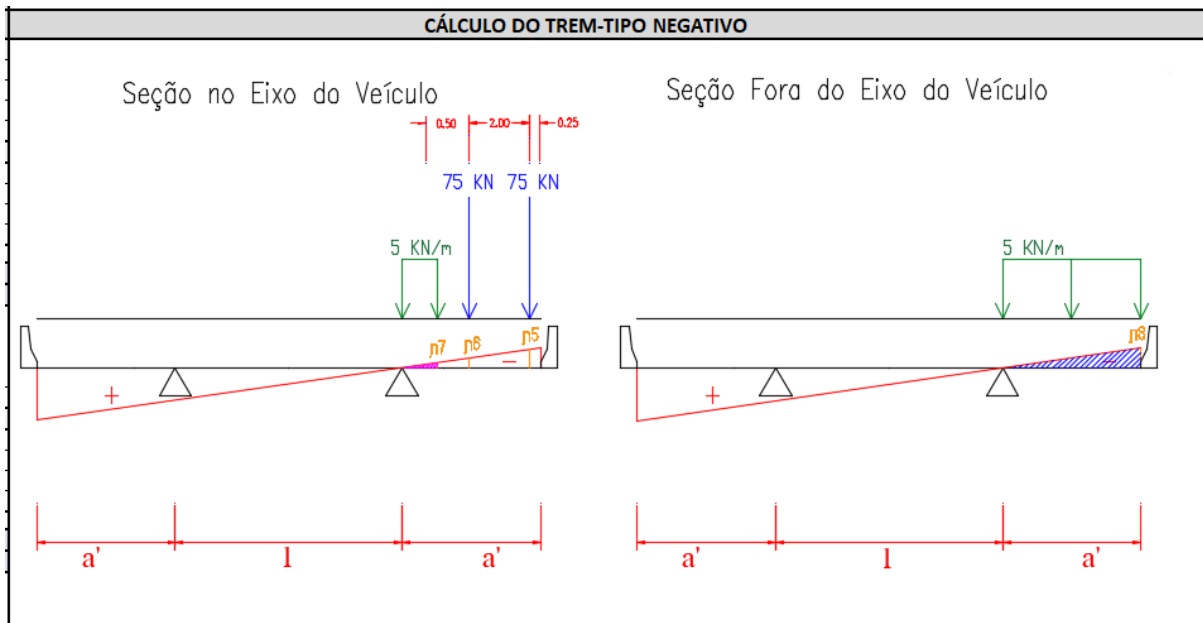
Fonte: Autoria própria

Figura 28 - Posicionamento do TB - 450.



Fonte: Notas de Aula (INBEC)

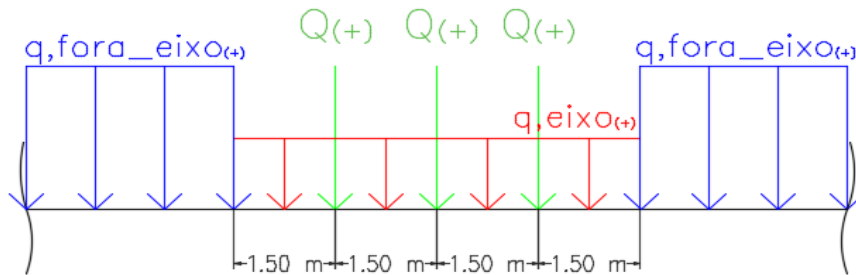
Figura 29 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de Influência de reação de apoio das vigas V1 e V2 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

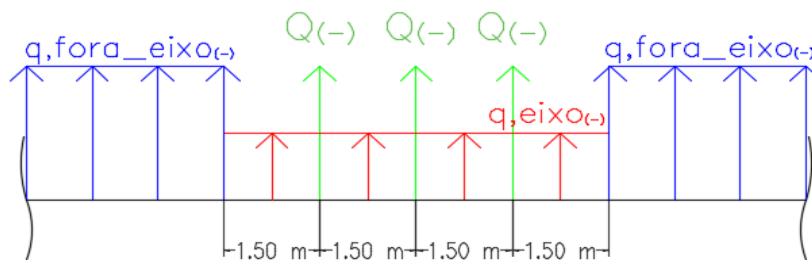
O próximo passo é determinar os trens-tipo longitudinal positivo e negativo, representados nas figuras 30 e 31 a seguir, a ser posicionado nas linhas de influência dos esforços solicitantes e assim determiná-los.

Figura 30 - Trem-tipo longitudinal positivo



Fonte: Autoria própria

Figura 31 - Trem-tipo longitudinal negativo



Fonte: Autoria própria

Com as cargas posicionadas, encontram-se as coordenadas (etas – η) referentes a cada carga na linha de influência através de proporção.

Para encontrar as cargas concentradas no eixo do veículo (Q), as cargas uniformemente distribuídas no eixo do veículo ($q, eixo$) e as cargas uniformemente distribuídas fora do eixo do veículo ($q, fora_eixo$) dos trens-tipos positivo e negativo são utilizadas as equações a seguir:

Trem-tipo positivo:

$$Q_{(+)} = 75 \cdot (\eta_1 + \eta_2) \quad (9)$$

$$q, eixo_{(+)} = 5 \cdot \text{Área}_{\Delta\eta_3} \quad (10)$$

$$q, fora_eixo_{(+)} = 5 \cdot \text{Área}_{\Delta\eta_4} \quad (11)$$

Onde:

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$q, eixo_{(+)}$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$q, fora_eixo_{(+)}$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

η_1, η_2, η_3 e η_4 = Coordenadas da linha de influência;

$\text{Área}_{\Delta\eta_3}$ = Área do triângulo da parte positiva da linha de influência definido através da coordenada η_3 (Representada pela hachura verde na Figura 28);

$\text{Área}_{\Delta\eta_4}$ = Área do triângulo da parte positiva da linha de influência definido através da coordenada η_4 (Representada pela hachura laranja na Figura 28).

Trem-tipo negativo:

$$Q_{(-)} = 75 \cdot (\eta_5 + \eta_6) \quad (12)$$

$$q, \text{eixo}_{(-)} = 5 \cdot \text{Área}_{\Delta\eta_7} \quad (13)$$

$$q, \text{fora_eixo}_{(-)} = 5 \cdot \text{Área}_{\Delta\eta_8} \quad (14)$$

Onde:

$Q_{(-)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal negativo;

$q, \text{eixo}_{(-)}$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal negativo;

$q, \text{fora_eixo}_{(-)}$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal negativo;

η_5, η_6, η_7 e η_8 = Coordenadas da linha de influência;

$\text{Área}_{\Delta\eta_7}$ = Área do triângulo da parte negativa da linha de influência definido através da coordenada η_7 (Representada pela hachura rosa na Figura 29);

$\text{Área}_{\Delta\eta_8}$ = Área do triângulo da parte negativa da linha de influência definido através da coordenada η_8 (Representada pela hachura azul na Figura 29).

Obs.: As coordenadas das linhas de influência (etas) devem ser inseridas nas equações com seus respectivos sinais (positivo ou negativo), assim como no cálculo das áreas das regiões de atuação das cargas.

6.1.1.4 Resultados

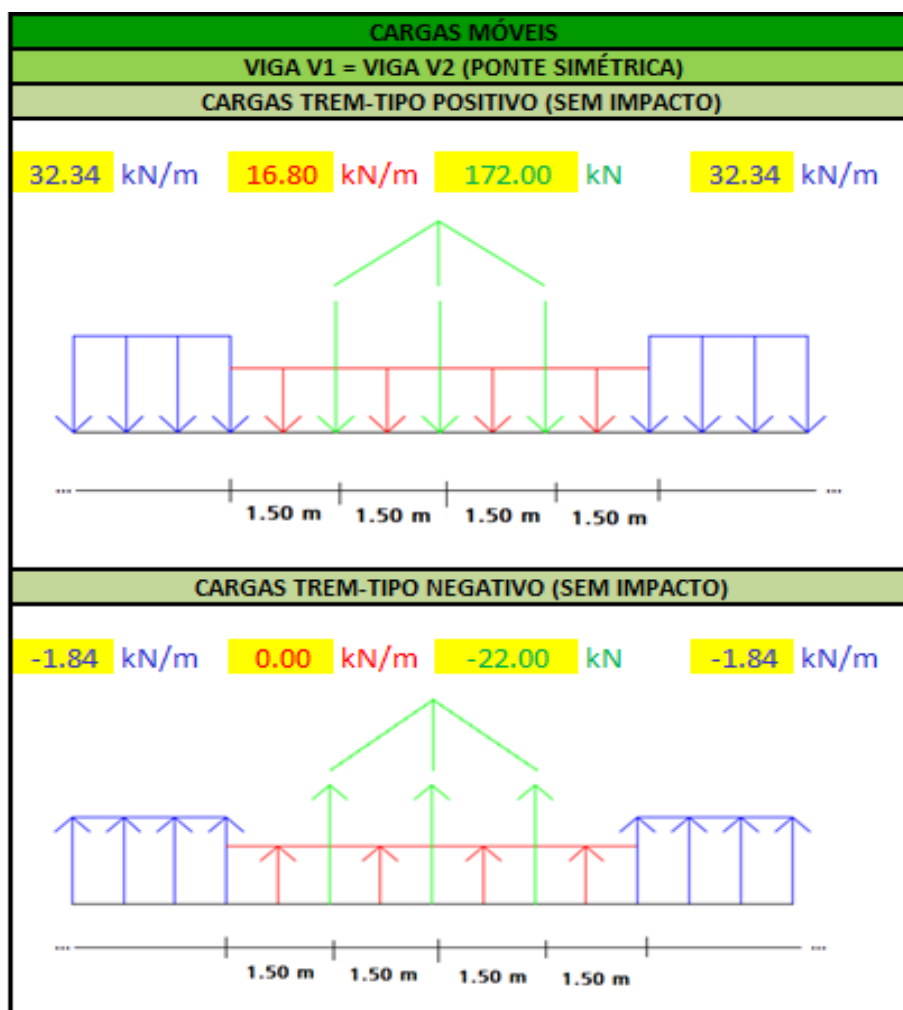
Através dos cálculos expostos acima, obtêm-se carga permanente total (G), a carga concentrada de cada eixo (Q), e as cargas distribuídas dentro (q_1) e fora (q_2) do eixo do veículo, conforme as figuras a seguir:

Figura 32 - Resultado: Cargas permanentes para as vigas V1 e V2.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA V1 = VIGA V2 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	14.74
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	5.75
Carga Permanente devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	64.81
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	85.30

Fonte: Autoria própria

Figura 33 - Resultado: Trens-tipos positivo e negativo (cargas móveis) para as vigas V1 e V2



Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Legenda e descrição das cargas móveis (trens-tipo).

DESCRIÇÃO DAS CARGAS	
Carga concentrada de cada eixo	
Carga uniformemente distribuída (no eixo do veículo)	
Carga uniformemente distribuída (fora do eixo do veículo)	

Fonte: Autoria própria

6.1.2 Pontes de Grelha (Vigas Múltiplas)

O procedimento explicitado a seguir se aplica a pontes com seção transversal de grelha (vigas múltiplas igualmente espaçadas). Neste trabalho foram estudadas pontes de grelha com três, quatro, cinco, seis e sete vigas.

Figura 35 - Esquema ilustrativo: Pontes de três vigas.

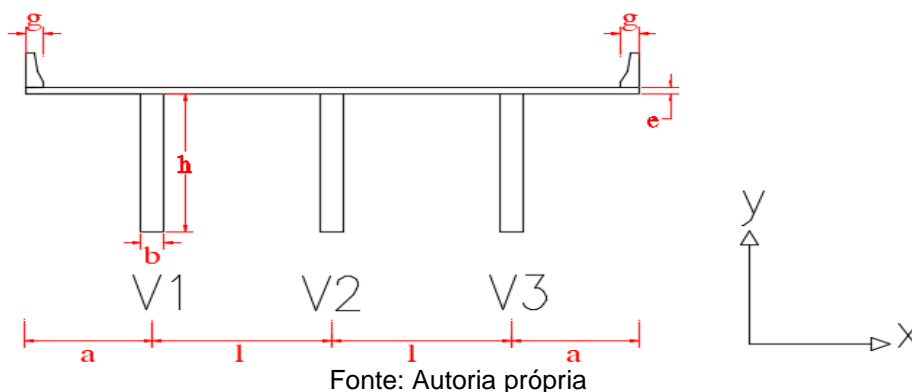


Figura 36 - Esquema ilustrativo: Pontes de quatro vigas.

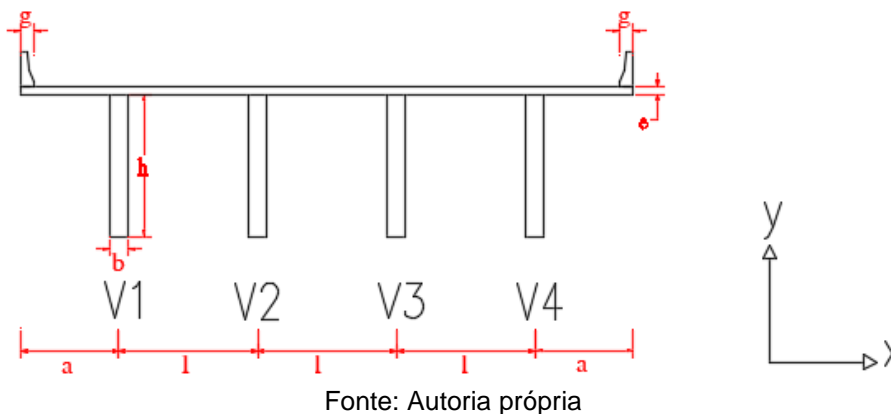
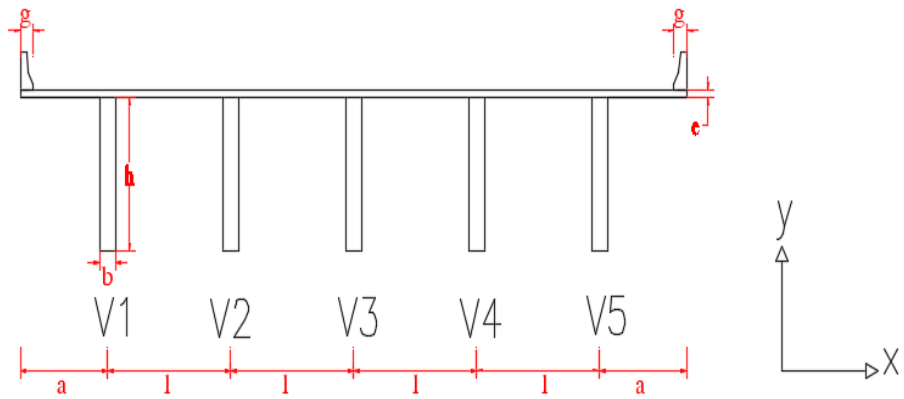
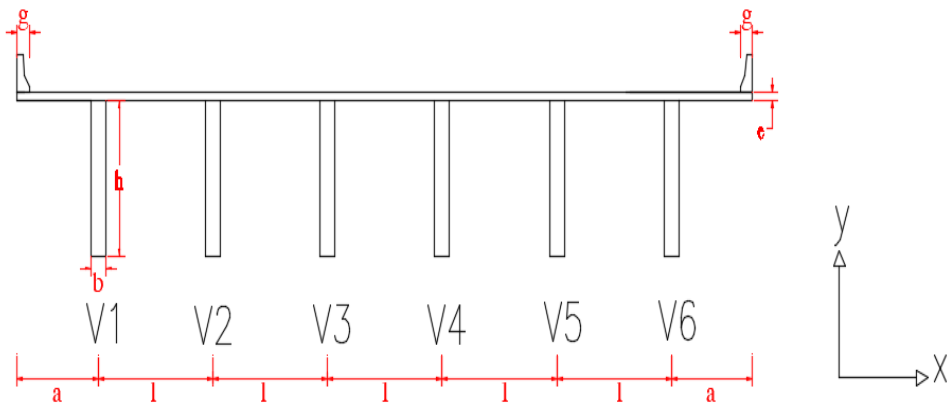


Figura 37 - Esquema ilustrativo: Pontes de cinco vigas.



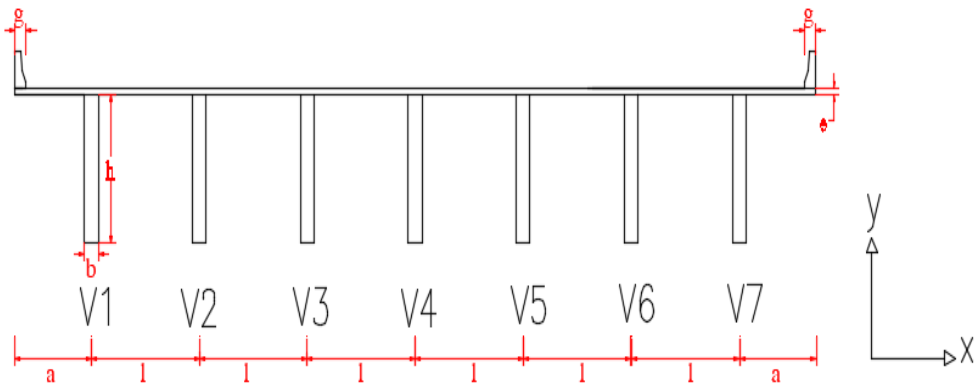
Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Esquema ilustrativo: Pontes de seis vigas.



Fonte: Autoria própria

Figura 39 - Esquema ilustrativo: Pontes de sete vigas.



Fonte: Autoria própria

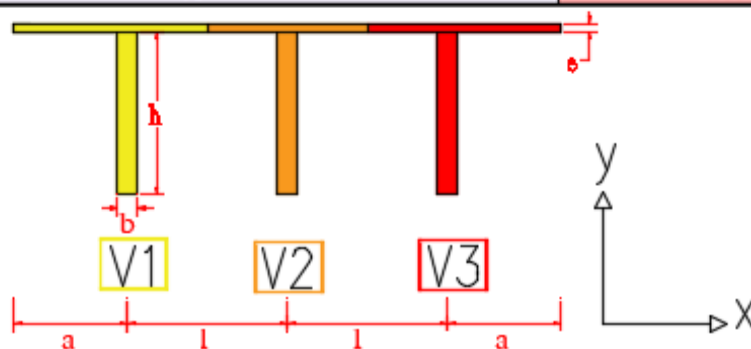
6.1.2.1 Dados de Entrada

Além daqueles expostos no programa para a seção de duas vigas, os dados de entrada para o programa de cálculo para seção transversal de vigas múltiplas incluem os momentos de inércia em relação ao eixo x de cada uma das vigas, conforme a figura a seguir.

Vale lembrar que nas figuras abaixo a laje está trabalhando como mesa colaborante para a viga, porém, as planilhas elaboradas são válidas para a situação de mesa colaborante e sem mesa colaborante.

Figura 40 - Dados de entrada para a planilha de pontes de três vigas.

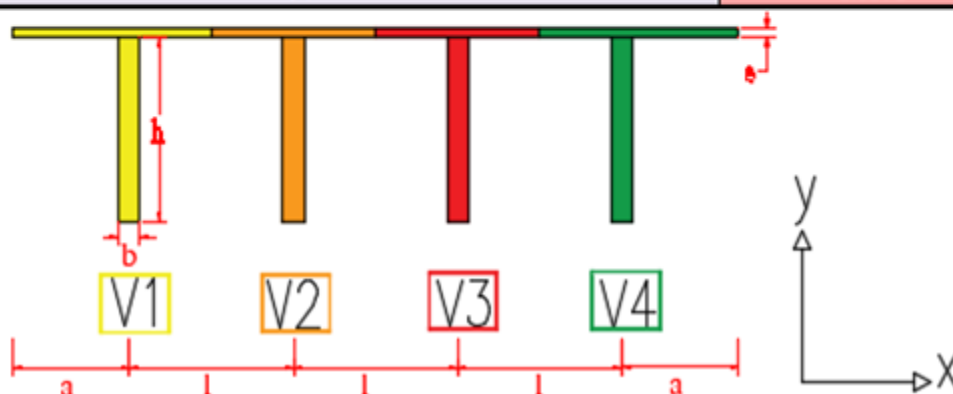
DISTÂNCIAS (m)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Distância o eixo das vigas V1 e V3 e a extremidade do tabuleiro	a		2.75
Distância entre o eixo das vigas	l		3.75
Largura do guarda-rodas	g		0.40
Espessura da Laje	e		0.25
Largura das vigas	b		0.45
Altura das vigas	h		2.15
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS			
DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR	
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00
	Recapeamento	kN/m ²	2.00
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00
DADOS TB-450			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda	P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída	p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas	D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo	d	m	0.50
Distância entre os eixos	x	m	1.50
MOMENTO DE INÉRCIA DAS VIGAS (m ⁴)			
IDENTIFICAÇÃO DA VIGA	MOMENTO DE INÉRCIA EM RELAÇÃO AO EIXO X		
V1	1.0683		
V2	1.0632		
V3	1.0683		



Fonte: Autoria própria

Figura 41 - Dados de entrada para a planilha de pontes de quatro vigas.

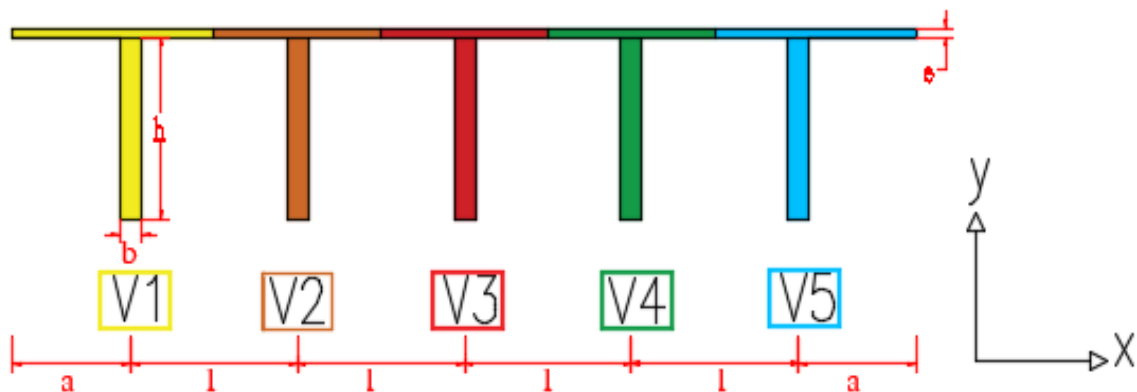
DISTÂNCIAS (m)				
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	VALOR	
Distância entre os eixos das vigas V1 e V4 até a extremidade do tabuleiro		a	0.95	
Distância entre os eixos das vigas		l	3.70	
Largura do guarda-rodas		g	0.40	
Espessura da Laje		e	0.25	
Largura das vigas		b	0.45	
Altura das vigas		h	2.15	
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS				
DESCRIÇÃO		UNIDADE	VALOR	
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10	
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00	
	Recapeamento	kN/m ²	2.00	
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23	
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00	
DADOS TB-450				
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda		P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída		p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas		D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo		d	m	0.50
Distância entre os eixos		x	m	1.50
MOMENTO DE INÉRCIA DAS VIGAS (m ⁴)				
IDENTIFICAÇÃO DA VIGA			MOMENTO DE INÉRCIA EM RELAÇÃO AO EIXO X	
V1			1.0571	
V2			1.0585	
V3			1.0585	
V4			1.0571	



Fonte: Autoria própria

Figura 42 - Dados de entrada para a planilha de pontes de cinco vigas.

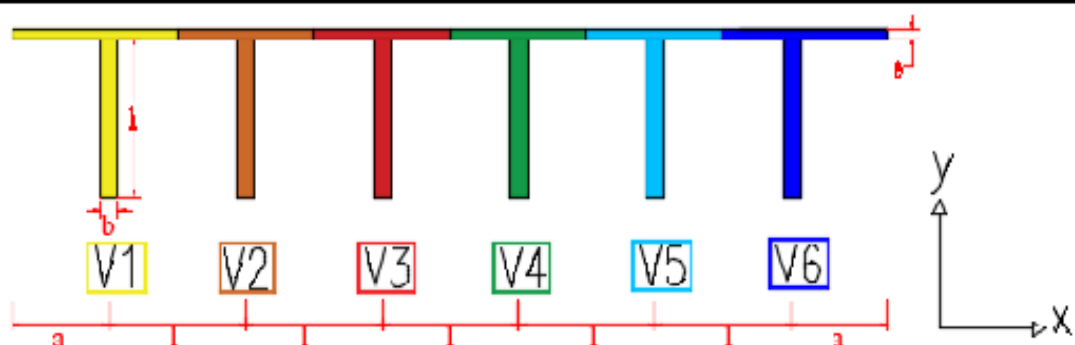
DISTÂNCIAS (m)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Distância entre os eixos das vigas V1 e V5 até a extremidade do tabuleiro	a	0.95	
Distância entre os eixos das vigas	l	2.30	
Largura do guarda-rodas	g	0.40	
Espessura da Laje	e	0.25	
Largura das vigas	b	0.45	
Altura das vigas	h	2.15	
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS			
DESCRIÇÃO		UNIDADE	VALOR
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00
	Recapeamento	kN/m ²	2.00
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00
DADOS TB-450			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda	P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída	p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas	D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo	d	m	0.50
Distância entre os eixos	x	m	1.50
MOMENTO DE INÉRCIA DAS VIGAS (m ⁴)			
IDENTIFICAÇÃO DA VIGA		MOMENTO DE INÉRCIA EM RELAÇÃO AO EIXO X	
V1		1.6900	
V2		1.7435	
V3		1.7435	
V4		1.7435	
V5		1.6900	



Fonte: Autoria própria

Figura 43 - Dados de entrada para a planilha de pontes de seis vigas.

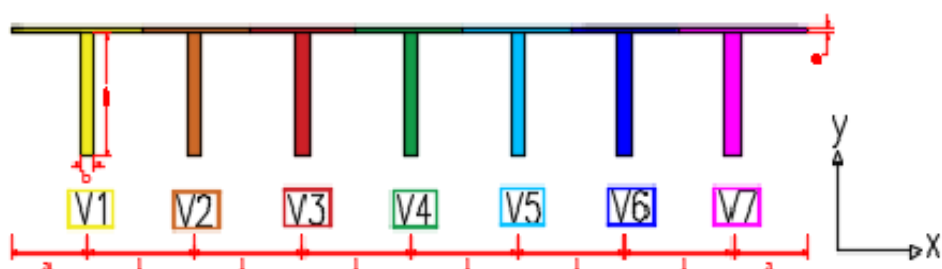
DISTÂNCIAS (m)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Distância entre os eixos das vigas V1 e V6 até a extremidade do tabuleiro	a	0.95	
Distância entre os eixos das vigas	l	2.22	
Largura do guarda-rodas	g	0.40	
Espessura da Laje	e	0.25	
Largura das vigas	b	0.45	
Altura das vigas	h	2.15	
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS			
DESCRIÇÃO		UNIDADE	VALOR
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00
	Recapeamento	kN/m ²	2.00
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00
DADOS TB-450			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda	P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída	p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas	D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo	d	m	0.50
Distância entre os eixos	x	m	1.50
MOMENTO DE INÉRCIA DAS VIGAS (m ⁴)			
IDENTIFICAÇÃO DA VIGA		MOMENTO DE INÉRCIA EM RELAÇÃO AO EIXO X	
V1		1.2701	
V2		1.1229	
V3		1.1229	
V4		1.1229	
V5		1.1229	
V6		1.2701	



Fonte: Autoria própria

Figura 44 - Dados de entrada para a planilha de pontes de sete vigas.

DISTÂNCIAS (m)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Distância entre os eixos das vigas V1 e V7 até a extremidade do tabuleiro	a	0.95	
Distância entre os eixos das vigas	l	1.85	
Largura do guarda-rodas	g	0.40	
Espessura da Laje	e	0.25	
Largura das vigas	b	0.45	
Altura das vigas	h	2.15	
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS			
DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR	
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10
	Peso específico do pavimento	kN/m ³	24.00
	Recapeamento	kN/m ³	2.00
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23
	Peso específico do concreto armado	kN/m ³	25.00
DADOS TB-450			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda	P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída	p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas	D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo	d	m	0.50
Distância entre os eixos	x	m	1.50
MOMENTO DE INÉRCIA DAS VIGAS (m ⁴)			
IDENTIFICAÇÃO DA VIGA	MOMENTO DE INÉRCIA EM RELAÇÃO AO EIXO X		
V1	1.0571		
V2	1.0585		
V3	1.0585		
V4	1.0585		
V5	1.0585		
V6	1.0585		
V7	1.0571		



Fonte: Autoria própria

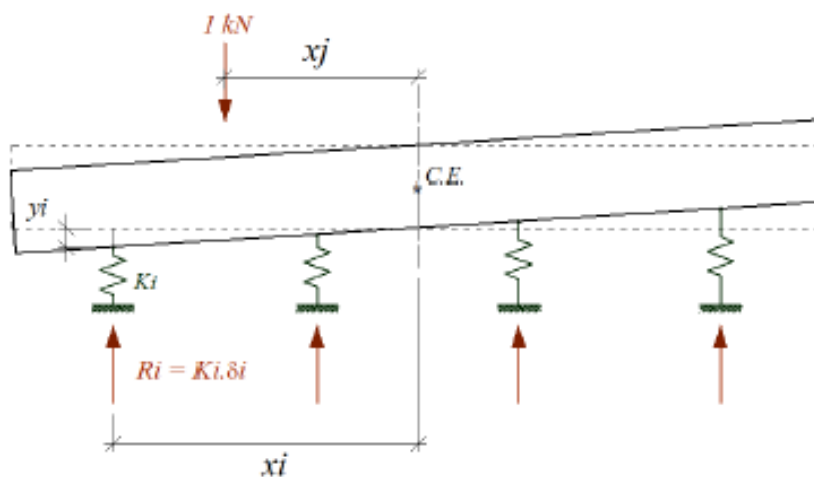
6.1.2.2 Procedimento de Cálculo – Método de Courbon

Para o cálculo tanto das cargas permanentes quanto o das cargas móveis utiliza-se o Método de Courbon. Este método considera as seguintes hipóteses:

- A altura das transversinas possui ordem de grandeza similar a das longarinas;
- A transversina possui rigidez infinita e as longarinas são deformáveis;
- A espessura das longarinas e das lajes são pequenas quando comparadas com o vão;
- O efeito da torção nas vigas é desconsiderado.

Segundo Courbon, pode-se admitir um modelo de corpo rígido sobre apoios elásticos sendo k a rigidez vertical de cada uma das longarinas em uma seção qualquer.

Figura 45 - Modelo de corpo rígido sobre apoios elásticos com rigidez k .



Fonte: Notas de Aula (INBEC)

A hipótese de assumir a transversina ser infinitamente rígida ($EI \rightarrow \infty$) permite escrever:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \rightarrow 0 \quad (15)$$

Equação da linha elástica:

$$y = A + Bx \quad (16)$$

Fazendo o equilíbrio das forças:

$$\sum R_i = 1 \quad (17)$$

$$\sum(K_i \cdot y_i) = 1 \quad (18)$$

$$\sum K_i(A + Bx_i) = 1 \quad (19)$$

$$A \sum K_i + B \sum(K_i \cdot x_i) = 1 \quad (20)$$

$$A = \frac{1}{\sum K_i} \quad (21)$$

Fazendo o equilíbrio de momentos em torno do C.E.:

$$\sum(R_i \cdot x_i) = 1 \cdot x_j \quad (22)$$

$$\sum(K_i \cdot y_i x_i) = 1 \cdot x_j \quad (23)$$

$$\sum[K_i(A + B \cdot x_i)x_i] = 1 \cdot x_j \quad (24)$$

$$A \sum K_i \cdot x_i + B \sum(K_i \cdot x_i^2) = 1 \cdot x_j \quad (25)$$

$$B = \frac{x_j}{\sum(K_i \cdot x_i^2)} \quad (26)$$

Substituindo A e B na equação da linha elástica:

$$y_i = \frac{1}{\sum K_i} + \frac{x_j \cdot x_i}{\sum(K_i \cdot x_i^2)} \quad (27)$$

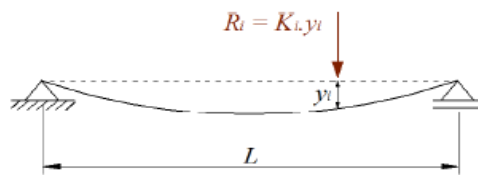
Fazendo $R_i = K_i \cdot y_i$

$$R_{i,j} = K_i \left(\frac{1}{\sum K_i} + \frac{x_j \cdot x_i}{\sum(K_i \cdot x_i^2)} \right) \quad (28)$$

Sendo $R_{i,j}$ a reação da viga i para uma carga unitária na posição j.

Dada a deformada da viga i:

Figura 46 - Deformada da viga.



Fonte: Notas de Aula (INBEC)

$$y_i = \frac{R_i \cdot L^3}{c \cdot E \cdot I_i} = C \frac{R_i}{I_i} = \frac{R_i}{K_i}, \text{ com } K_i = \frac{I_i}{C} \quad (29)$$

Substituindo na equação de $R_{i,j}$, tem-se:

$$R_{i,j} = \frac{I_i}{c} \left(\frac{c}{\sum I_i} + \frac{c \cdot x_j \cdot x_i}{\sum (I_i \cdot x_i^2)} \right) \quad (30)$$

Chega-se então ao valor de $R_{i,j}$:

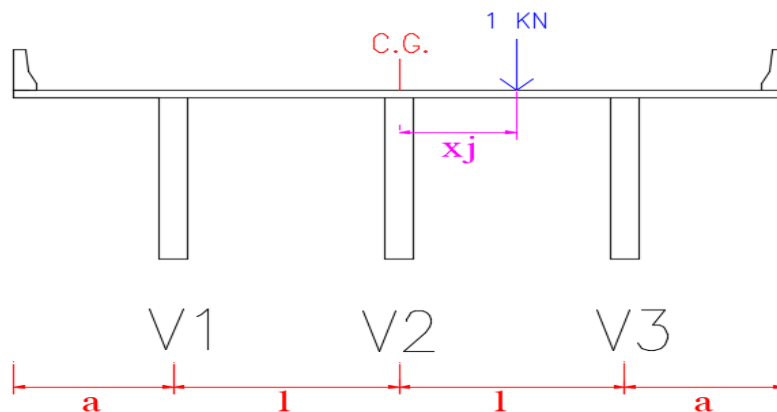
$$R_{i,j} = I_i \left(\frac{1}{\sum I_i} + \frac{x_j \cdot x_i}{\sum (I_i \cdot x_i^2)} \right) \quad (31)$$

E, para vigas de mesma inércia:

$$R_{i,j} = \frac{1}{n} + \frac{x_j \cdot x_i}{\sum (x_i^2)} \quad (32)$$

Ao variar a posição de aplicação da carga unitária têm-se os valores das reações para determinada viga e, assim, é obtida a linha de influência da mesma.

Figura 47 - Exemplo: Carga unitária aplicada para o caso de pontes de três vigas.



Fonte: Autoria própria

6.1.2.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes

Como já visto, a carga permanente é composta pelas cargas devido ao peso próprio, ao revestimento e ao guarda-rodas. Diferentemente do caso de pontes de duas vigas, nos casos de vigas múltiplas as cargas permanentes referentes ao guarda-rodas e ao revestimento não são distribuídas igualmente para as vigas.

Calcula-se a carga permanente devido ao guarda-rodas e devido ao revestimento através das equações (33) e (34), respectivamente, e posicionam-se as mesmas nas linhas de influência de reação de apoio das vigas a serem analisadas determinadas através do método de Courbon para saber a influência dessas cargas em cada um das vigas.

$$C_g = \text{Área}_{\text{guarda_rodas}} \cdot \gamma_{\text{concreto}} \quad (33)$$

Onde:

C_g = Carga permanente concentrada geral devido ao guarda-rodas;

$\text{Área}_{\text{guarda_rodas}}$ = Área do guarda-rodas obtida através das dimensões apresentadas na Figura 21;

γ_{concreto} = Peso específico do concreto.

$$C_r = (e_p \cdot \gamma_{\text{pav}} + \text{Recap}) \quad (34)$$

Onde:

C_r = Carga permanente uniformemente distribuída geral devido ao revestimento;

e_p = Espessura do pavimento;

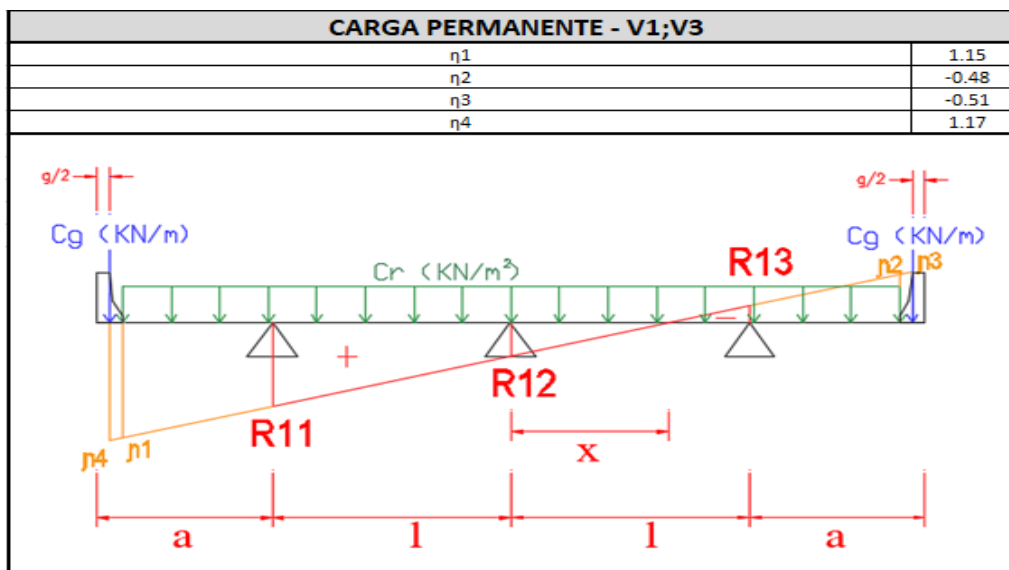
γ_{pav} = Peso específico do pavimento;

Recap = Recapeamento (A NBR 7187 (2003) recomenda uma carga de 2 KN/m² para o recapeamento).

As figuras a seguir exemplificam o que foi explicado anteriormente para cada tipo de ponte com as diferentes seções transversais analisadas neste trabalho.

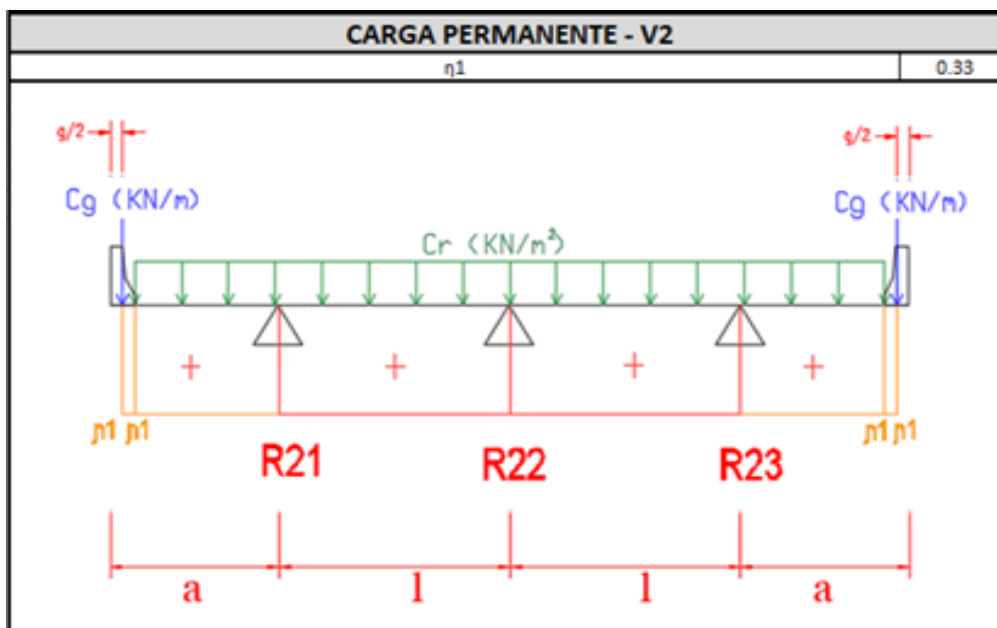
- **Pontes com seção transversal de três vigas**

Figura 48 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3.



Fonte: Autoria própria

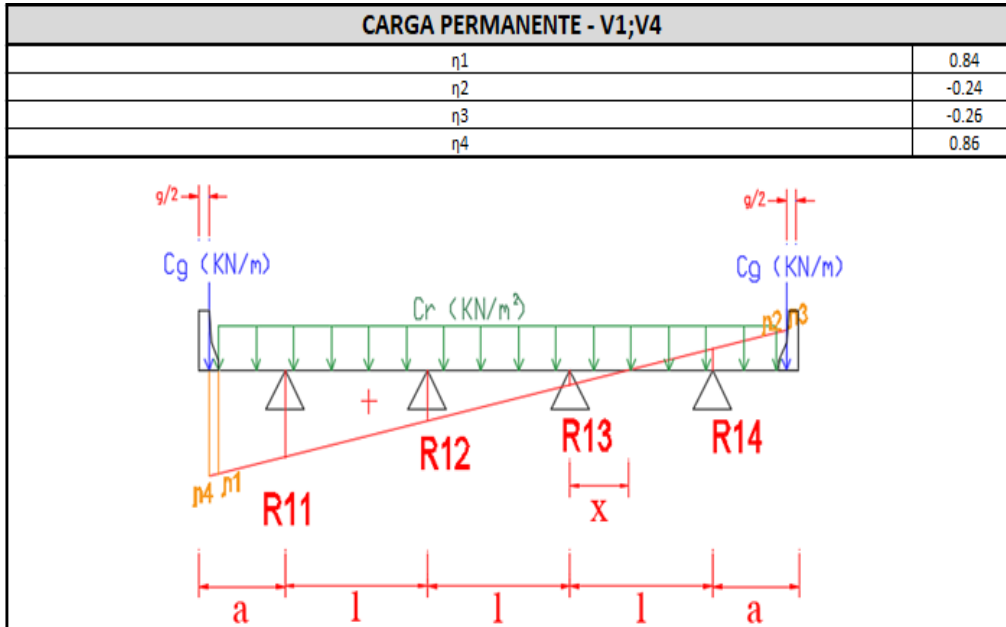
Figura 49 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V2.



Fonte: Autoria própria

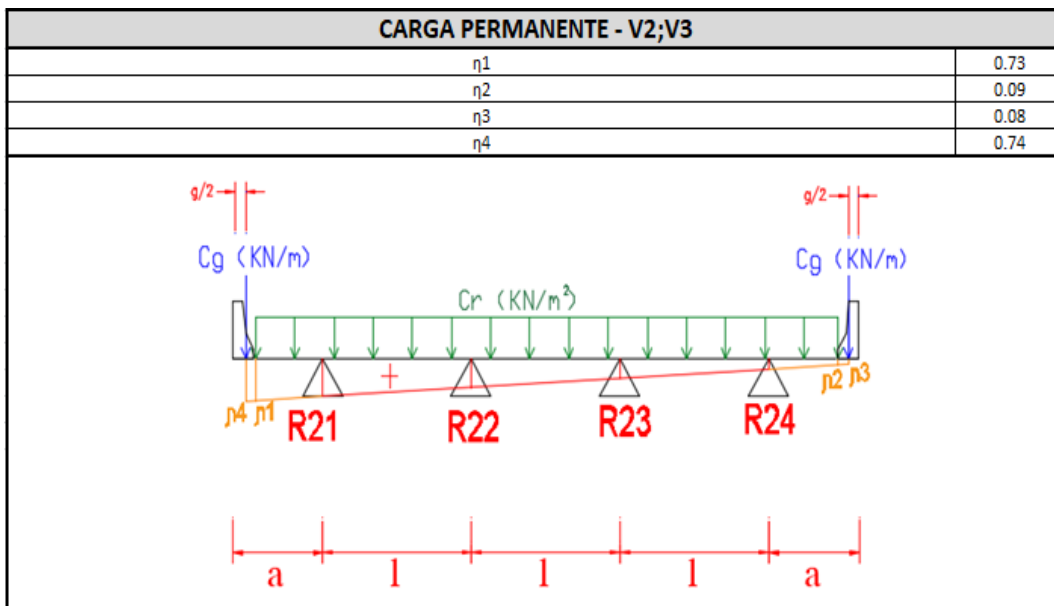
- **Pontes com seção transversal de quatro vigas**

Figura 50 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4.



Fonte: Autoria própria

Figura 51 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V3.



Fonte: Autoria própria

- **Pontes com seção transversal de cinco vigas**

Figura 52 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5.

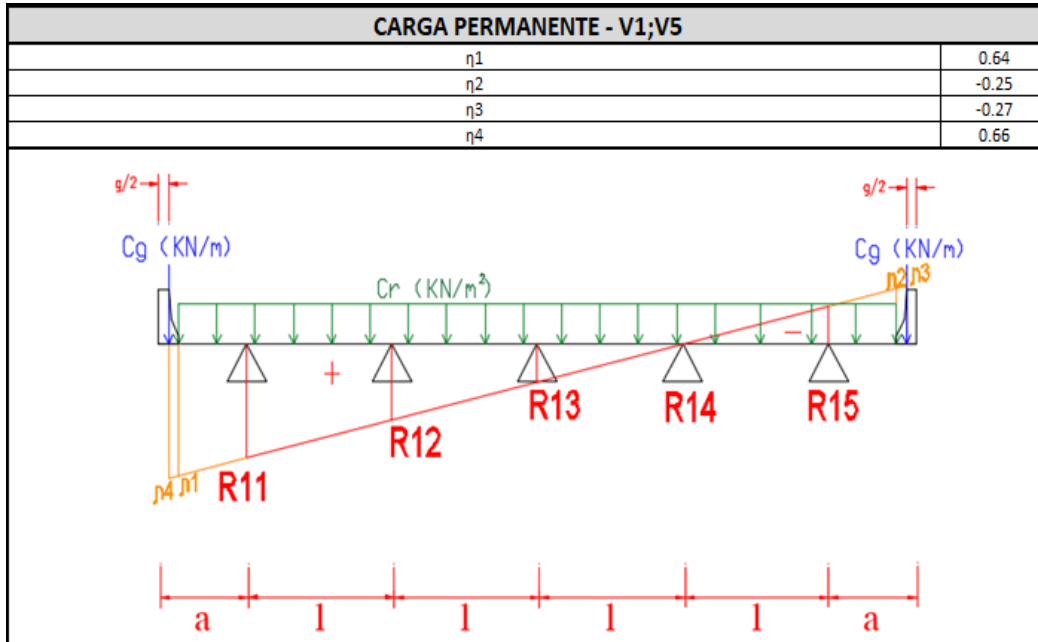


Figura 53 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4.

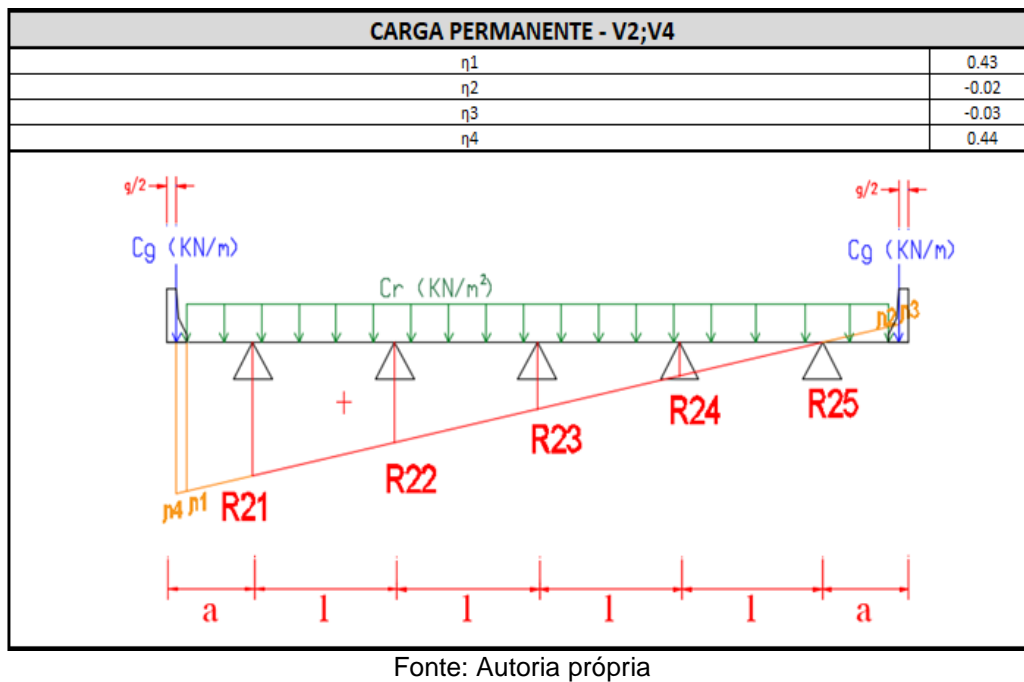
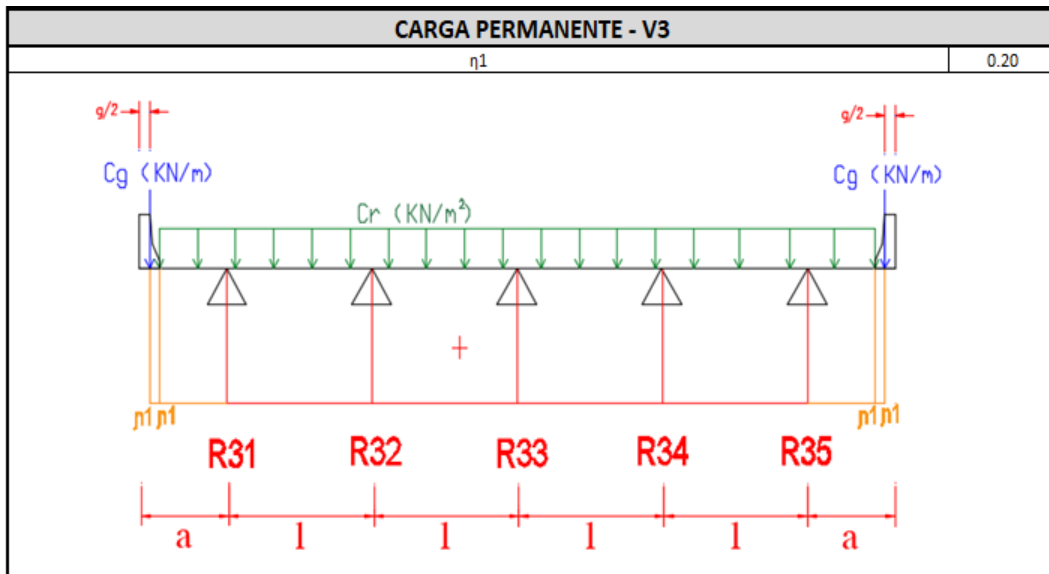


Figura 54 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V3.



- **Pontes com seção transversal de seis vigas**

Figura 55 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6.

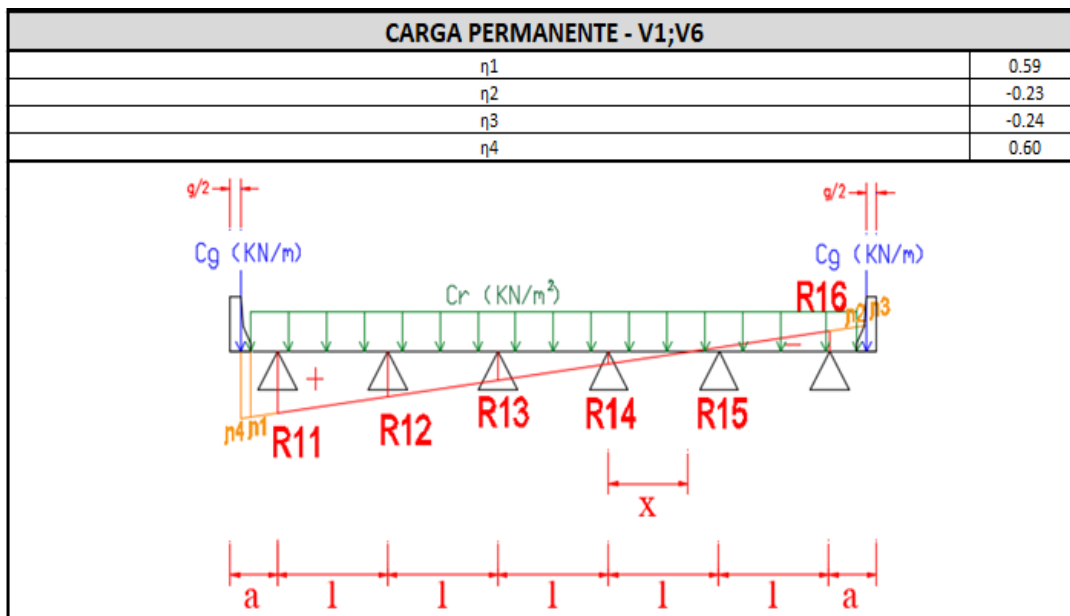


Figura 56 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5.

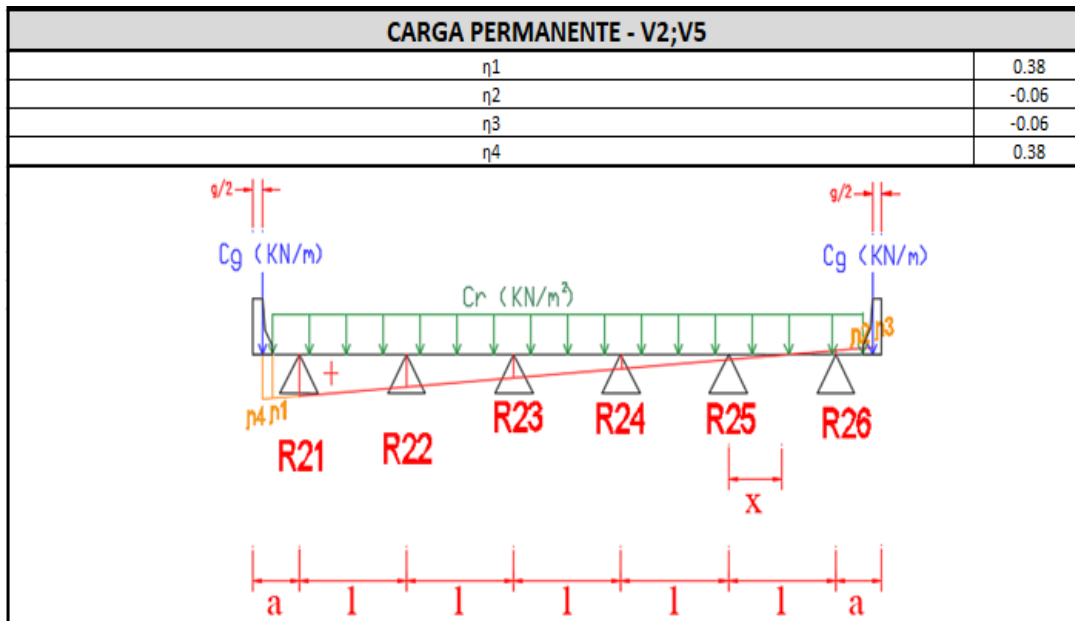
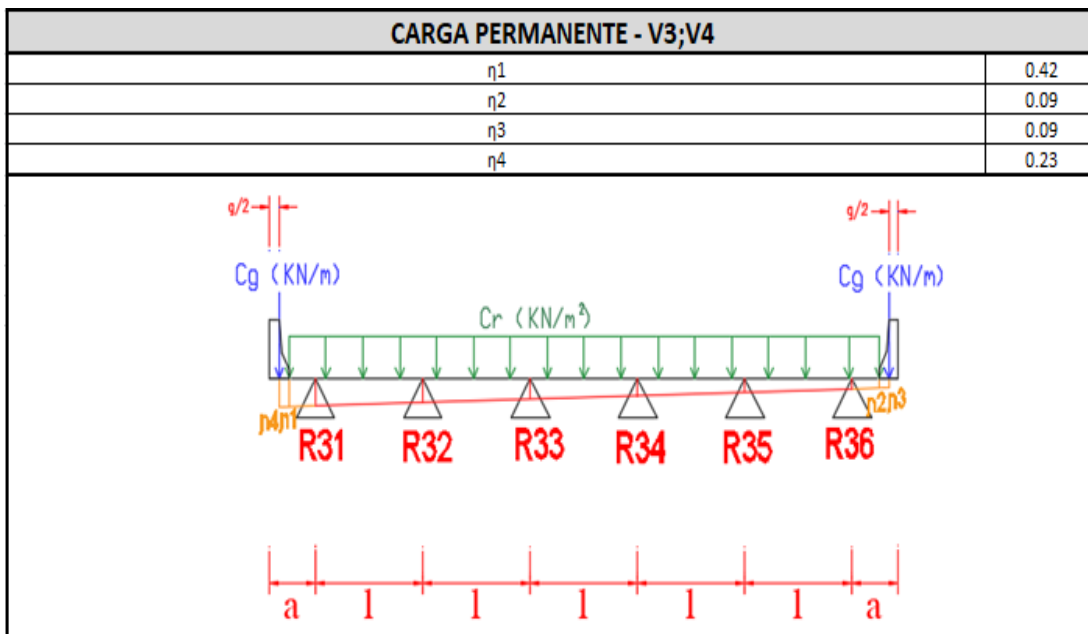
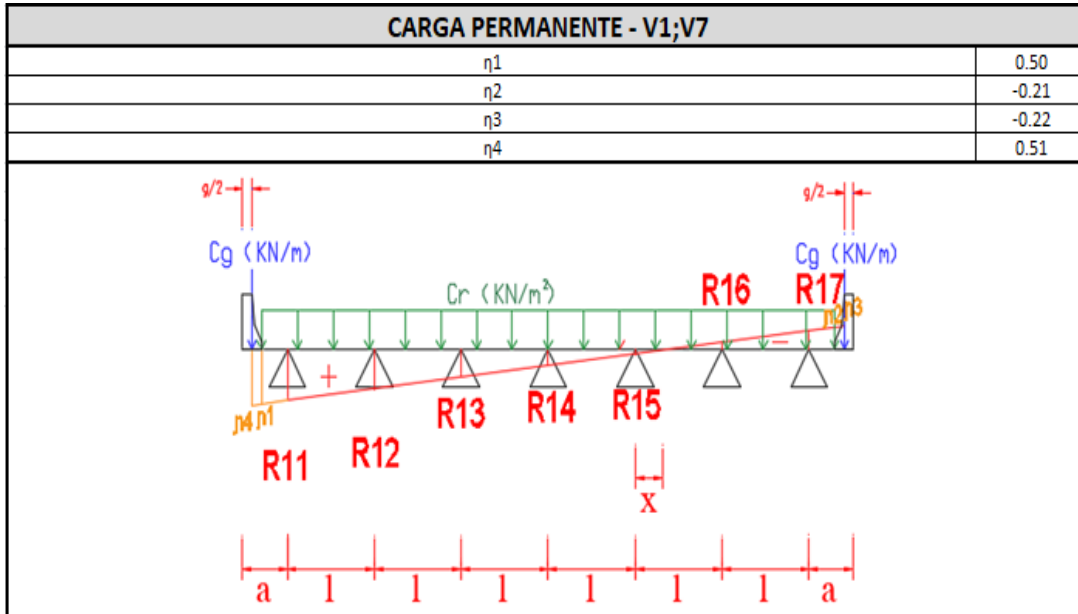


Figura 57 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V4.



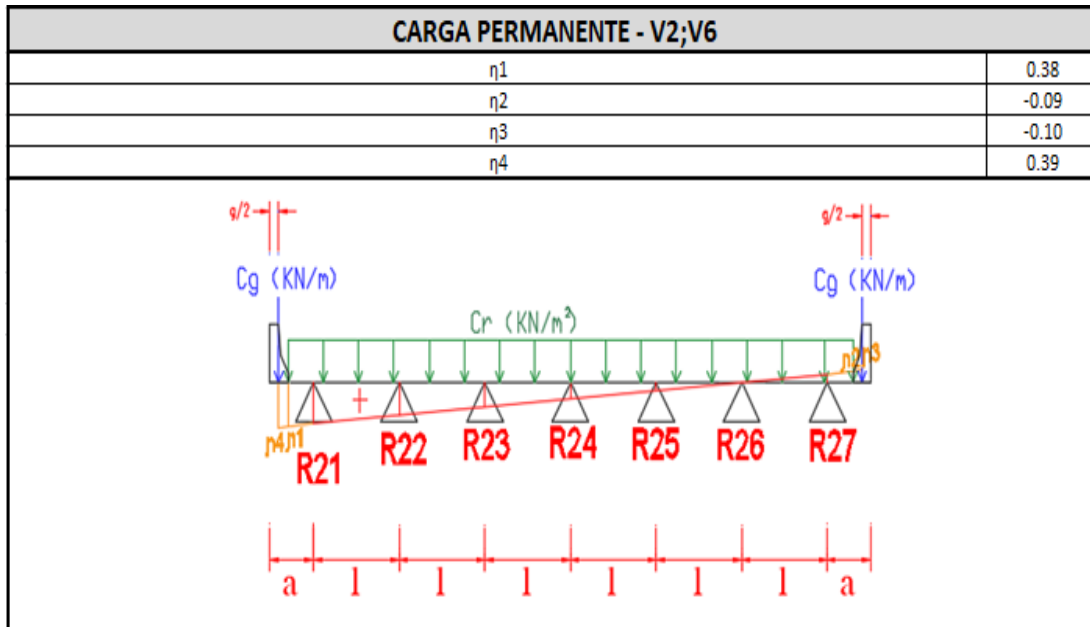
- **Pontes com seção transversal de sete vigas**

Figura 58 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7.



Fonte: Autoria própria

Figura 59 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6.



Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência das vigas de reação de apoio das vigas V3 e V5.

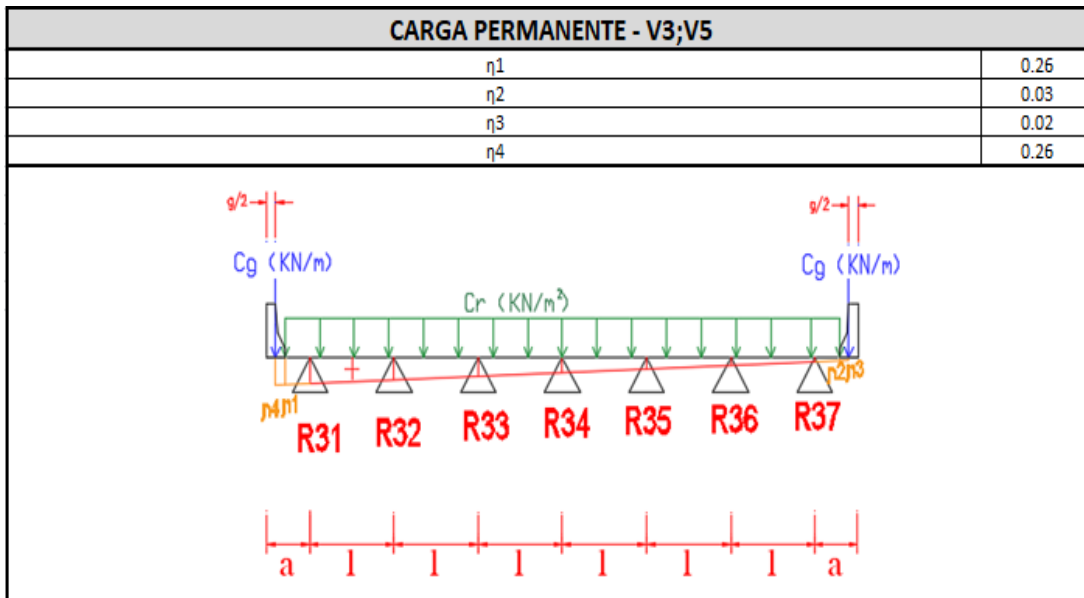
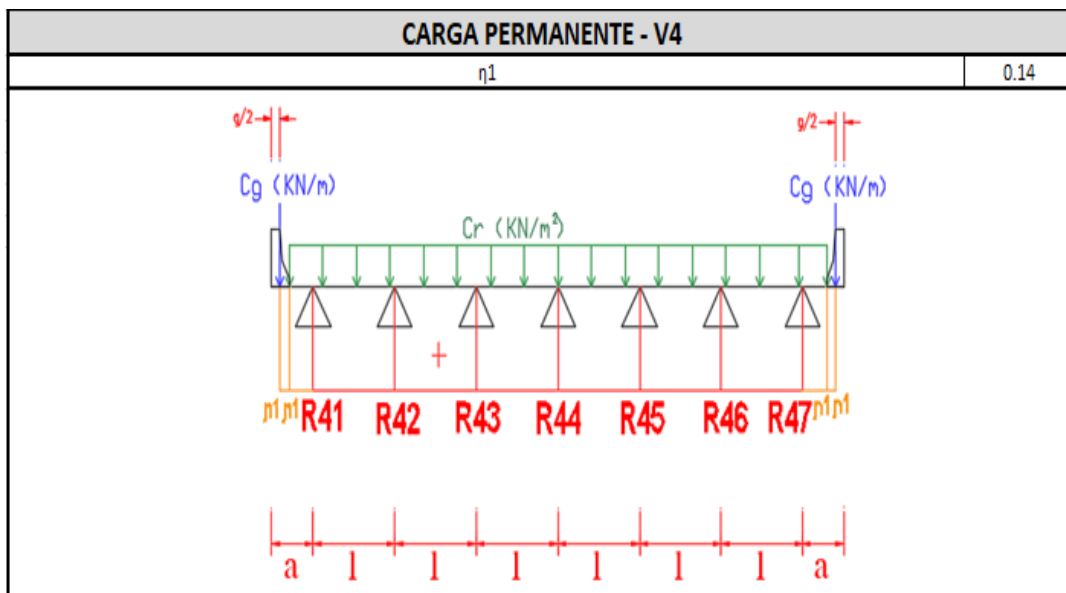


Figura 61 - Cargas devido ao revestimento e ao guarda-rodas posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V4.



Determinam-se então a influência das cargas permanentes concentradas devido ao guarda-rodas e as cargas permanentes uniformemente distribuídas devido ao revestimento em cada uma das vigas através das equações (35) e (36), explicitadas a seguir.

$$g_g = C_g \cdot (\eta_3 + \eta_4) \quad (35)$$

Onde:

g_g = Carga permanente devido ao guarda-rodas atuante sobre a viga analisada;

C_g = Carga permanente concentrada geral devido ao guarda-rodas;

η_3 e η_4 = Coordenadas da linha de influência de reação de apoio de cada viga analisada.

$$g_r = C_r \cdot (\text{Área}_{\Delta\eta_1} + \text{Área}_{\Delta\eta_2}) \quad (36)$$

Onde:

g_r = Carga permanente devido ao revestimento atuante sobre a viga analisada;

C_r = Carga permanente uniformemente distribuída geral devido ao revestimento;

$\text{Área}_{\Delta\eta_1}$ = Área do triângulo da parte positiva da linha de influência definido através da coordenada η_1 ;

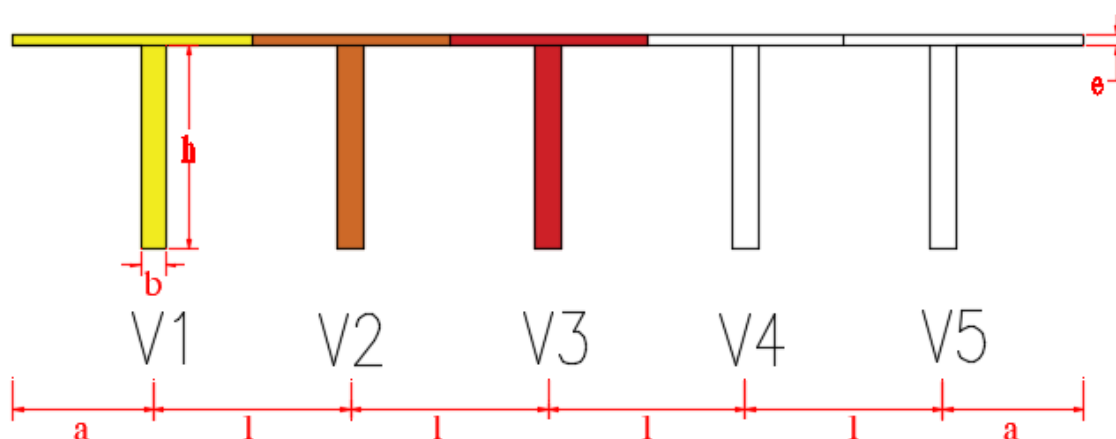
$\text{Área}_{\Delta\eta_2}$ = Área do triângulo da parte negativa da linha de influência definido através da coordenada η_2 ;

A parcela da carga permanente devido ao peso próprio de cada viga é obtida também através da equação (6) já apresentada, onde a área de influência é a parcela da seção transversal referente à viga analisada.

A figura 62 a seguir mostra, como exemplo, a ponte com seção transversal de cinco vigas, em que as áreas de influência das vigas V1, V2 e V3 são representadas em amarelo, laranja e vermelho, respectivamente. Tem-se que, para

este caso, as áreas de influência das vigas V4 e V5 são análogas às áreas das vigas V2 e V1, respectivamente, devido ao fato de tratar-se de uma ponte simétrica.

Figura 62 - Representação das áreas de influência das vigas V1, V2 e V3 para o caso de pontes simétricas com seção transversal de cinco vigas.



Fonte: Autoria própria

Por fim, somam-se as parcelas da carga devido ao peso próprio, ao guarda-rodas e ao revestimento, de acordo com a equação (5), e obtém-se a carga permanente total de cada viga analisada.

Os resultados estão apresentados no item 6.1.2.5.

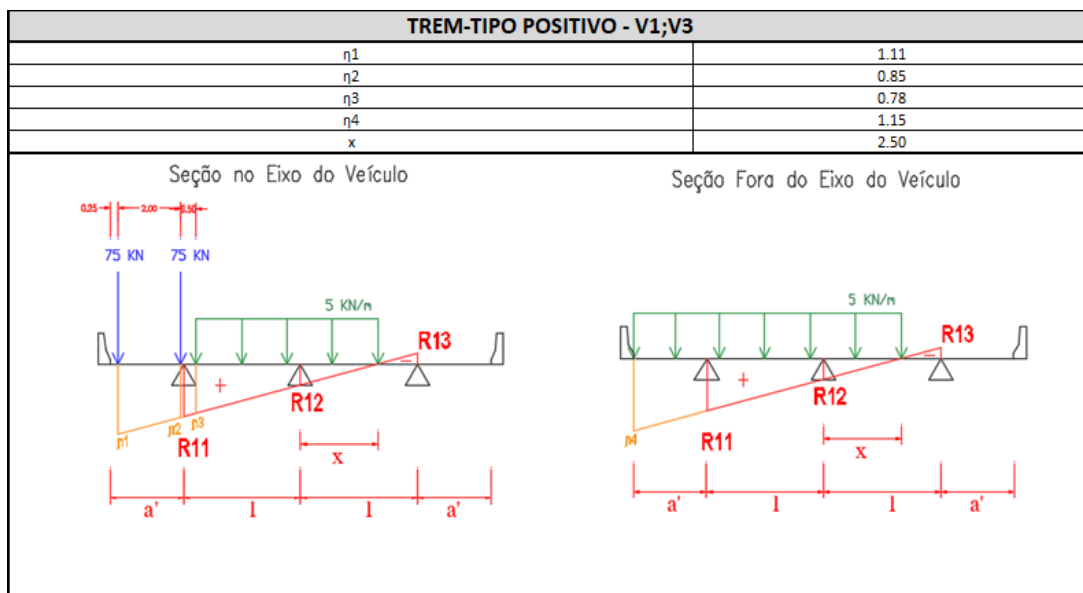
6.1.2.4 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis

Com as cargas do trem-tipo TB-450 e com a linha de influência de reação de apoio de cada uma das vigas traçadas através do método de Courbon, repete-se o procedimento que foi realizado para o caso de duas vigas, ou seja, posicionam-se as cargas do trem-tipo proposto pela NBR 7188 (2013) nas posições da linha de influência as quais representam as situações de máximo e mínimo para que possam ser determinados os trens-tipos positivo e negativo, respectivamente.

A seguir estão indicados o posicionamento das cargas do TB-450 para os cinco tipos de pontes de vigas múltiplas analisados neste trabalho de modo a determinar os trens-tipos positivo e negativo para cada uma delas.

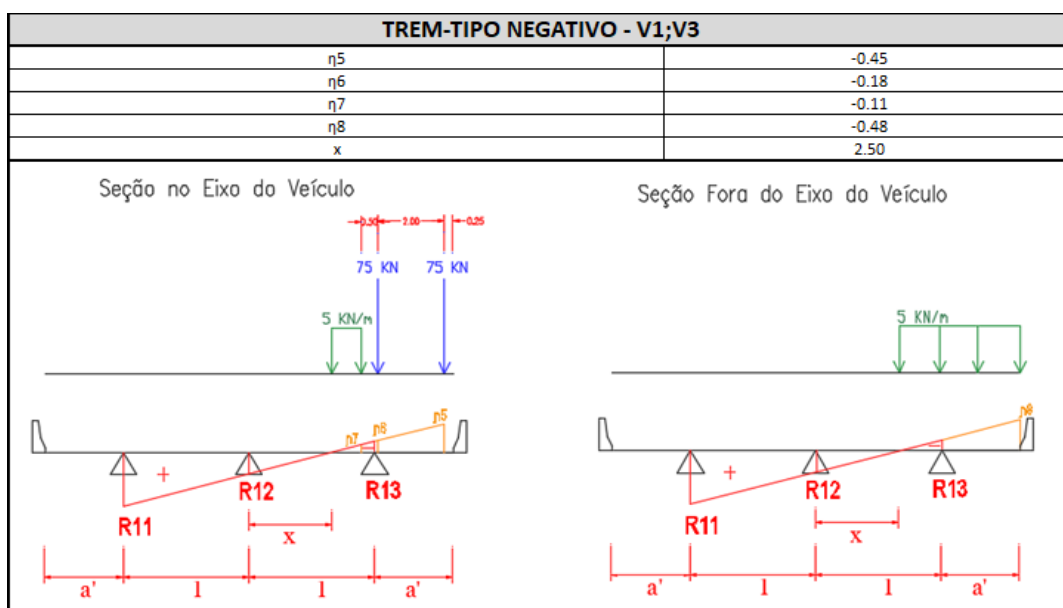
- **Pontes com seção transversal de três vigas**

Figura 63 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3 para determinação do trem-tipo positivo.



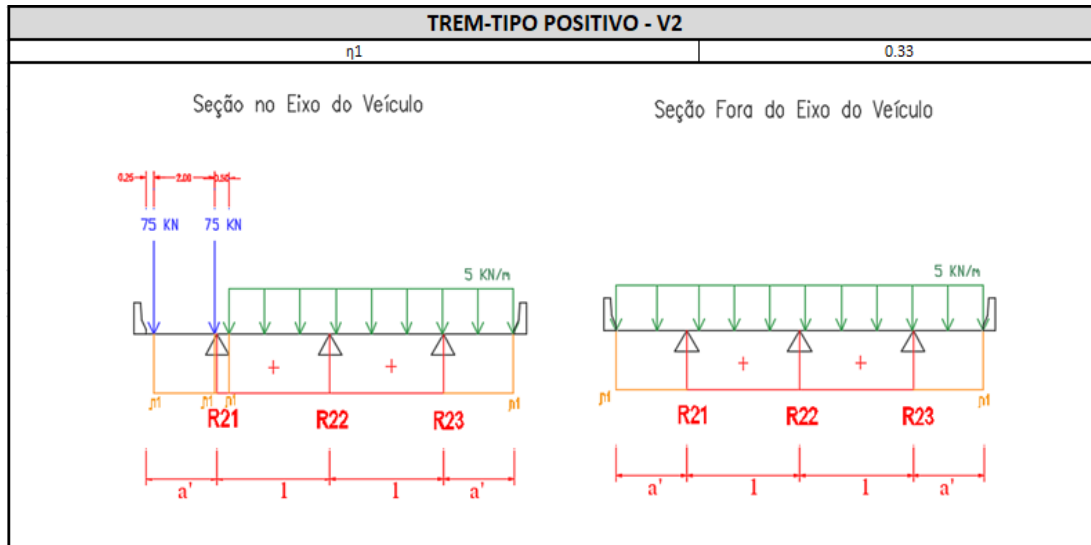
Fonte: Autoria própria

Figura 64 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V3 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

Figura 65 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V2 para determinação do trem-tipo positivo.

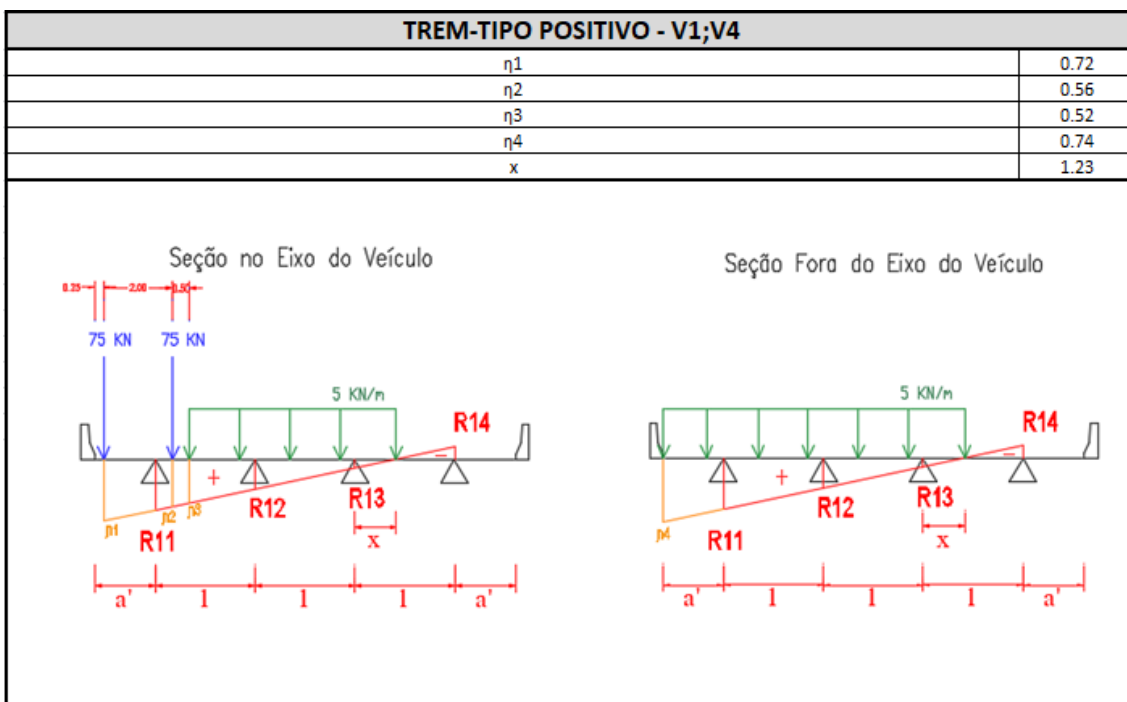


Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio da viga V2 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para a mesma.

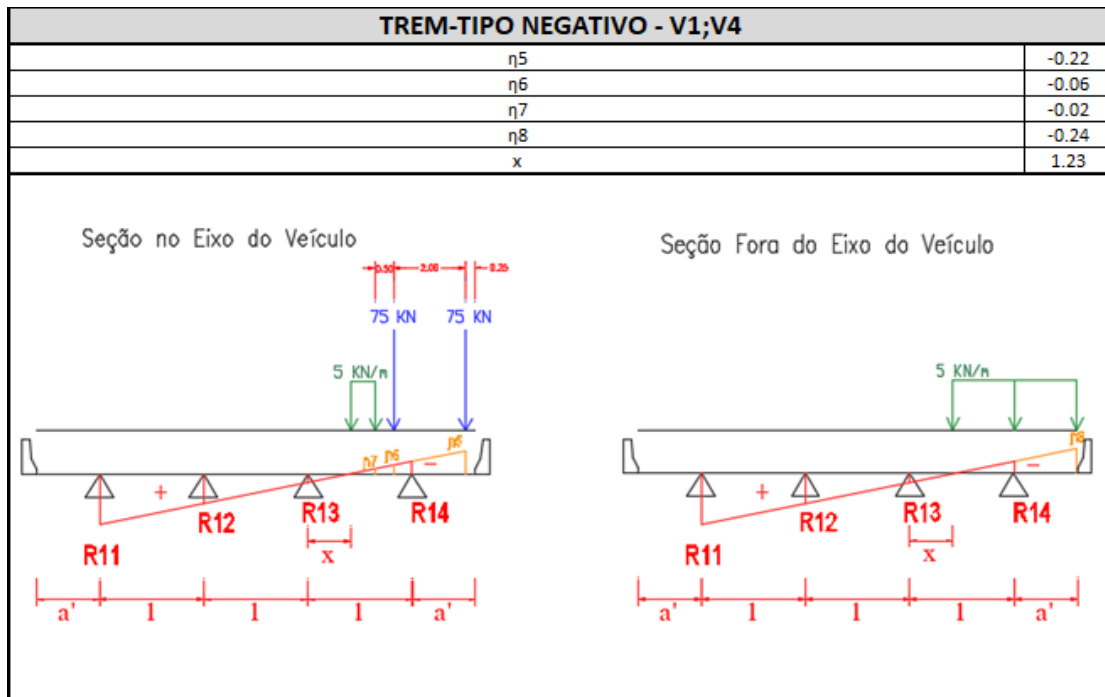
- **Pontes com seção transversal de quatro vigas**

Figura 66 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.



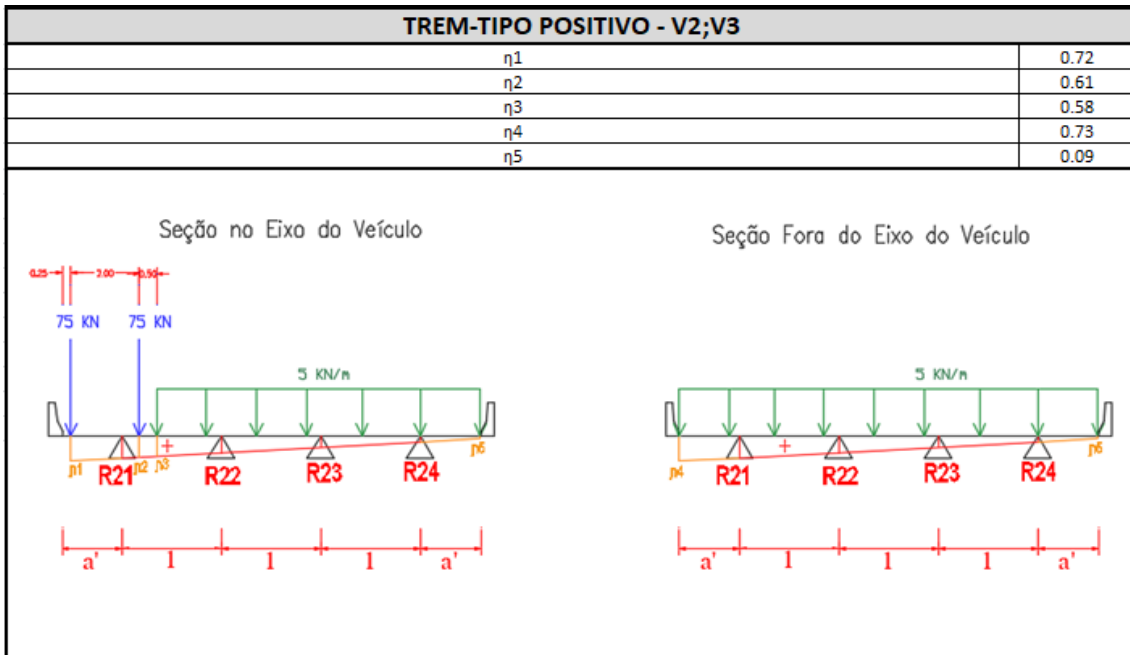
Fonte: Autoria própria

Figura 67 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V4 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

Figura 68 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V3 para determinação do trem-tipo positivo.

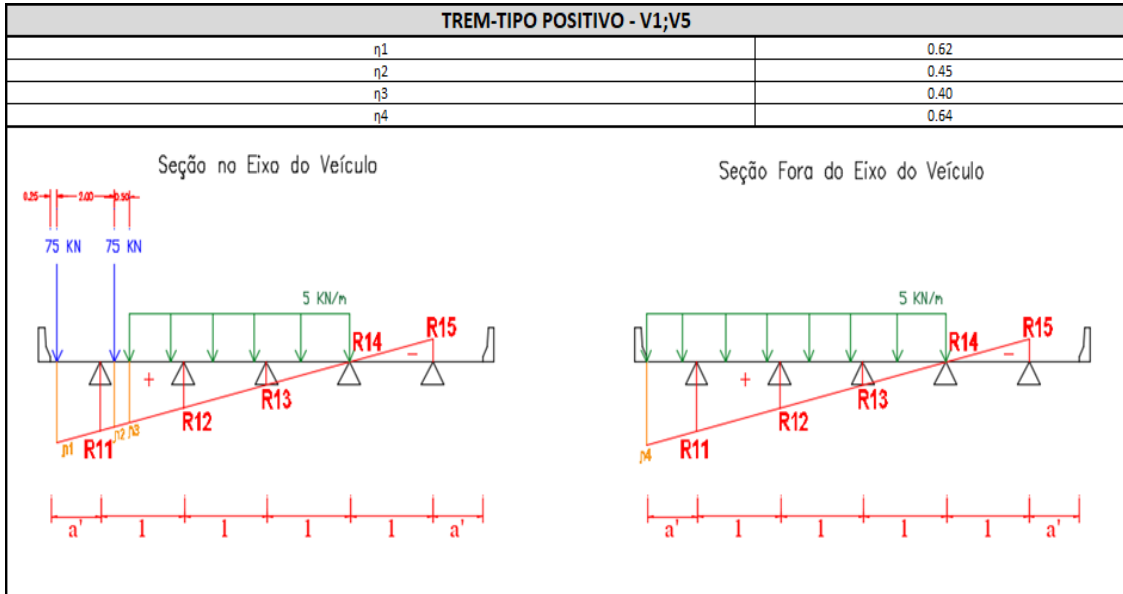


Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V3 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para as mesmas.

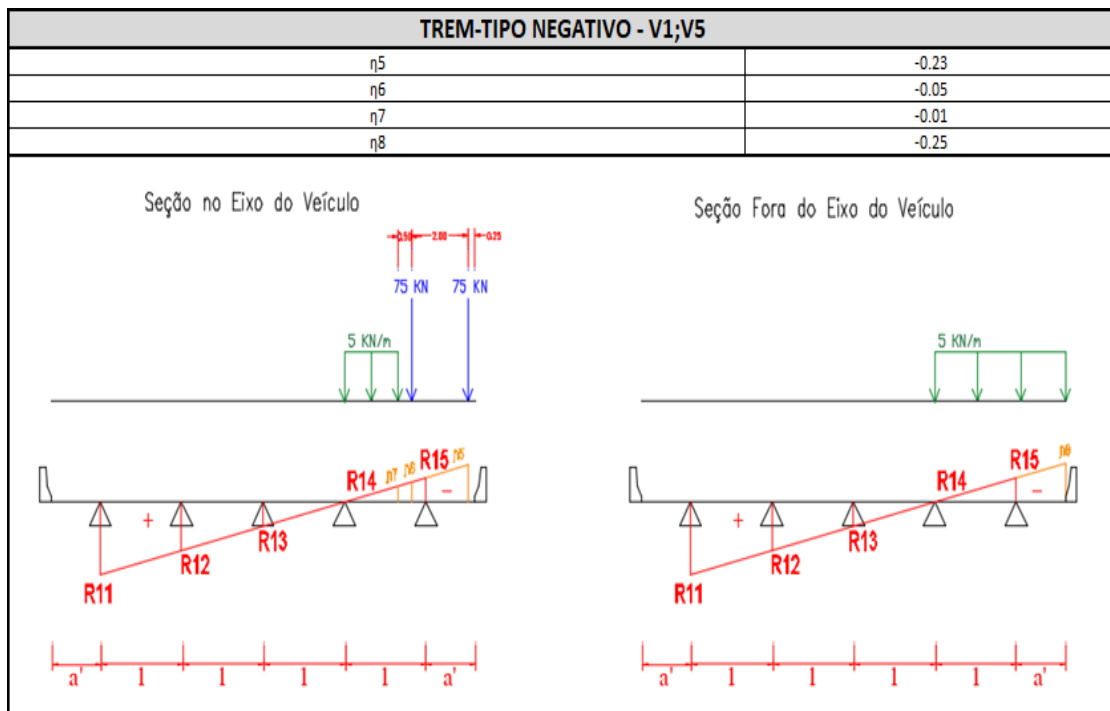
- **Pontes com seção transversal em cinco vigas**

Figura 69 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.



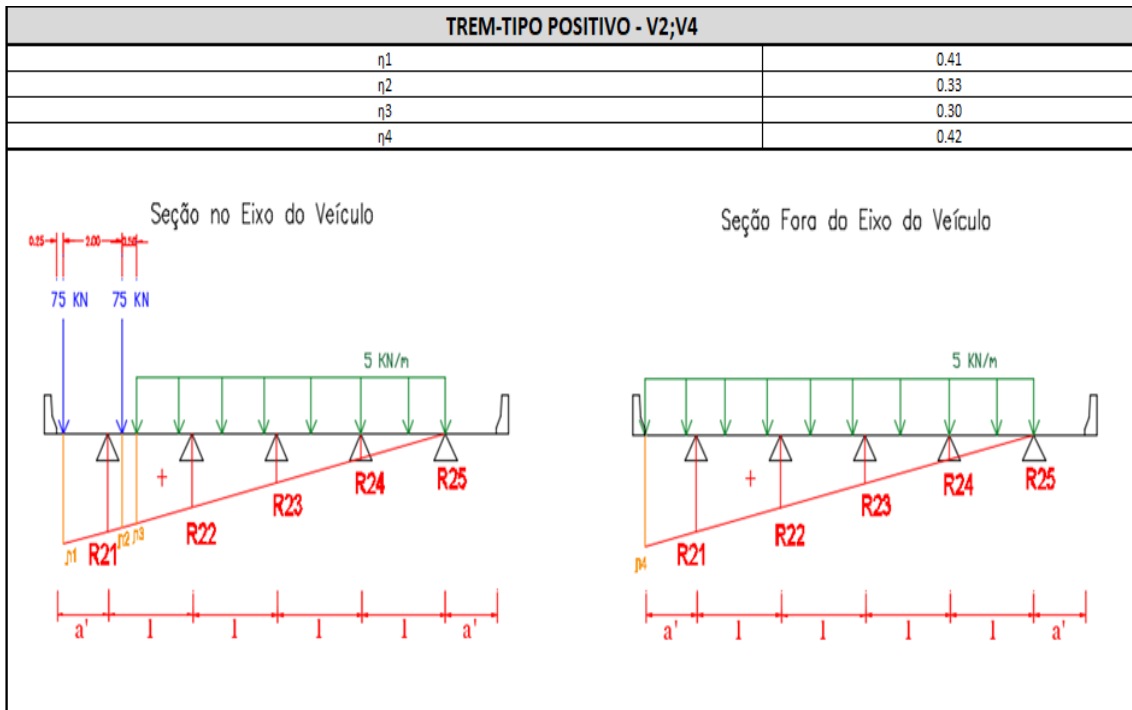
Fonte: Autoria própria

Figura 70 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V5 para determinação do trem-tipo negativo.



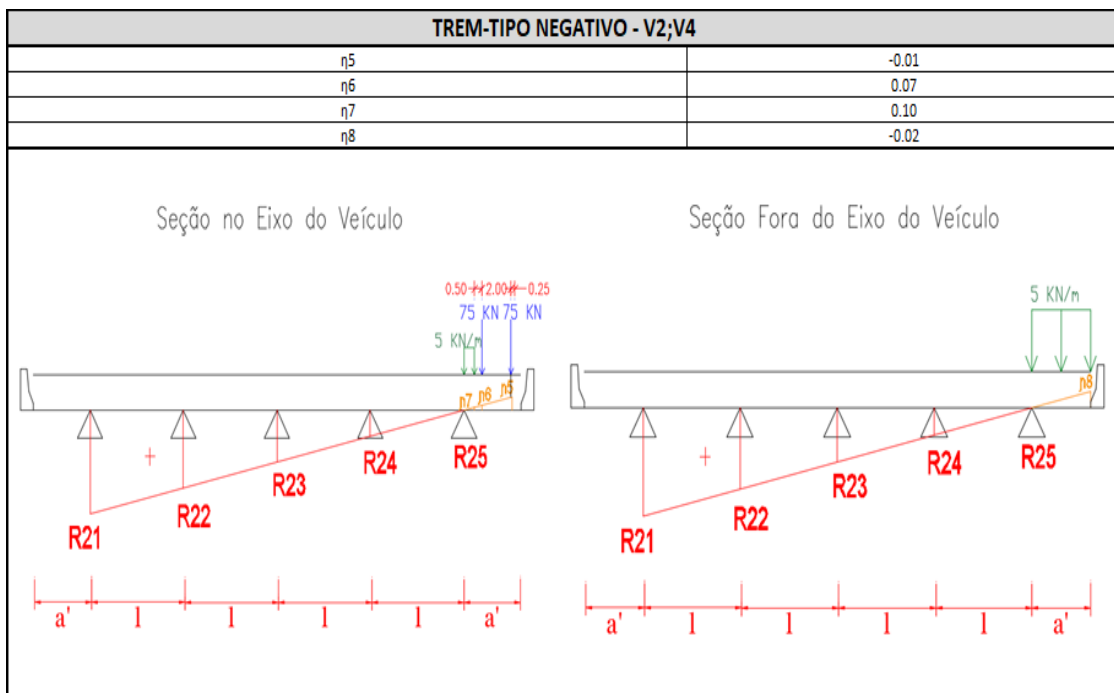
Fonte: Autoria própria

Figura 71 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.



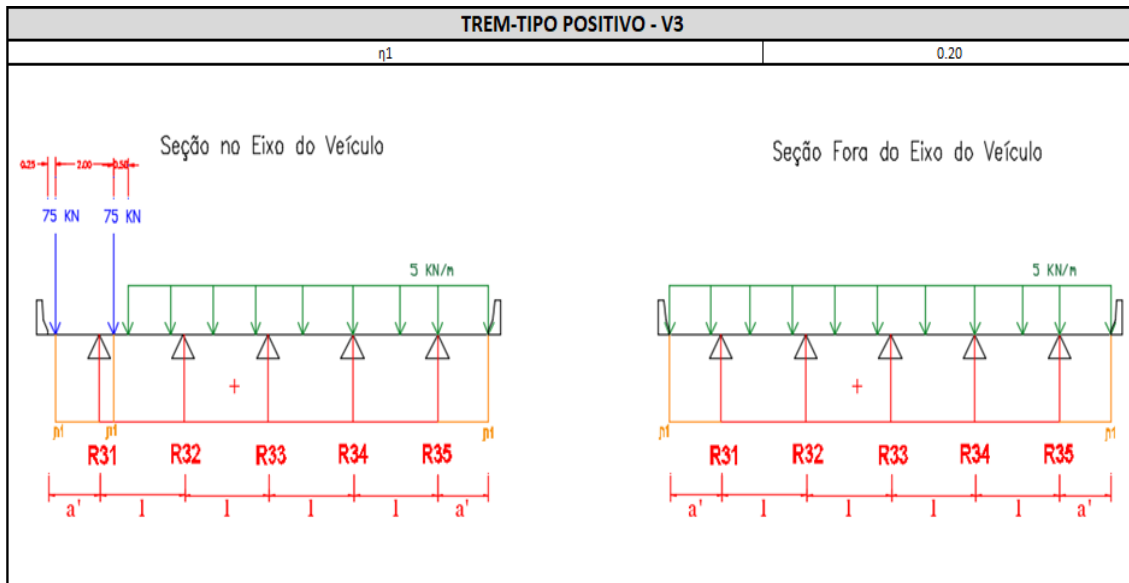
Fonte: Autoria própria

Figura 72 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V4 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

Figura 73 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V3 para determinação do trem-tipo positivo.

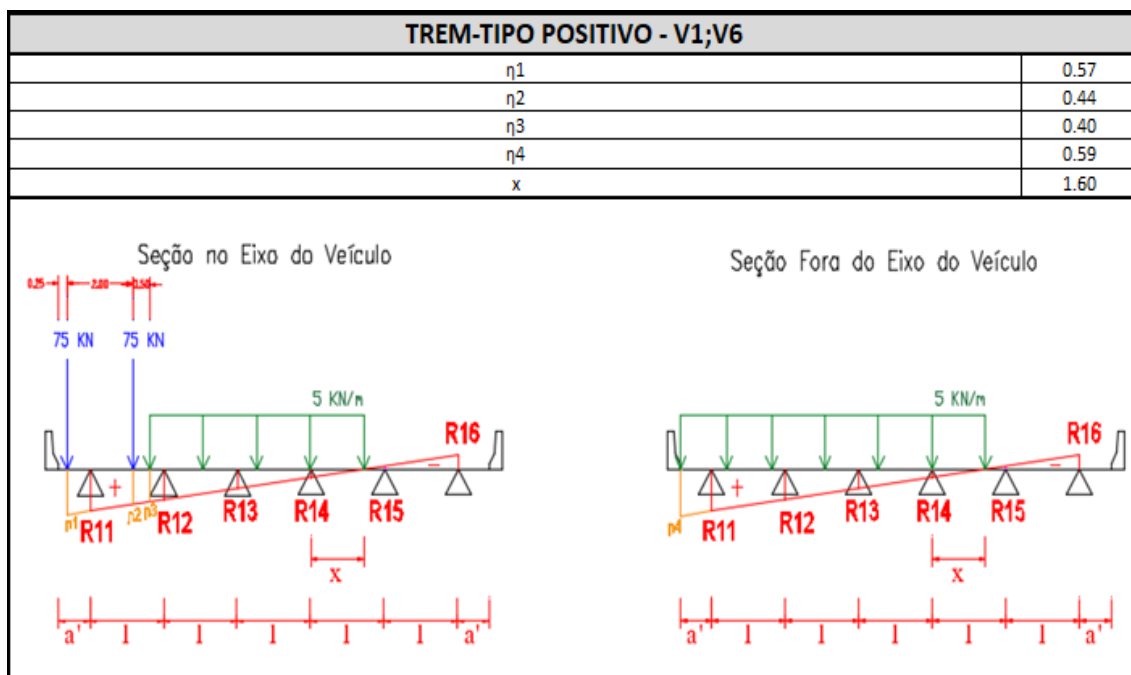


Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio da viga V3 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para a mesma.

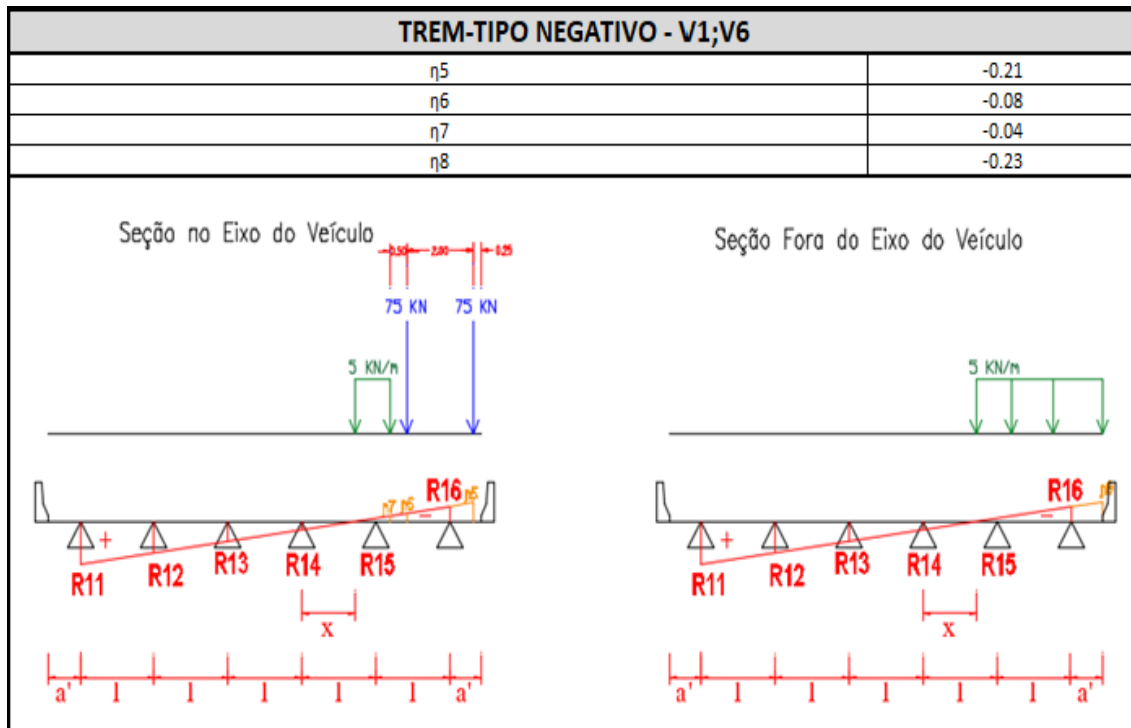
- **Pontes com seção transversal de seis vigas**

Figura 74 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6 para determinação do trem-tipo positivo.



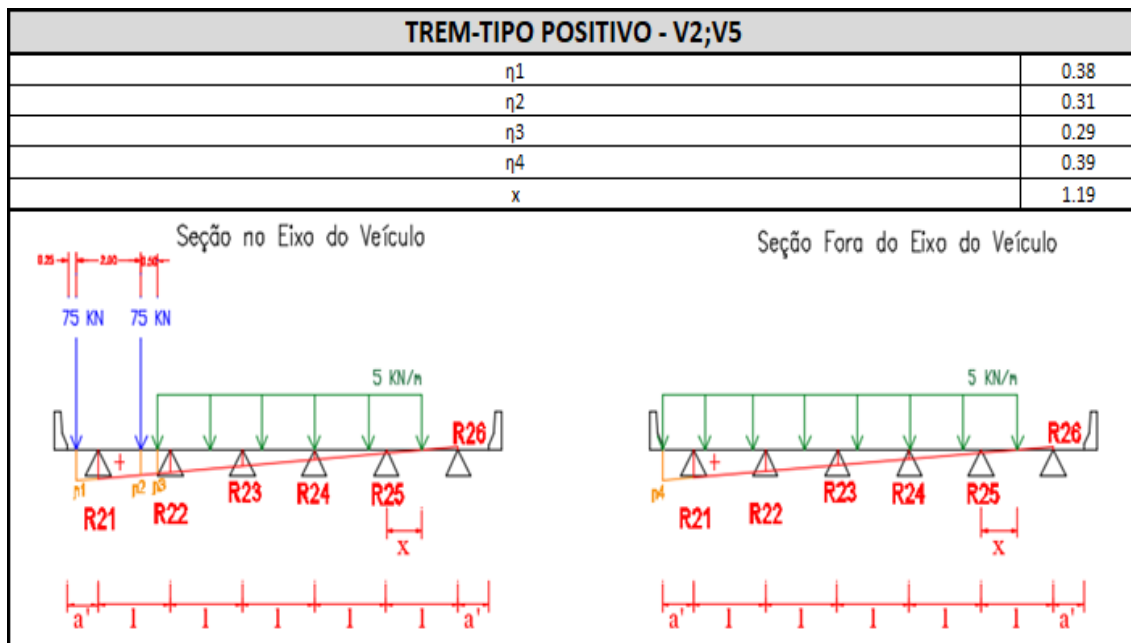
Fonte: Autoria própria

Figura 75 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V6 para determinação do trem-tipo negativo.



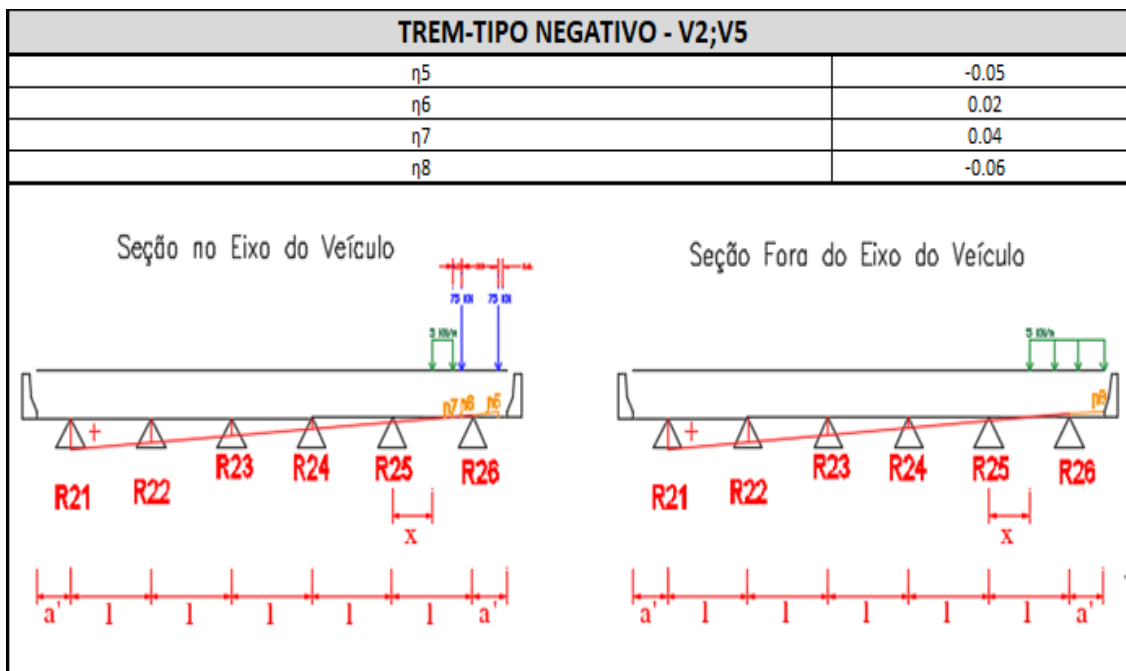
Fonte: Autoria própria

Figura 76 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.



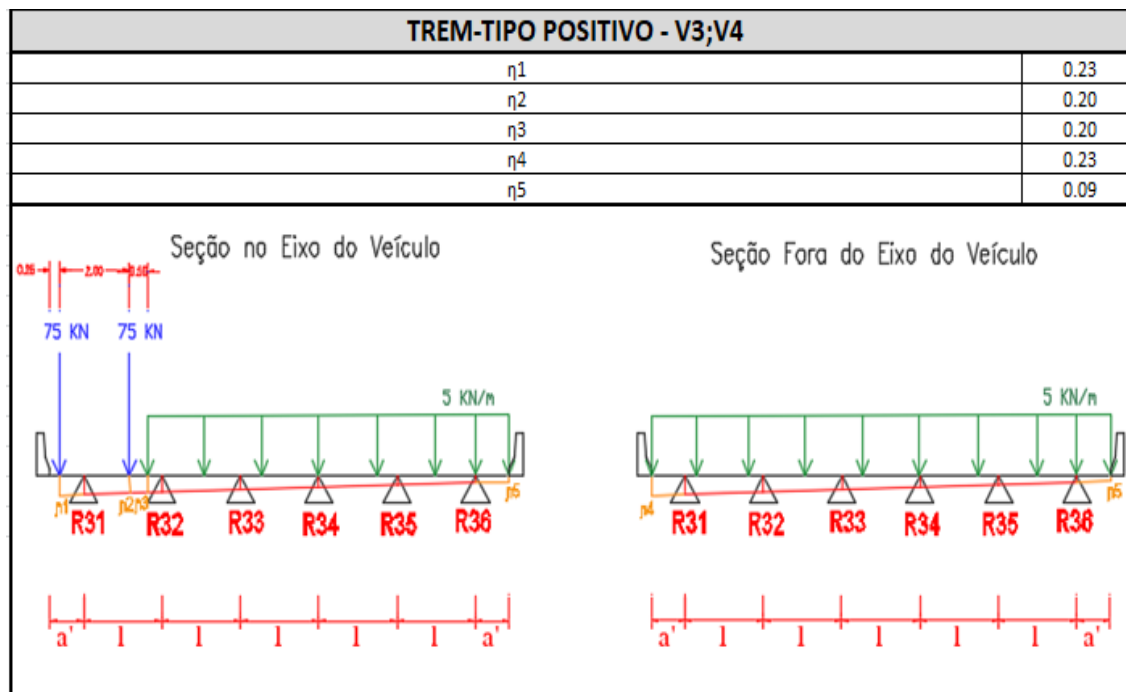
Fonte: Autoria própria

Figura 77 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V5 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

Figura 78 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V4 para determinação do trem-tipo positivo.

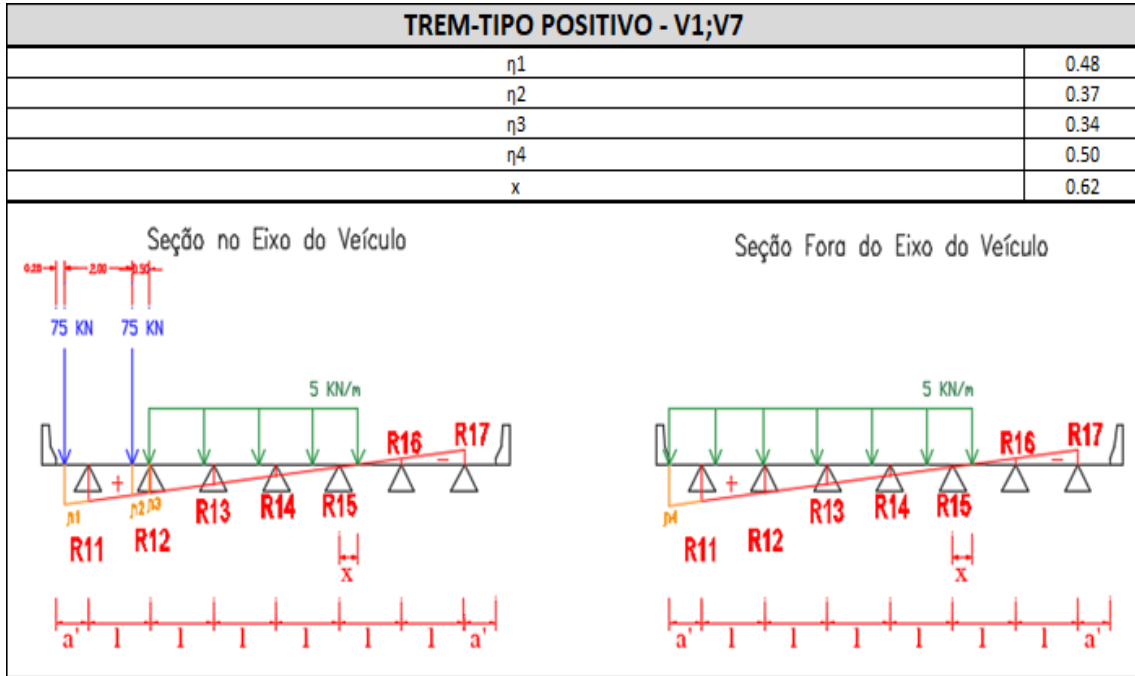


Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V4 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para as mesmas.

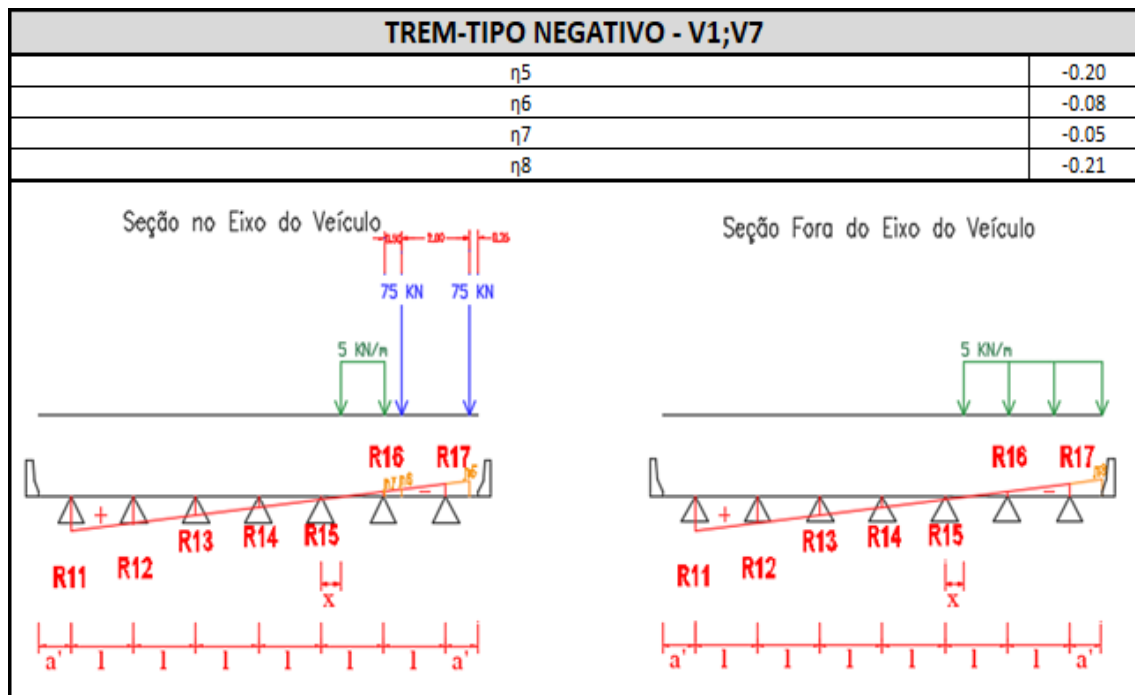
- **Pontes com seção transversal de sete vigas**

Figura 79 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7 para determinação do trem-tipo positivo.



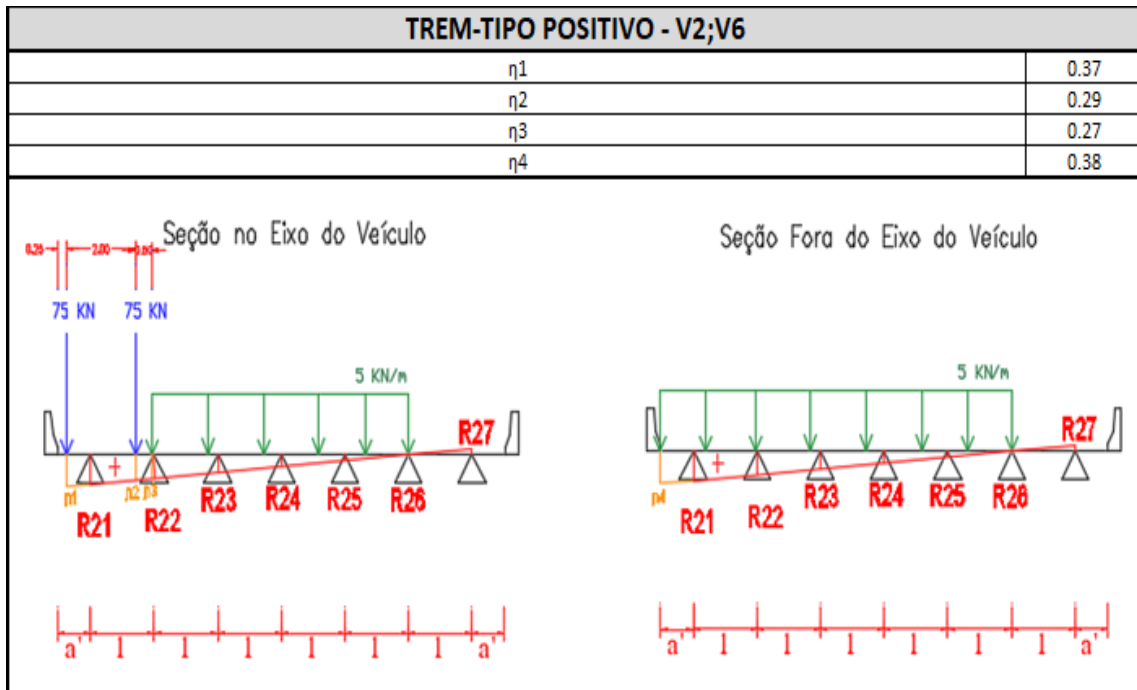
Fonte: Autoria própria

Figura 80 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V1 e V7 para determinação do trem-tipo negativo.



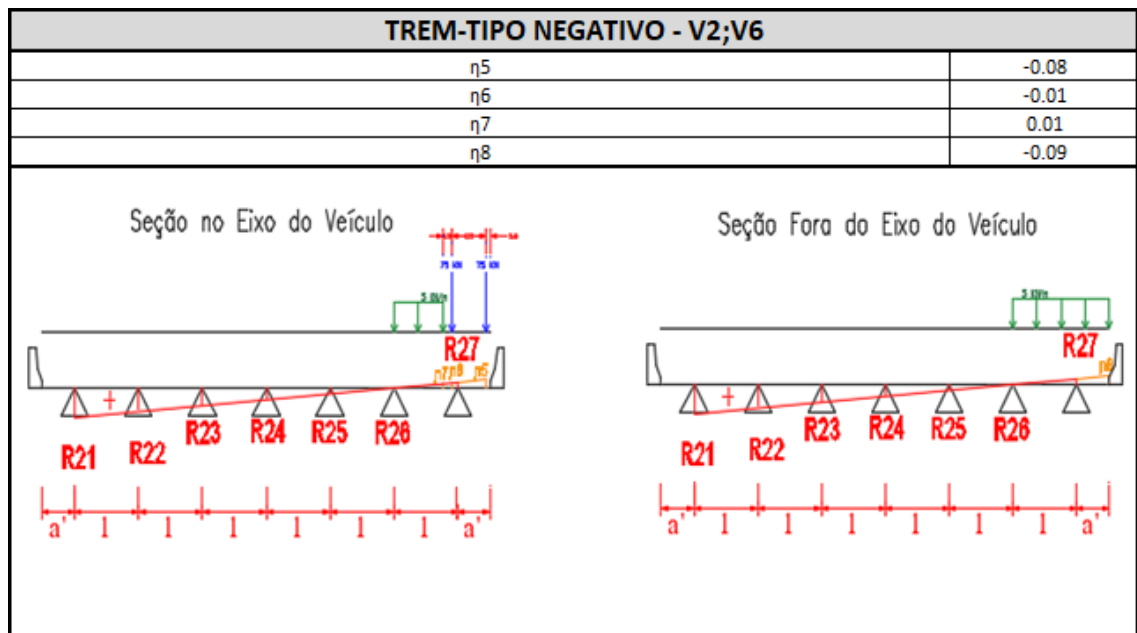
Fonte: Autoria própria

Figura 81 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6 para determinação do trem-tipo positivo.



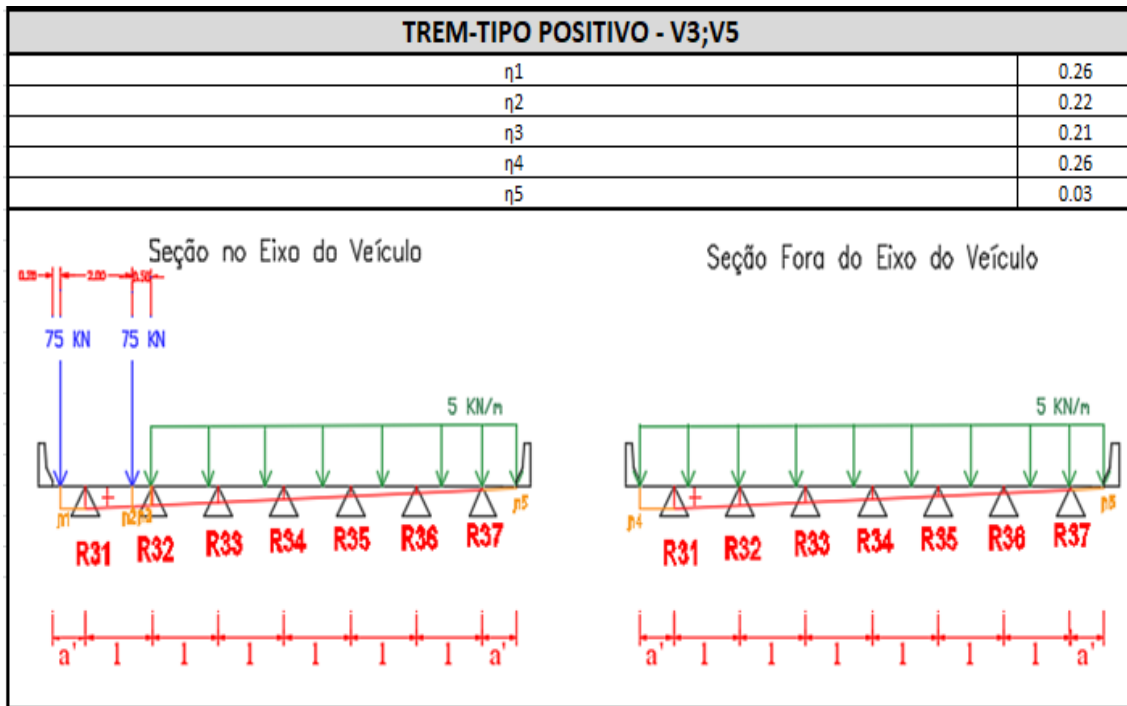
Fonte: Autoria própria

Figura 82 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V2 e V6 para determinação do trem-tipo negativo.



Fonte: Autoria própria

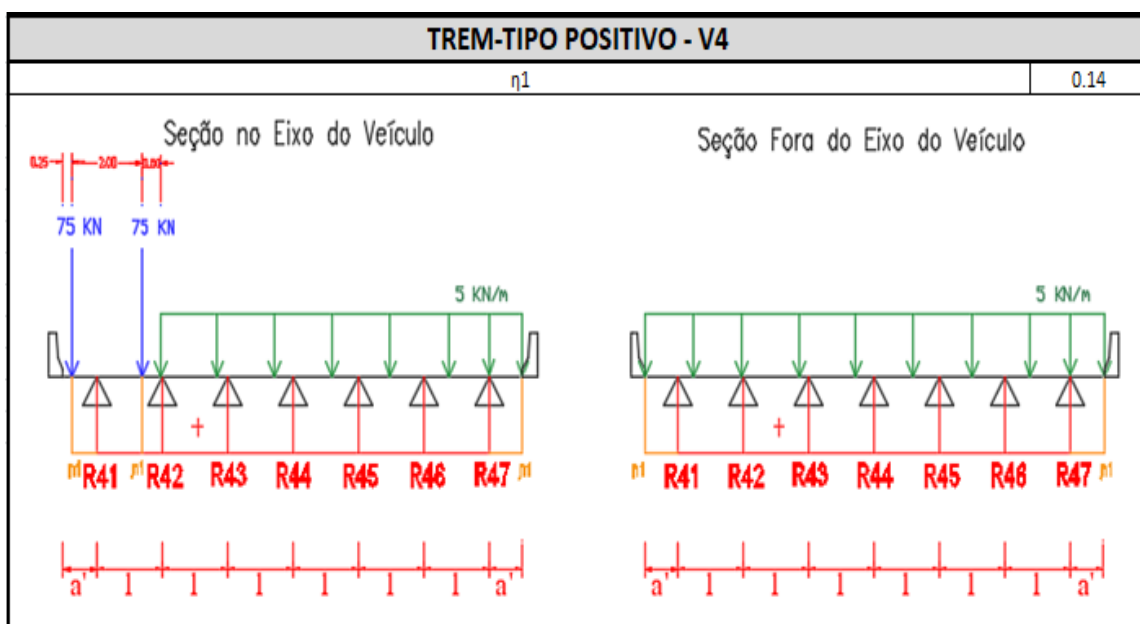
Figura 83 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V5 para determinação do trem-tipo positivo.



Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio das vigas V3 e V5 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para as mesmas.

Figura 84 - Cargas do TB-450 posicionadas na linha de influência de reação de apoio da viga V4 para determinação do trem-tipo positivo.



Fonte: Autoria própria

Como a linha de influência de reação de apoio da viga V4 não possui parte negativa, conclui-se que não há trem-tipo negativo para a mesma.

Determinam-se então as coordenadas (etas) para cada linha de influência de reação de apoio de cada viga analisada através de proporção. As cargas concentradas de cada eixo e as cargas uniformemente distribuídas dentro e fora do eixo do veículo dos trens-tipos positivo e negativo são determinadas da mesma maneira em relação ao caso da ponte de duas vigas (item 6.1.1.3), através das equações (09) a (14).

6.1.2.5 Resultados

As planilhas para pontes com seção transversal de vigas múltiplas resultam nos trens-tipo positivo e negativo para cada viga, ou seja, resultam nas cargas concentradas de cada eixo, nas cargas distribuídas fora e dentro do eixo do veículo. As mesmas resultam também na carga permanente total para cada viga de cada seção transversal. As figuras a seguir mostram os resultados de cada planilha de cada seção transversal analisada.

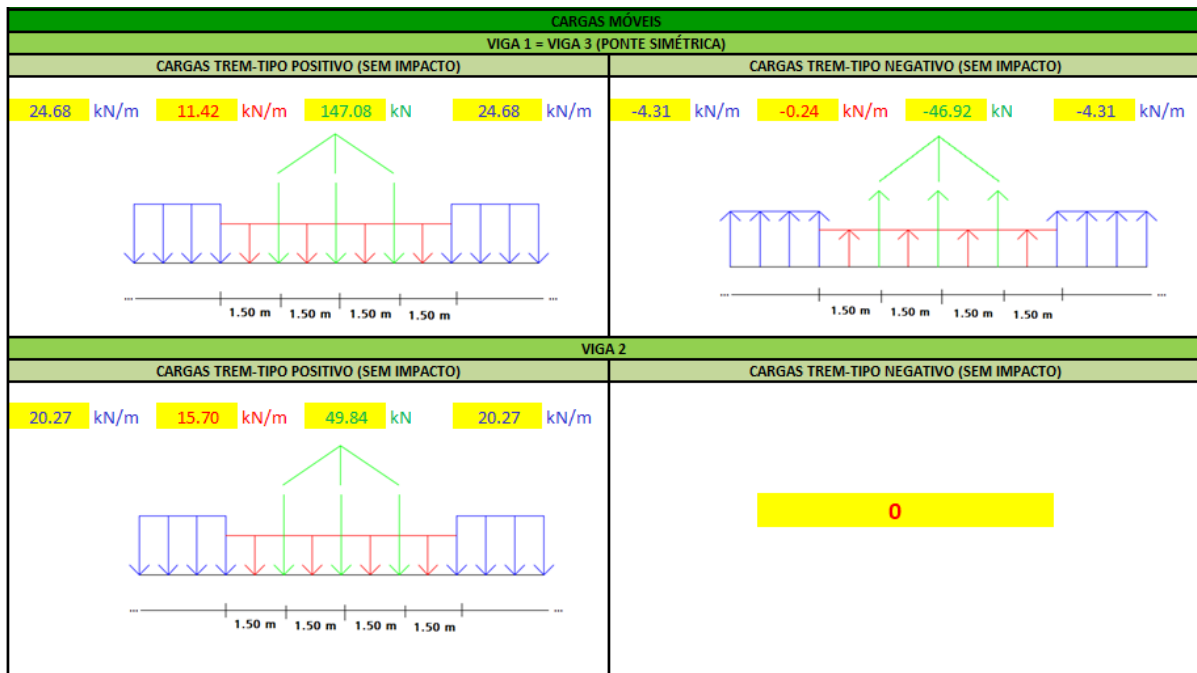
- **Pontes com seção transversal de três vigas**

Figura 85 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de três vigas.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA 1 - VIGA 3 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	17.92
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	3.84
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	53.09
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	74.86
VIGA V2			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	56.60
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	3.82
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	47.63
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	108.05

Fonte: Autoria própria

Figura 86 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2 e V3.



Fonte: Autoria própria

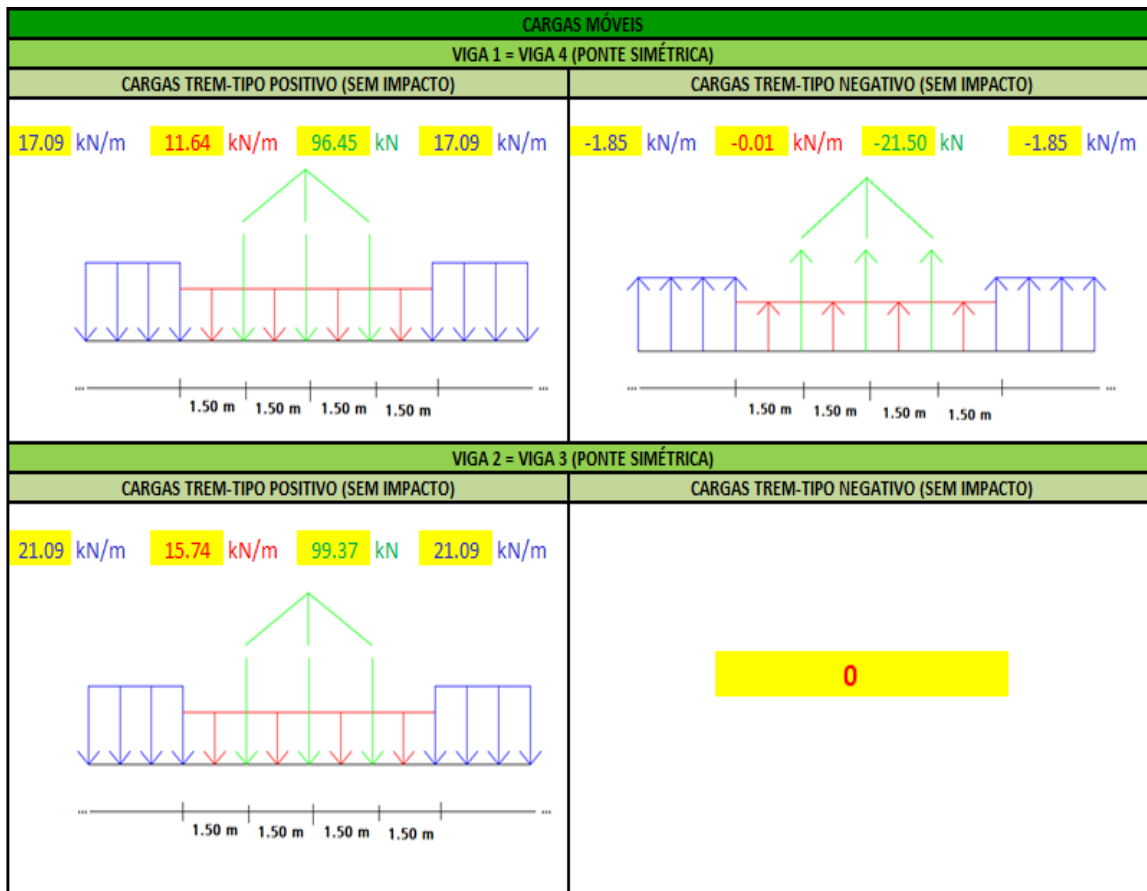
- **Pontes com seção transversal de quatro vigas**

Figura 87 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de quatro vigas.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA 1 = VIGA 4 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	15.44
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	3.45
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	41.69
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	60.57
VIGA 2 = VIGA 3 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	21.88
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	4.72
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	47.31
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	73.91

Fonte: Autoria própria

Figura 88 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3 e V4.



Fonte: Autoria própria

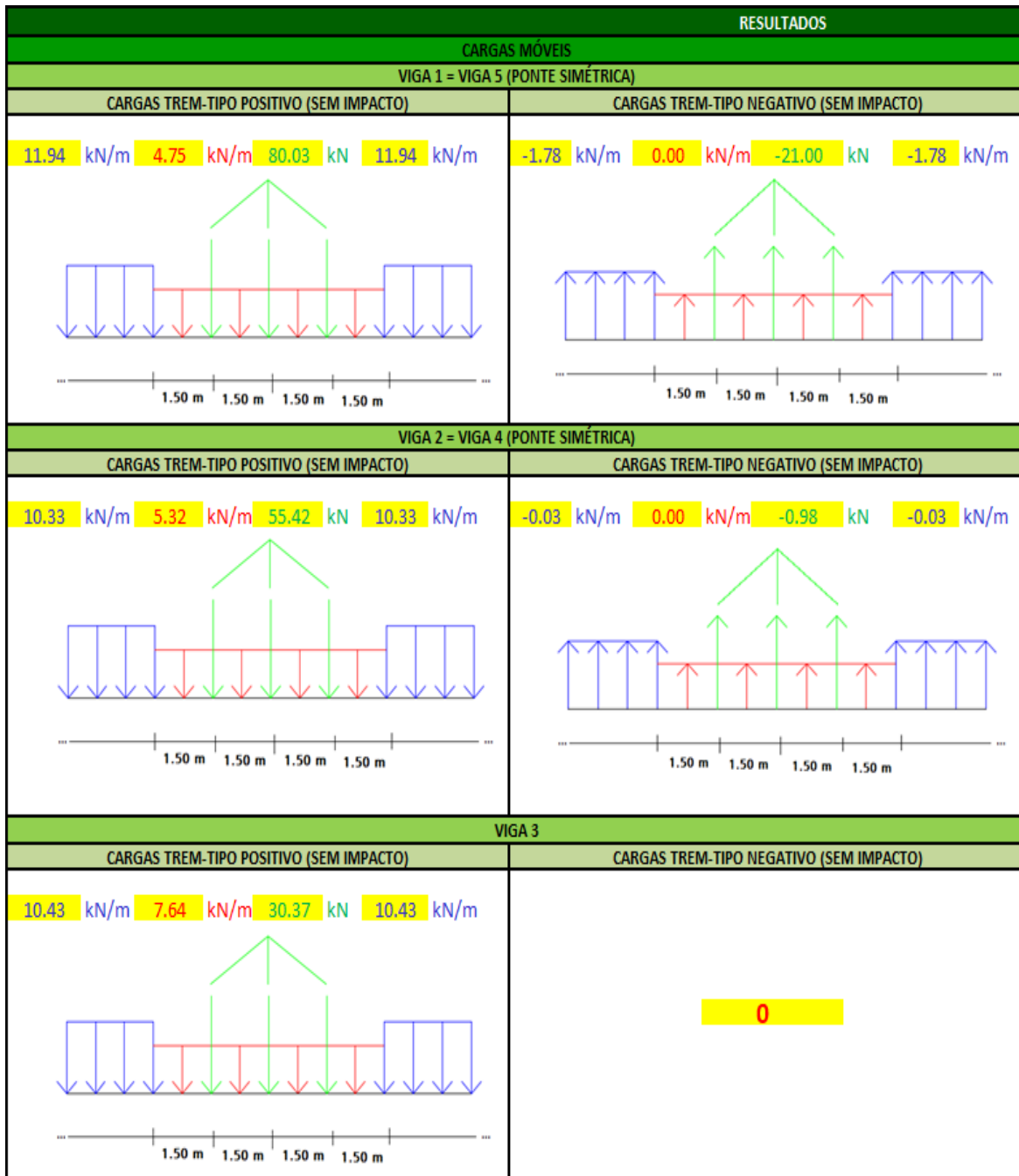
- **Pontes com seção transversal de cinco vigas**

Figura 89 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de cinco vigas.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA 1 = VIGA 5 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	g _r	kN/m	8.94
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	g _g	kN/m	2.25
Carga Permanente devido ao Peso Próprio	g _p	kN/m	37.31
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	48.51
VIGA 2 = VIGA 4 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	g _r	kN/m	9.23
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	g _g	kN/m	2.35
Carga Permanente devido ao Peso Próprio	g _p	kN/m	38.56
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	50.14
VIGA V3			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	g _r	kN/m	9.18
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	g _g	kN/m	2.33
Carga Permanente devido ao Peso Próprio	g _p	kN/m	38.56
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	50.07

Fonte: Autoria própria

Figura 90 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4 e V5



Fonte: Autoria própria

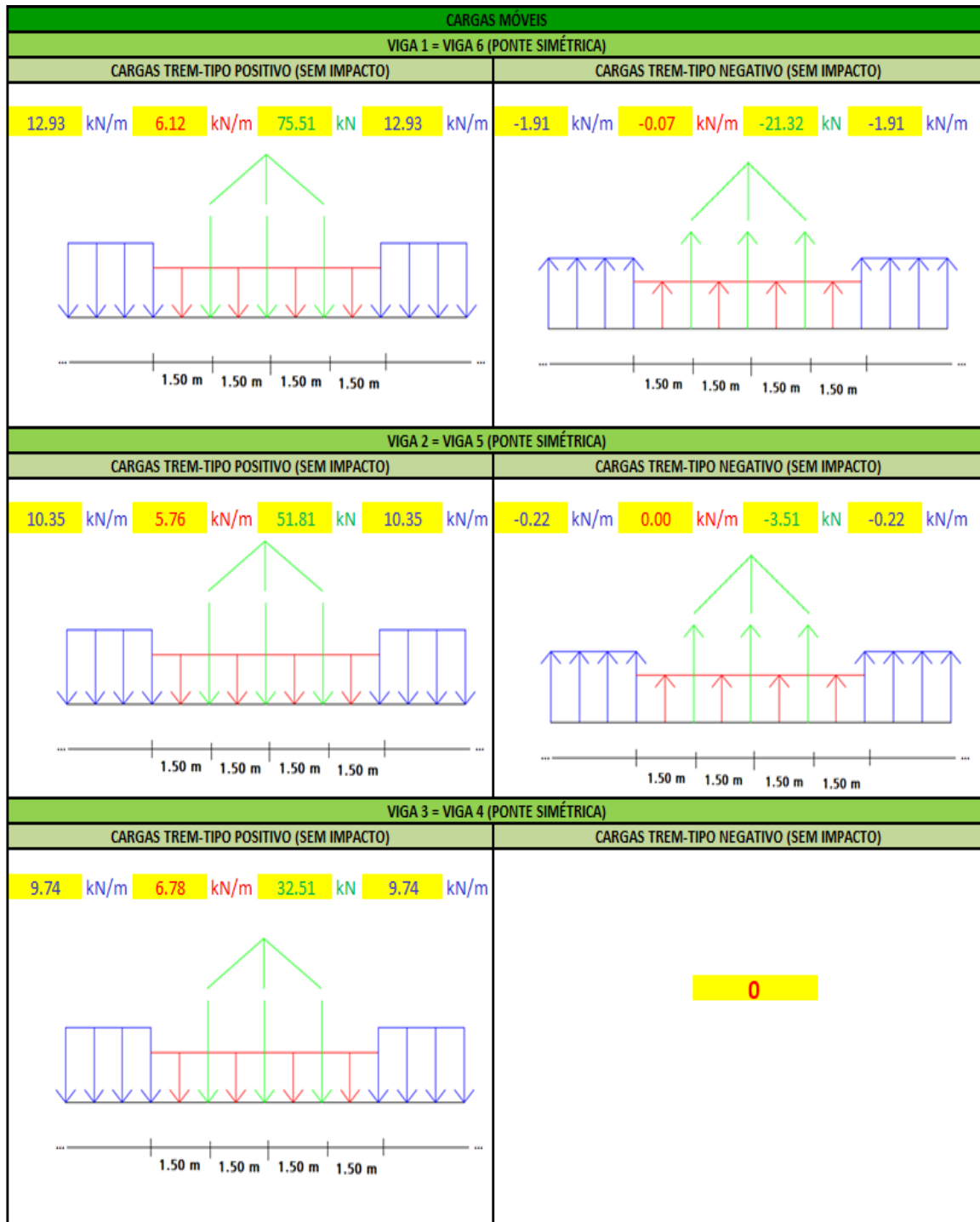
- **Pontes com seção transversal de seis vigas**

Figura 91 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de seis vigas.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA 1 = VIGA 6 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	9.70
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	2.08
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	37.06
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	48.84
VIGA 2 = VIGA 5 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	8.57
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.84
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	38.06
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	48.47
VIGA 3 = VIGA 4 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	13.66
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.84
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	38.06
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	53.56

Fonte: Aatoria própria

Figura 92 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4, V5 e V6.



Fonte: Autoria própria

- **Pontes com seção transversal de sete vigas**

Figura 93 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de sete vigas.

CARGAS PERMANENTES			
VIGA 1 = VIGA 7 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	7.66
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.64
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	35.91
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	45.21
VIGA 2 = VIGA 6 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	7.67
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.64
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	35.75
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	45.06
VIGA 3 = VIGA 5 (PONTE SIMÉTRICA)			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	7.67
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.64
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	35.75
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	45.06
VIGA V4			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	7.67
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	1.64
Carga Permanete devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	35.75
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	45.06

Fonte: Autoria própria

Figura 94 - Resultado: Trens-tipo positivo e negativo (cargas-móveis) para as vigas V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7.

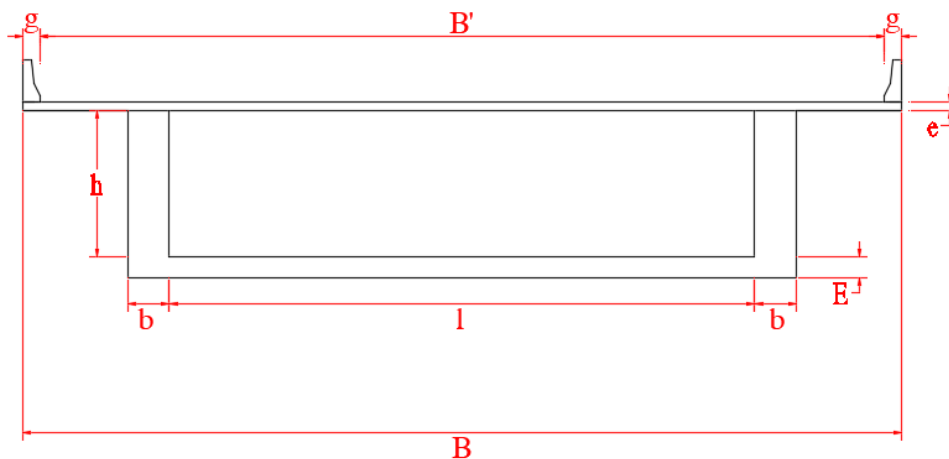


Fonte: Autoria própria

6.1.3 Pontes de Seção Celular

No caso de pontes com seção celular, devido à sua grande rigidez à torção, pode-se considerar a seção celular como uma viga única.

Figura 95 - Esquema ilustrativo: Pontes de seção celular.

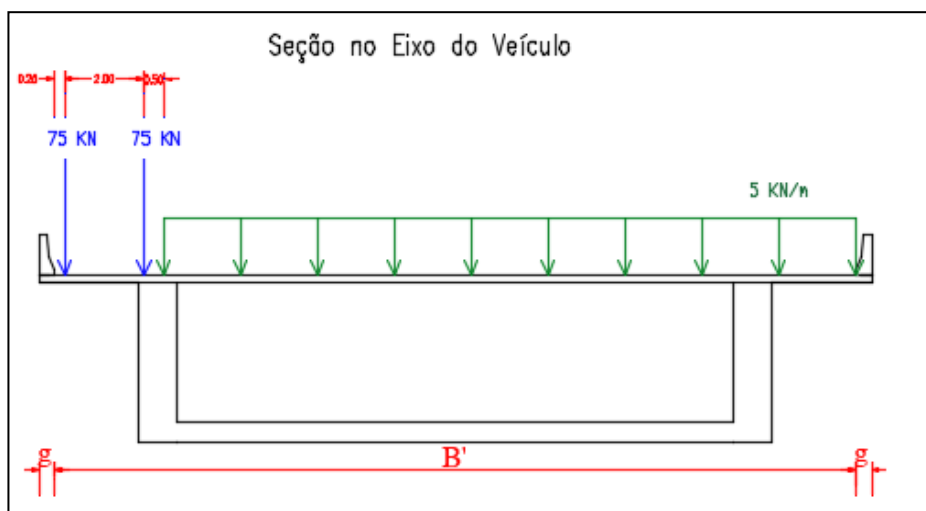


Fonte: Autoria própria

Os trens-tipo a serem considerados neste tipo de ponte são:

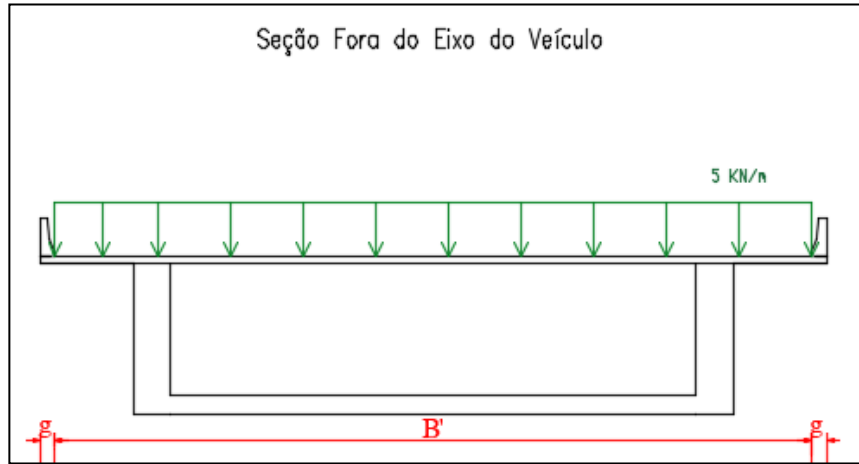
- Trem-tipo longitudinal para todo o tabuleiro carregado (TTC);
- Trem-tipo longitudinal para meio tabuleiro carregado (MTC);
- Trem-tipo longitudinal de torção para todo tabuleiro carregado (TTC);
- Trem-tipo longitudinal de torção para meio tabuleiro carregado (MTC).

Figura 96 - Esquema ilustrativo: Tabuleiro todo carregado (seção no eixo do veículo).



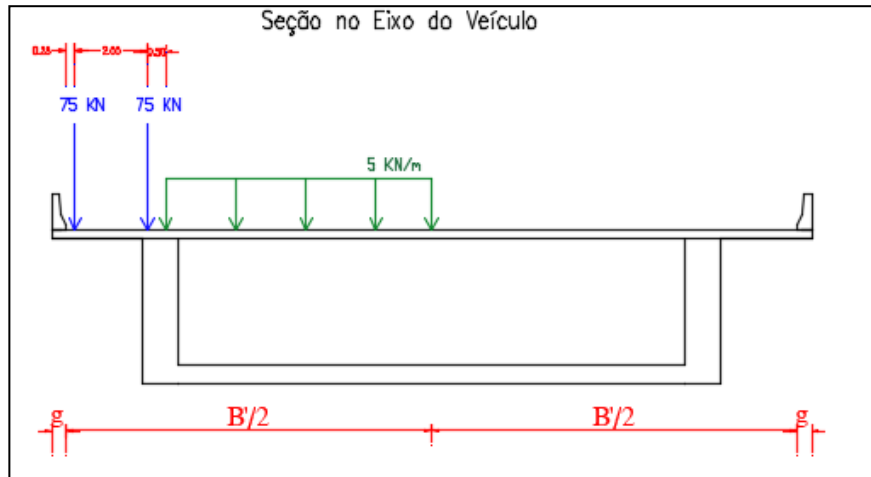
Fonte: Autoria própria

Figura 97 - Esquema ilustrativo: Tabuleiro todo carregado (seção fora do eixo do veículo).



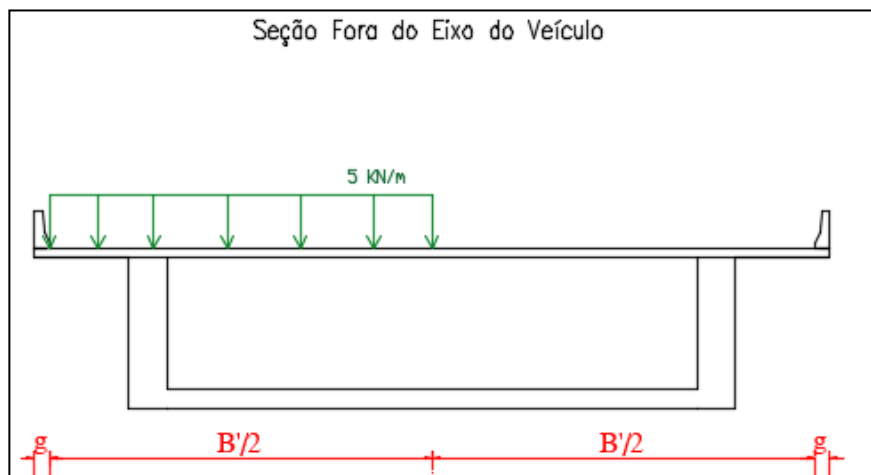
Fonte: Autoria própria

Figura 98 - Esquema ilustrativo: Meio tabuleiro carregado (seção no eixo do veículo).



Fonte: Autoria própria

Figura 99 - Esquema ilustrativo: Meio tabuleiro carregado (seção fora do eixo do veículo).



Fonte: Autoria própria

6.1.3.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada para o cálculo dos trens-tipo expostos acima são semelhantes aos dados de entrada do programa de cálculo para pontes de duas vigas, ou seja, são dados referentes à seção transversal em questão, ao trem-tipo determinado pela NBR 7188 (2013), também conhecido como TB-450, e as especificações do revestimento e do guarda-rodas da ponte a ser estudada.

Figura 100 - Dados de entrada planilha de pontes de seção celular.

DISTÂNCIAS (m)				
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	VALOR	
Largura do tabuleiro		B	13.80	
Largura do guarda-rodas		g	0.40	
Largura do tabuleiro excluindo os guarda-rodas		B'	13.00	
Espessura da Laje		e	0.20	
Espessura da viga de seção celular		E	0.30	
Largura das colunas da seção celular		b	0.30	
Largura da viga de seção celular		l	10.00	
Altura das colunas da seção celular		h	3.00	
CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO E GUARDA-RODAS				
DESCRIÇÃO		UNIDADE	VALOR	
Revestimento	Espessura do Pavimento	m	0.10	
	Peso específico do pavimento	kN/m ²	24.00	
	Recapeamento	kN/m ²	2.00	
Guarda-rodas	Área do guarda-rodas	m ²	0.23	
	Peso específico do concreto armado	kN/m ²	25.00	
DADOS TB-450				
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga concentrada de cada roda		P	kN	75.00
Carga uniformemente distribuída		p	kN/m	5.00
Distância entre as rodas		D	m	2.00
Distância entre a roda e o fim do veículo		d	m	0.50
Distância entre os eixos		x	m	1.50

Fonte: Autoria própria

6.1.3.2 Procedimento de Cálculo – Cargas Permanentes

Para o cálculo da carga permanente, como já foi explicitado nos dois tipos de pontes anteriores e na equação (5), deve-se calcular a carga permanente devido ao peso próprio, ao revestimento e ao guarda-rodas. Para as pontes de seção celular, estas cargas são calculadas através das seguintes equações:

$$g_g = \text{Área}_{\text{guarda_rodas}} \cdot \gamma_{\text{concreto}} \cdot 2 \quad (37)$$

Onde:

g_g = Carga permanente devido ao guarda-rodas atuante sobre a viga analisada;

$\text{Área}_{\text{guarda_rodas}}$ = Área do guarda-rodas obtida através das dimensões apresentadas na Figura 21;

γ_{concreto} = Peso específico do concreto.

Ob.: A equação (37) é multiplicada por dois, visto que são dois guarda-rodas atuando sobre a seção celular.

$$g_r = (e_p \cdot \gamma_{pav} + Recap) \cdot B' \quad (38)$$

Onde:

g_r = Carga permanente devido ao revestimento atuante sobre a viga analisada;

e_p = Espessura do pavimento;

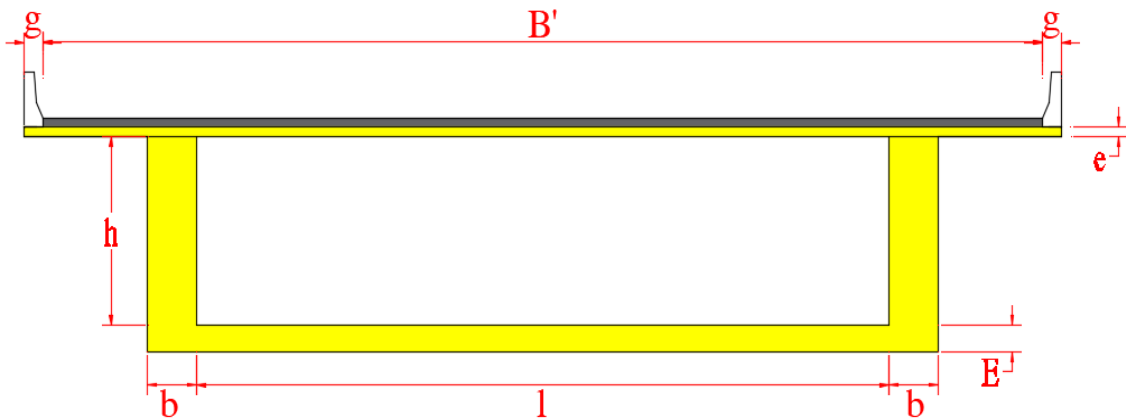
γ_{pav} = Peso específico do pavimento;

$Recap$ = Recapeamento – A NBR 7187 (2003) recomenda uma carga de 2 KN/m² para o recapeamento;

B' = Largura trafegável.

A carga permanente devido ao peso próprio da viga de seção celular é calculada também através da equação (6), em que, a área de influência da seção celular é representada em amarelo na Figura 101 e deve ser calculada através das dimensões da mesma.

Figura 101 - Representação do pavimento e da área de influência para pontes com seção celular.



Fonte: Autoria própria

Somam-se, então, as parcelas da carga permanente devido ao peso próprio, ao guarda-rodas e ao revestimento e obtém-se a carga permanente total da viga de seção celular.

6.1.3.3 Procedimento de Cálculo – Cargas Móveis

O cálculo realizado para obtenção das cargas móveis considera a largura trafegável (B') da ponte celular (representada na Figura 101), assim como as cargas e distâncias referentes ao TB-450. As equações utilizadas para o cálculo de cada trem-tipo estão expostas abaixo:

I) Trem-tipo longitudinal para todo o tabuleiro carregado (TTC):

- Seção no eixo do veículo:

$$q_1 = 5 * (B' - 2,75) \quad (39)$$

- Seção fora do eixo do veículo:

$$q_2 = 5 * B' \quad (40)$$

II) Trem-tipo longitudinal para meio tabuleiro carregado (MTC);

- Seção no eixo do veículo:

$$q_1 = 5 * (0,5 * B' - 2,75) \quad (41)$$

- Seção fora do eixo do veículo:

$$q_2 = 5 * 0,5 * B' \quad (42)$$

III) Trem-tipo longitudinal de torção para todo tabuleiro carregado (TTC);

- Seção no eixo do veículo:

$$T = 75 * ((0,5 * B' - 0,25) + (0,5 * B' - 2,25)) \quad (43)$$

$$t_1 = 5 * (B' - 2,75) * \left(0,5 * B' - \left(\frac{B' - 2,75}{2}\right)\right) \quad (44)$$

- Seção fora do eixo do veículo:

$$t_2 = 0 \text{ (equilíbrio)} \quad (45)$$

IV) Trem-tipo longitudinal de torção para meio tabuleiro carregado (MTC);

- Seção no eixo do veículo:

$$T = 75 * ((0,5 * B' - 0,25) + (0,5 * B' - 2,25)) \quad (46)$$

$$t_1 = 5 * (0,5 * B' - 2,75) * \left(\frac{(0,5 * B' - 2,75)}{2}\right) \quad (47)$$

- Seção fora do eixo do veículo:

$$t_2 = 5 * 0,5 * B' * \left(\frac{0,5}{B'}\right) \quad (48)$$

Observação: Para este tipo de seção celular não se calcula o trem-tipo negativo.

6.1.3.4 Resultados

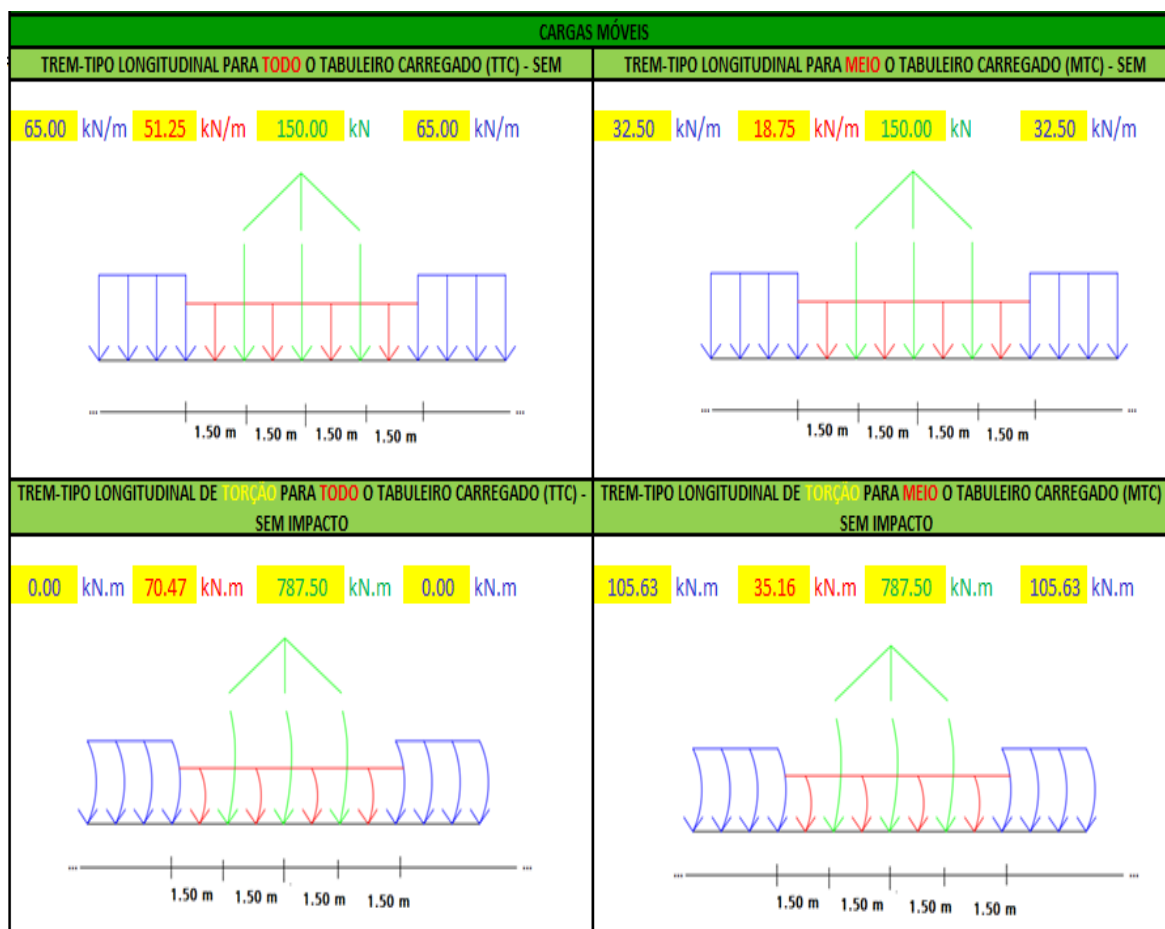
Através dos cálculos expostos acima, obtêm-se a carga permanente total, a carga concentrada de cada eixo e as cargas distribuídas fora e dentro do eixo do veículo dos quatro trens-tipo citados anteriormente, conforme as figuras abaixo:

Figura 102 - Resultado: Cargas permanentes para pontes de seção celular.

CARGAS PERMANENTES			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	VALOR
Carga Permanente devido ao Revestimento	gr	kN/m	57.20
Carga Permanente devido ao Guarda-rodas	gg	kN/m	11.50
Carga Permanente devido ao Peso Próprio	gp	kN/m	189.00
CARGA PERMANENTE TOTAL	G	kN/m	257.70

Fonte: Autoria própria

Figura 103 - Resultado: Trens-tipo (cargas móveis) para seção celular.



Fonte: Autoria própria

6.2 CÁLCULOS DOS ESFORÇOS SOLICITANTES MÁXIMOS

Além das planilhas que calculam as cargas móveis (trens-tipo) e permanentes, também foram desenvolvidas planilhas nas quais são calculados os esforços máximos (Momento Fletor e Força Cortante) para pontes em viga com o vão longitudinal biapoado com e sem balanço. Esforços esses calculados para a Combinação Última Normal e Combinação Frequente de Serviço.

Nestas planilhas os dados são divididos em: dados preenchidos por livre escolha do usuário, dados calculados através das planilhas anteriores (cargas permanentes e cargas móveis - trens-tipo) e dados calculados pela planilha em questão. Estes dados são diferenciados através da legenda a seguir:

Figura 104- Legenda dos dados das planilhas de cálculo dos esforços solicitantes máximos.

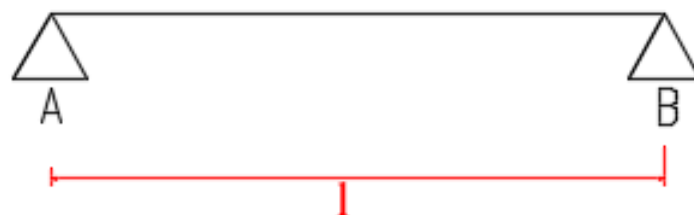
LEGENDA	DADOS A SEREM PREENCHIDOS PELO USUÁRIO	DADOS CALCULADOS ATRAVÉS DAS PLANILHAS ANTERIORES	RESULTADOS DA PLANILHA EM QUESTÃO

Fonte: Autoria própria

Os procedimentos de cálculo para pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoado com e sem balanço estão explicitados a seguir:

6.2.1 Pontes Em Viga Com Vão Longitudinal Simplesmente Biapoado Sem Balanço

Figura 105 - Seção longitudinal: Vão longitudinal simplesmente biapoado sem balanço.



Fonte: Autoria própria

6.2.1.1 Dados de Entrada

O usuário deve primeiramente informar qual é a seção transversal da ponte a ser analisada, dentre àquelas apresentadas nas planilhas anteriores (duas, três, quatro, cinco, seis e sete vigas ou seção celular) e deve informar também qual será a viga a ser analisada.

Assim, a planilha recebe os resultados referentes à carga permanente e às cargas móveis (trens-tipo positivo e negativo) das respectivas planilhas anteriores.

Figura 106 - Dados de entrada referentes à viga da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoado sem balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		TRÊS.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		V1 - TRÊS VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (kN/m)		74.86	
CARGA MÓVEL			
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (kN)	Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (kN/m)	Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (kN/m)
SÍMBOLO	Q	q.eixo	q.fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	147.08	11.42	24.68
TREM-TIPO NEGATIVO	-46.92	-0.24	-4.31

Fonte: Autoria própria

Figura 107 - Determinação da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoado sem balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		TRÊS.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		V1 - TRÊS VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (kN/m)		74.86	
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (kN)	Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (kN/m)	Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (kN/m)
SÍMBOLO	Q	q.eixo	q.fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	147.08	11.42	24.68
TREM-TIPO NEGATIVO	-46.92	-0.24	-4.31

Fonte: Autoria própria

Figura 108 - Determinação da viga a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoado sem balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		TRÊS.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		V1 - TRÊS VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (kN/m)		74.86	
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (kN)	Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (kN/m)	Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (kN/m)
SÍMBOLO	Q	q.eixo	q.fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	147.08	11.42	24.68
TREM-TIPO NEGATIVO	-46.92	-0.24	-4.31

Fonte: Autoria própria

Além destes dados, o usuário também deve informar:

- O comprimento do vão da seção longitudinal (l);
- Os esforços (momento fletor e força cortante) devido ao peso próprio das transversinas nas seções a serem analisadas (Obs.: O cálculo destes esforços explicados mais a frente no item 6.2.3);
- Os coeficientes de ponderação para as Combinações Última Normal e Frequente de Serviço e;
- O número (inteiro) de faixas de tráfego rodoviário na ponte a ser analisada.

Figura 109 - Dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

DISTÂNCIAS SEÇÃO LONGITUDINAL (m)			
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	VALOR
Comprimento do Vão		l	40.00
DADOS DA(S) TRANSVERSINA(S)			
DESCRIÇÃO		SÍMBOLO	VALOR
Momento fletor devido à carga permanente das transversinas (KN.m)	Seção no meio do vão	Mt,v	1339.60
Força Cortante devido à carga permanente das transversinas (KN)	Seção no apoio	Vt,v	100.47

Fonte: Autoria própria

Figura 110 - Outros dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

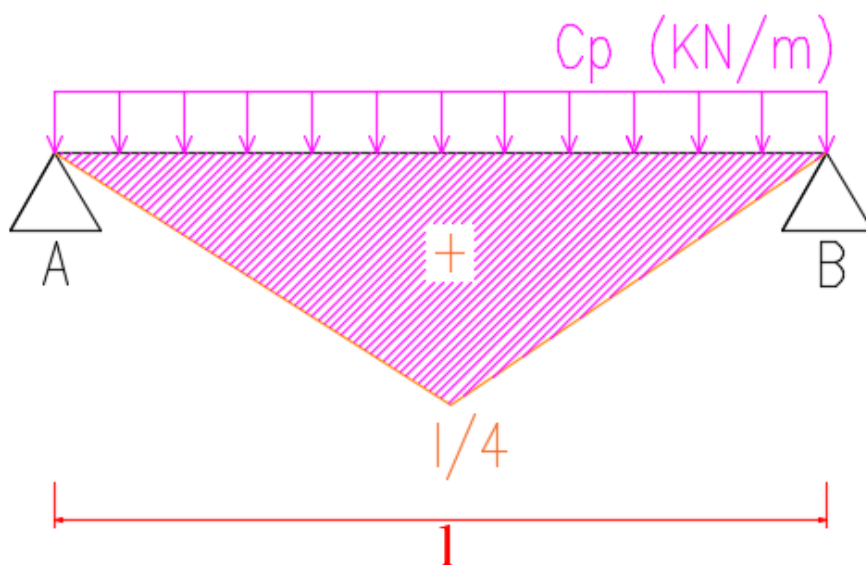
COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA COMBINAÇÕES			
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL - ELU			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
		Favorável	Desfavorável
Coefficiente de ponderação para as ações permanentes	γ_g	1.00	1.35
Coefficiente de ponderação para as ações variáveis diretas	γ_q	1.5	
COMBINAÇÃO FREQUENTE DE SERVIÇO - ELS			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Fator de redução de combinação frequente para ELS	ψ_1	0.5	
DADOS ADICIONAIS			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Número (inteiro) de faixas de tráfego	n	4	

Fonte: Autoria própria

6.2.1.2 Procedimento de Cálculo - Momento Fletor Máximo no Meio do Vão

O procedimento de cálculo se inicia ao calcular o Momento Fletor máximo devido à carga permanente na seção no meio do vão. Para isso, posiciona-se a carga permanente calculada da seção transversal na linha de influência da seção no meio do vão, conforme a Figura a seguir.

Figura 111 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.



Fonte: Autoria própria

Através da equação (49) a seguir, tem-se então o Momento Fletor máximo devido à carga permanente nesta seção.

$$M_g = C_p \cdot \text{Área}_{\Delta_{\frac{l}{4}}} \quad (49)$$

Onde:

C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

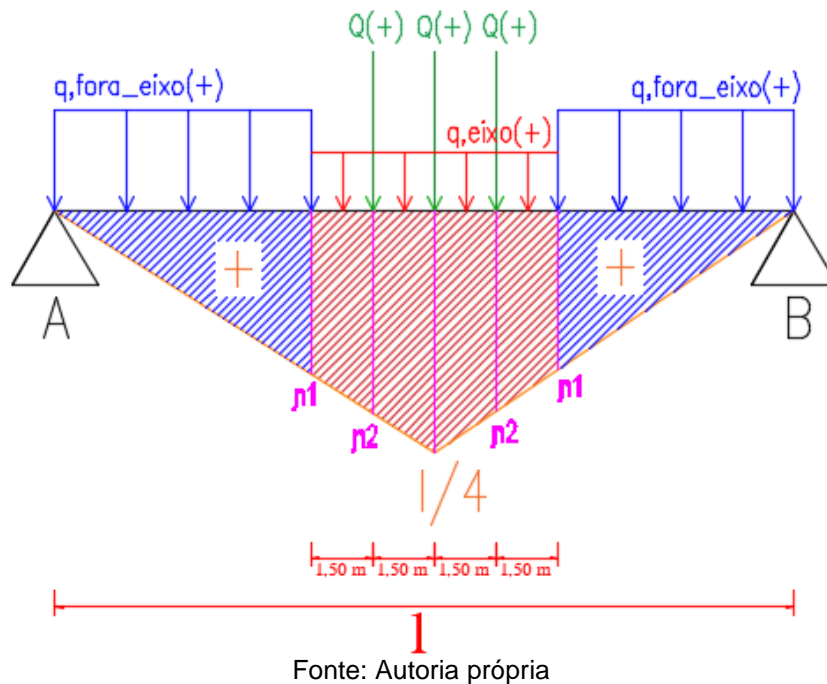
M_g = Momento Fletor máximo devido à carga permanente;

l = Comprimento do vão longitudinal;

$\text{Área}_{\Delta_{\frac{l}{4}}}$ = Área do triângulo definida através da coordenada $\frac{l}{4}$ (Representada pela hachura rosa na Figura 111).

Depois, deve-se calcular o Momento Fletor máximo devido às cargas móveis. O procedimento de cálculo é semelhante ao cálculo do Momento Fletor máximo devido à carga permanente. Neste caso, são posicionadas as cargas do trem-tipo positivo (conforme a Figura 112), e não as cargas do trem-tipo negativo, para que seja possível obter o Momento Fletor máximo devido à carga móvel.

Figura 112 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.



Através da equação (50) a seguir, tem-se então o Momento Fletor máximo devido às cargas móveis nesta seção:

$$M_q = Q_{(+)} \cdot \left(\frac{l}{4} + 2 \cdot \eta_2 \right) + q_{,eixo(+)} \cdot \text{Área}_{\text{trapézio}_{\frac{l}{4}, \eta_1}} + 2 \cdot q_{,fora_eixo(+)} \cdot \text{Área}_{\Delta_{\eta_1}} \quad (50)$$

Onde:

M_q = Momento Fletor máximo devido às cargas móveis;

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

l = Comprimento do vão longitudinal;

η_1 e η_2 = Coordenadas da linha de influência;

$q, eixo_{(+)}$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$\text{Área}_{\text{trapézio}_{\frac{l}{4}, \eta_1}}$ = Área do trapézio definido pelas coordenadas $\frac{l}{4}$ e η_1

(Representada pela hachura vermelha na Figura 112);

$q, fora_eixo_{(+)}$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

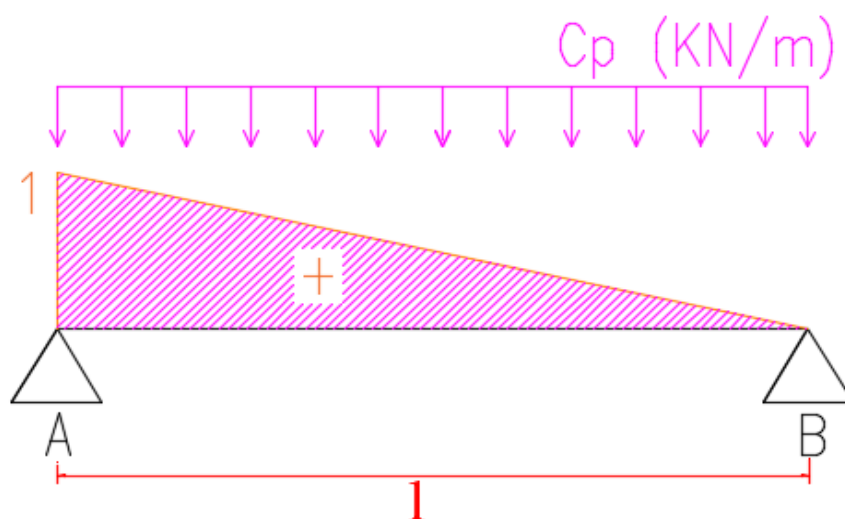
$\text{Área}_{\Delta_{\eta_1}}$ = Área dos triângulos definidas através da coordenada η_1 (Representada pela hachura azul na Figura).

É importante observar que, se $l < 6.00\text{ m}$ não haverá contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo.

6.2.1.3 Procedimento de Cálculo – Força Cortante Máxima no Apoio

O procedimento de cálculo da força cortante máxima no meio do vão é semelhante ao exposto em 6.2.1.2, só que, desta vez, utiliza-se a linha de influência da seção no apoio e as equações (51) e (52).

Figura 113 - Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção no apoio.



Fonte: Autoria própria

$$F_g = C_p \cdot \text{Área}_{\Delta_1} \quad (51)$$

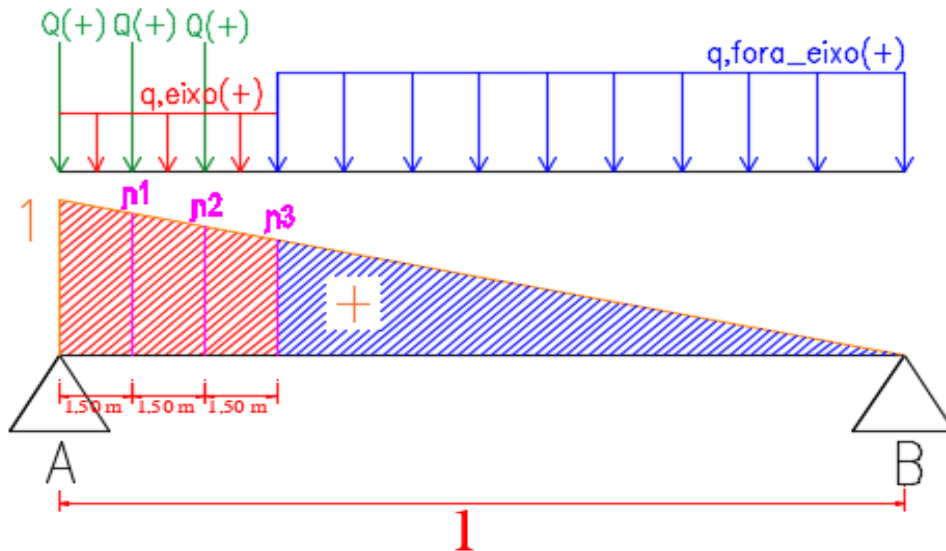
Onde:

F_g = Força Cortante máxima devido à carga permanente;

C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

Área_{Δ_1} = Área do triângulo definida através da coordenada 1 (Representada pela hachura rosa na Figura 113).

Figura 114 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção no apoio.



Fonte: Autoria própria

$$F_q = Q_{(+)} \cdot (1 + \eta_1 + \eta_2) + q_{,eixo (+)} \cdot \text{Área}_{\text{trapézio}_{1,\eta_3}} + q_{,fora_eixo (+)} \cdot \text{Área}_{\Delta_{\eta_3}} \quad (52)$$

Onde:

F_q = Força Cortante máxima devido às cargas móveis;

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

η_1, η_2 e η_3 = Coordenadas da linha de influência;

$q, eixo_{(+)} =$ Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$\hat{Área}_{trapézio_{1,\eta_3}} =$ Área do trapézio definido pelas coordenadas 1 e η_3

(Representada pela hachura vermelha na Figura 114).;

$q, fora_eixo_{(+)} =$ Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

$\hat{Área}_{\Delta_{\eta_3}} =$ Área do triângulo definida através da coordenada η_3 (Representada pela hachura azul na Figura 114).

É importante observar que, se $l < 4.50\ m$ não haverá contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo.

6.2.1.4 Resultados

Os resultados dos coeficientes de impacto são calculados de acordo com a NBR 7188 de 2013 (explicitada na seção 5.2). Multiplicam-se então os esforços devido às cargas móveis pelo respectivo coeficiente de impacto.

Figura 115 - Resultados: Coeficiente de impacto e esforços devido às cargas permanentes e móveis para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

RESULTADOS							
MOMENTO FLETOR							
SÍMBOLO	Mg	Mq,máx	CIV	CNF	CIA	CI,total	Mq,máx (com impacto)
DESCRIÇÃO	Momento Fletor devido à Carga Permanente (kN.m)	Momento Fletor Máximo devido à Carga Móvel (kN.m)	Coeficiente de Impacto Vertical	Coeficiente de Número de Faixas	Coeficiente de Impacto Adicional	CIV x CNF x CIA Para Mq,máx	Momento Fletor Máximo devido à Carga Móvel com Impacto (kN.m)
SEÇÃO NO MEIO DO VÃO	16310.61	8391.46	1.24	0.90	1.00	1.11	9331.30

RESULTADOS							
FORÇA CORTANTE							
SÍMBOLO	Vg	Vq,máx	CIV	CNF	CIA	CI,total	Vq,máx (com impacto)
DESCRIÇÃO	Força Cortante devido à Carga Permanente (kN)	Força Cortante Máxima devido à Carga Móvel (kN)	Coeficiente de Impacto Vertical	Coeficiente de Número de Faixas	Coeficiente de Impacto Adicional	CIV x CNF x CIA Para Mq,máx	Força Cortante Máxima devido à Carga Móvel com Impacto (kN)
SEÇÃO NO APOIO	1597.57	861.93	1.24	0.90	1.00	1.11	958.47

Fonte: Autoria própria

Com os esforços máximos devido à carga permanente e os esforços devido às cargas móveis, devidamente majorados, são calculadas as combinações destes esforços.

Para a combinação última normal, pode-se reduzir a equação apresentada em 4.7.1 na seguinte equação:

$$S_d = \gamma_g \cdot S_{g,k} + \gamma_q \cdot S_{q,k} \quad (53)$$

Em que:

S_d = Solicitação resultante;

$S_{g,k}$ = Solicitação característica devido às cargas permanentes;

$S_{q,k}$ = Solicitação característica devido às cargas móveis (já com impacto);

γ_g = Coeficiente de ponderação para as ações permanentes, podendo este ser favorável ou desfavorável;

γ_q = Coeficiente de ponderação para as ações variáveis.

Os valores dos coeficientes de ponderação adotados nos cálculos foram obtidos através da NBR 8681 (2003) e estão evidenciados nas Figuras 116 e 117 a seguir.

Figura 116 - Coeficientes de ponderação para as ações permanentes (agrupadas).

Combinação	Tipo de estrutura	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Grandes pontes ¹⁾	1,30	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,35	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,40	1,0
Especial ou de construção	Grandes pontes ¹⁾	1,20	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,25	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,30	1,0
Excepcional	Grandes pontes ¹⁾	1,10	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,15	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,20	1,0

¹⁾ Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações permanentes.
²⁾ Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m².
³⁾ Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m².

Fonte: NBR 8681 (2003)

Figura 117- Coeficientes de ponderação para as ações variáveis (consideradas conjuntamente).

Combinação	Tipo de estrutura	Coeficiente de ponderação
Normal	Pontes e edificações tipo 1	1,5
	Edificações tipo 2	1,4
Especial ou de construção	Pontes e edificações tipo 1	1,3
	Edificações tipo 2	1,2
Excepcional	Estruturas em geral	1,0

¹⁾ Quando as ações variáveis forem consideradas conjuntamente, o coeficiente de ponderação mostrado na tabela 5 se aplica a todas as ações, devendo-se considerar também conjuntamente as ações permanentes diretas. Nesse caso permite-se considerar separadamente as ações indiretas como recalque de apoio e retração dos materiais conforme tabela 3 e o efeito de temperatura conforme tabela 4.

Fonte: NBR 8681 (2003)

Já para a combinação frequente de serviço, a equação apresentada no item 4.7.2 pode ser reduzida em:

$$S_d = S_{g,k} + \Psi_1 \cdot S_{q,k} \quad (54)$$

Em que:

S_d = Solicitação resultante;

$S_{g,k}$ = Solicitação característica devido às cargas permanentes;

$S_{q,k}$ = Solicitação característica devido às cargas móveis (já com impacto);

Ψ_1 = Fator de redução para cargas variáveis.

O valor do fator de redução adotado nos cálculos também foi obtido através da NBR 8681 (2003) como mostra a Figura 118 a seguir.

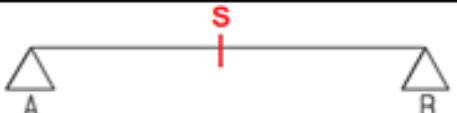
Figura 118 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis.

Ações	ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{(3), 4)}$
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito. ²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero. ⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			

Fonte: NBR 8681 (2003)


Ao aplicar os valores dos momentos fletores e forças cortantes máximos devido às cargas permanentes e cargas móveis nas equações (53) e (54) apresentadas anteriormente, obtém-se os seguintes resultados:

Figura 119 - Resultados: Momento fletor (ELU e ELS) para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

RESULTADOS	
MOMENTO FLETOR	
Momento Fletor Máximo - ELU - Combinação Última Normal (kN.m)	Md,máx
Momento Fletor Máximo - ELS - Combinação Frequente de Serviço (kN.m)	Mcf,máx
	Md,máx
	Mcf,máx
	36016.28
	20976.26

Fonte: Autoria própria

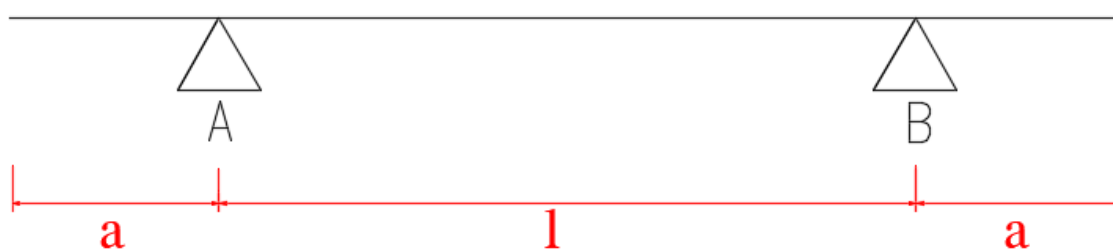
Figura 120 - Resultados: Força cortante (ELU e ELS) para pontes com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço.

RESULTADOS		
FORÇA CORTANTE		
Força Cortante Máxima - ELU - Combinação Última Normal (kN)	Vd,máx	
Força Cortante Máxima - ELS - Combinação Frequente de Serviço (kN)	Vcf,máx	
	Vd,máx	3594.42
	Vcf,máx	2076.81

Fonte: Autoria própria

6.2.2 Pontes Em Viga Com Vão Longitudinal Simplesmente Biapoiado Com Balanço

Figura 121 - Seção longitudinal: Vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.



Fonte: Autoria própria

6.2.2.1 Dados de Entrada

Os dados de entradas são semelhantes aos da planilha de pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço, nos quais o usuário deve primeiramente informar qual a seção transversal da ponte a ser analisada, dentre àquelas apresentadas nas planilhas anteriores (duas, três, quatro, cinco, seis e sete vigas ou seção celular) e deve informar também qual será a viga a ser analisada.

Figura 122 - Dados de entrada referentes à viga da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		SETE.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		V7 - SETE VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (KN/m)		45.21	
CARGA MÓVEL			
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (KN)	Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo (KN/m)	Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo (KN/m)
SÍMBOLO	Q	q,eixo	q,fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	63.52	4.89	10.62
TREM-TIPO NEGATIVO	-20.70	-0.11	-1.91

Fonte: Autoria própria

Figura 123 - Determinação da seção transversal a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		SETE.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		DUAS.VIGAS TRÊS.VIGAS QUATRO.VIGAS CINCO.VIGAS SEIS.VIGAS SETE.VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (KN/m)		45.21	
CARGA MÓVEL			
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (KN)	no eixo do veículo (KN/m)	fora do eixo do veículo (KN/m)
SÍMBOLO	Q	q,eixo	q,fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	63.52	4.89	10.62
TREM-TIPO NEGATIVO	-20.70	-0.11	-1.91

Fonte: Autoria própria

Figura 124 - Determinação da viga a ser analisada para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

SEÇÃO TRANSVERSAL		SETE.VIGAS	
VIGA A SER ANALISADA		V7 - SETE VIGAS	
CARGA PERMANENTE LONGARINAS (KN/m)		V1 - SETE VIGAS V2 - SETE VIGAS V3 - SETE VIGAS V4 - SETE VIGAS V5 - SETE VIGAS V6 - SETE VIGAS V7 - SETE VIGAS	
CARGA MÓVEL			
DEFINIÇÃO	Carga concentrada em cada eixo (KN)	q,eixo	q,fora_eixo
SÍMBOLO	Q	q,eixo	q,fora_eixo
TREM-TIPO POSITIVO	63.52	4.89	10.62
TREM-TIPO NEGATIVO	-20.70	-0.11	-1.91

Fonte: Autoria própria

Além dos mesmos dados necessários dados na planilha de pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço, também é necessário também informar o comprimento do balanço (a) e as seções analisadas serão diferentes, o que altera, conseqüentemente, os esforços devido às transversinas.

Observação: Esta planilha só é válida para valores de comprimento do vão maiores ou iguais a 4.50 metros

Figura 125 - Dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

DISTÂNCIAS SEÇÃO LONGITUDINAL (m)			VERIFICAÇÃO	
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	SITUAÇÃO	
Comprimento do Balanço	a	2.50	OK: O Programa é válido!	
Comprimento do Vão	l	10.00		
DADOS DA(S) TRANSVERSINA(S)				
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR		
Momento fletor devido à carga permanente das transversinas (KN.m)	Seção no meio do vão	Mt,v		4.94
	Seção no apoio	Mt,a		-218.10
Força Cortante devido à carga permanente das transversinas (KN)	Seção no apoio	Vt,a (pela esquerda do apoio)		-116.32
		Vt,a (pela direita do apoio)	66.98	

Fonte: Autoria própria

Figura 126 - Outros dados de entrada necessários para a planilha de pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA COMBINAÇÕES			
COMBINAÇÃO ÚLTIMA NORMAL - ELU			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Coeficiente de ponderação para as ações permanentes	γ_g	Favorável	1.00
		Desfavorável	1.35
Coeficiente de ponderação para as ações variáveis diretas	γ_q	1.5	
COMBINAÇÃO FREQUENTE DE SERVIÇO - ELS			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Fator de redução de combinação frequente para ELS	ψ_1	0.5	
DADOS ADICIONAIS			
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR	
Número (inteiro) de faixas de tráfego	n	4	

Fonte: Autoria própria

6.2.2.2 Procedimento de Cálculo – Esforços Máximos

Nesta planilha são calculados os seguintes esforços:

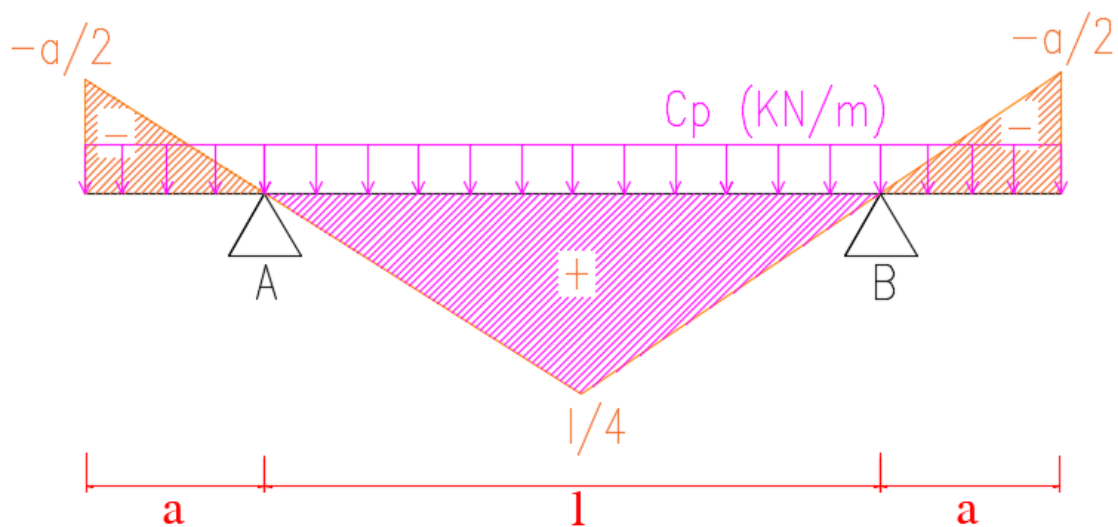
- Momento Fletor Máximo no meio do vão;
- Momento Fletor Máximo no apoio;
- Força Cortante Máxima à esquerda do apoio;
- Força Cortante Máxima à direita do apoio.

O cálculo destes esforços, tanto para as cargas permanentes quanto para as cargas móveis, são exatamente iguais ao cálculo descrito no item 6.2.1.2. O diferencial se encontra nas linhas de influência utilizadas (cada seção possui a sua linha de influência para cada esforço) e na escolha da utilização dos trens-tipos, positivo ou negativo, de forma a gerarem os esforços máximos.

A seguir é descrito os procedimentos de cálculo para cada uma das seções:

a) Momento Fletor Máximo no meio do vão:

Figura 127 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.



Fonte: Autoria própria

O cálculo do Momento Fletor máximo devido à carga permanente para a seção no meio do vão é dado através da equação (55) a seguir:

$$M_g = C_p \cdot \left(\text{Área}_{\Delta_{\frac{l}{4}}} + 2 \cdot \text{Área}_{\Delta_{\left(\frac{-a}{2}\right)}} \right) \quad (55)$$

Onde:

M_g = Momento Fletor máximo devido à carga permanente;

C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

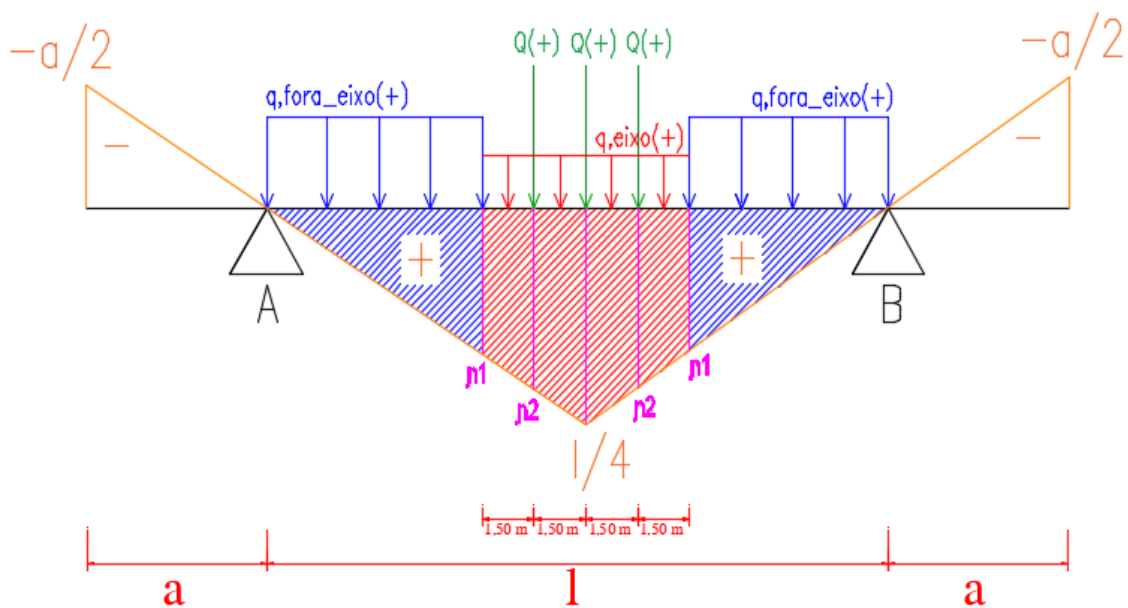
l = Comprimento do vão longitudinal;

$\hat{Área}_{\Delta_{\frac{l}{4}}} = \hat{Área}$ do triângulo definida através da coordenada $\frac{l}{4}$ (Representada pela hachura rosa na Figura 127).

$\hat{Área}_{\Delta_{(\frac{-a}{2})}} = \hat{Área}$ do triângulo definida através da coordenada $\frac{-a}{2}$ (Representada pela hachura laranja na Figura 127).

Já cálculo do Momento Fletor máximo devido às cargas móveis para a seção no meio do vão é dado também através da equação (50) apresentada anteriormente.

Figura 128- Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no meio do vão.

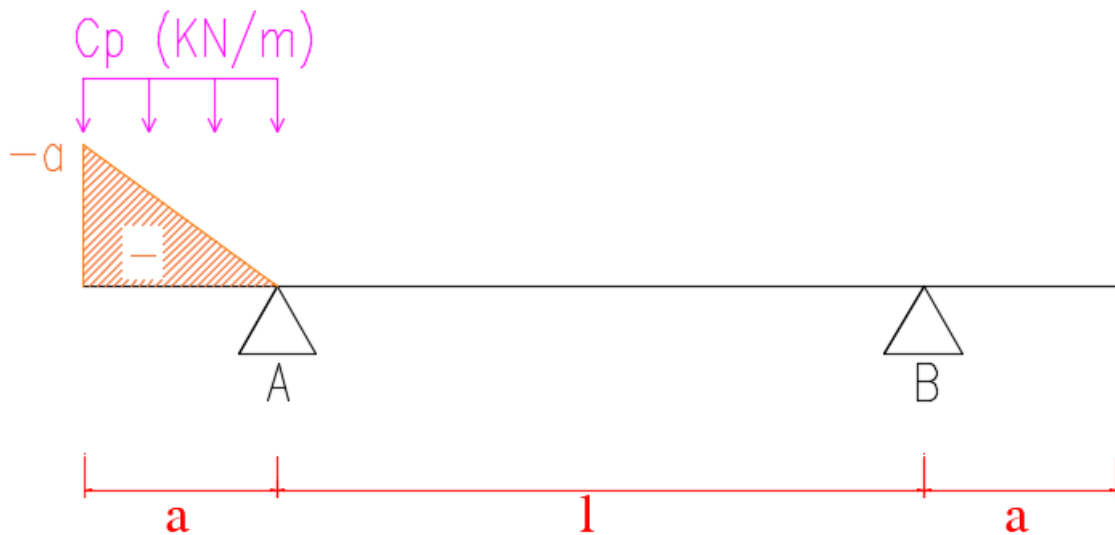


Fonte: Autoria própria

Considera-se desprezível a parcela de contribuição das cargas do trem-tipo negativo sobre os balanços e a observação de que se $l < 6.00 \text{ m}$ não haverá contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo também é válida.

b) Momento Fletor Máximo no apoio:

Figura 129 - Carga permanente posicionada na linha de influência de momento fletor da seção no apoio.



Fonte: A autoria própria

O cálculo do Momento Fletor máximo devido à carga permanente para a seção no apoio é dado através da equação (56) a seguir:

$$M_g = C_p \cdot \text{Área}_{\Delta(-a)} \quad (56)$$

M_g = Momento Fletor máximo devido à carga permanente;

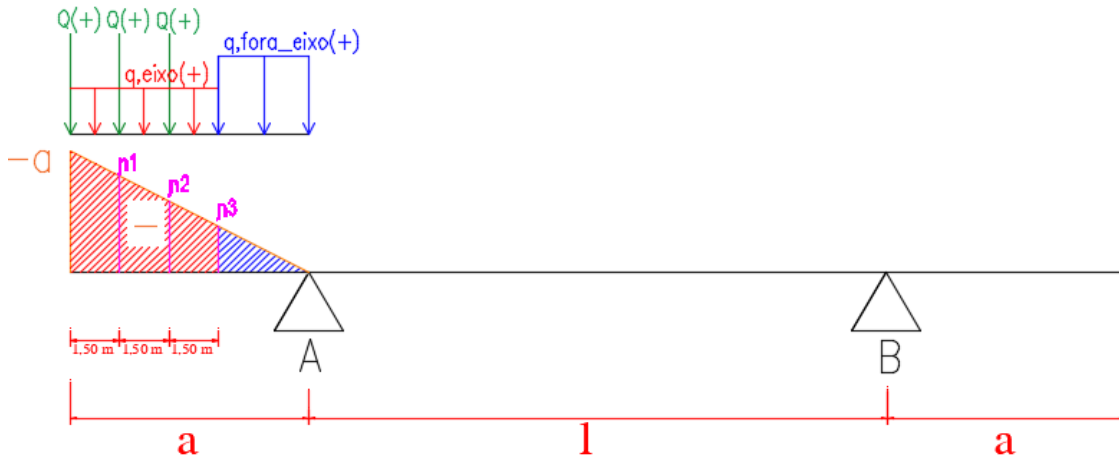
C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

$\text{Área}_{\Delta(-a)}$ = Área do triângulo definida através da coordenada $-a$

(Representada pela hachura laranja na Figura 129).

Já cálculo do Momento Fletor máximo devido às cargas móveis para a seção no apoio é dado através da equação (57) apresentada a seguir:

Figura 130 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de momento fletor da seção no apoio.



Fonte: Autoria própria

$$M_q = Q_{(+)} \cdot (-a + \eta_1 + \eta_2) + q_{, \text{eixo}(+)} \cdot \text{Área}_{\text{trapézio}_{(-a), \eta_3}} + q_{, \text{fora_eixo}(+)} \cdot \text{Área}_{\Delta_{\eta_3}} \quad (57)$$

Onde:

M_q = Momento Fletor máximo devido às cargas móveis;

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$-a, \eta_1$ e η_2 = Coordenadas da linha de influência;

$q, \text{eixo}(+)$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$\text{Área}_{\text{trapézio}_{(-a), \eta_3}}$ = Área do trapézio definido pelas coordenadas $-a$ e η_3

(Representada pela hachura vermelha na Figura 130);

$q, \text{fora_eixo}(+)$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

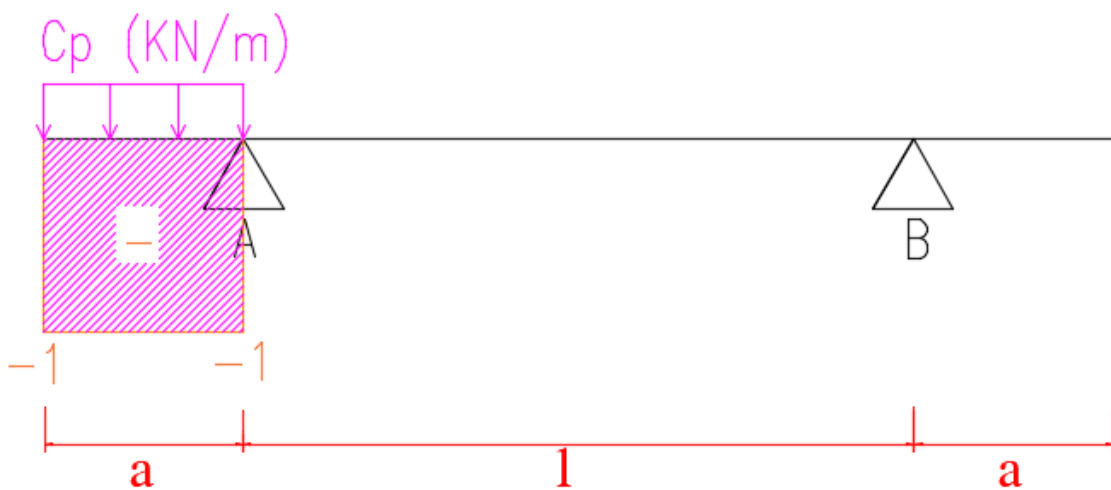
$\text{Área}_{\Delta_{\eta_3}}$ = Área dos triângulos definidas através da coordenada η_3 (Representada pela hachura azul na Figura 130).

É importante observar que, se $l < 4.50 \text{ m}$ não haverá contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo.

c) Força Cortante Máxima à esquerda do apoio:

O cálculo da Força Cortante máxima devido à carga permanente para a seção à esquerda do apoio é dado através da equação (58) a seguir:

Figura 131 - Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção a esquerda do apoio.



Fonte: A autoria própria

$$F_g = C_p \cdot \text{Área}_{\square(-1)} \quad (58)$$

Onde:

F_g = Força Cortante máxima devido à carga permanente;

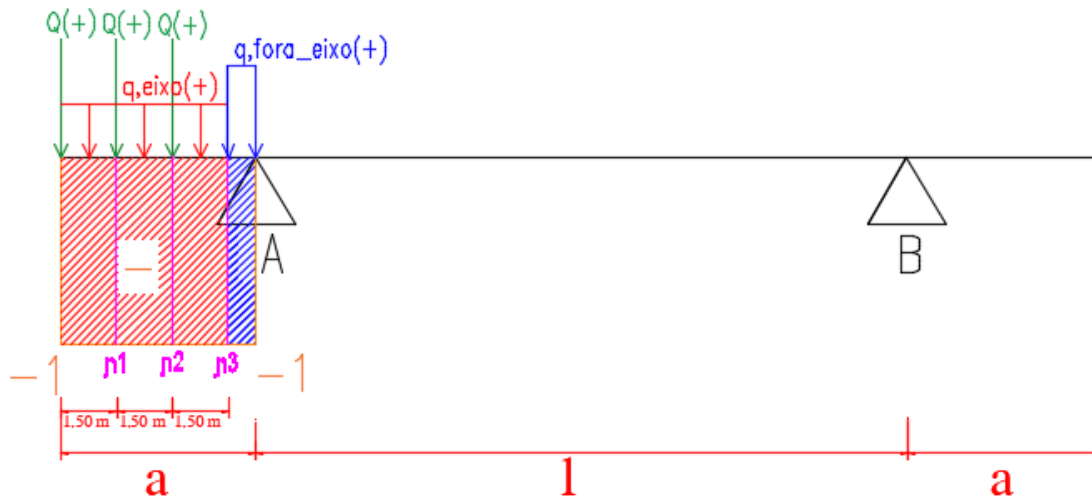
C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

$\text{Área}_{\square(-1)}$ = Área do retângulo definida através da coordenada -1

(Representada pela hachura rosa na Figura 131).

Já cálculo da Força Cortante máxima devido às cargas móveis para a seção à esquerda do apoio é dado através da equação (59) apresentada a seguir:

Figura 132 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção a esquerda do apoio.



Fonte: Autoria própria

$$F_q = Q_{(+)} \cdot (-1 + \eta_1 + \eta_2) + q_{eixo(+)} \cdot \text{Área}_{\square_{-1,\eta_3}} + q_{fora_eixo(+)} \cdot \text{Área}_{\square_{\eta_3,(-1)}} \quad (59)$$

Onde:

F_q = Força Cortante máxima devido às cargas móveis;

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$-1, \eta_1, \eta_2$ e η_3 = Coordenadas da linha de influência;

$q, eixo_{(+)}$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$\text{Área}_{\square_{-1,\eta_3}}$ = Área do retângulo definida pelas coordenadas -1 e η_3

(Representada pela hachura vermelha na Figura 132);

$q, fora_eixo_{(+)} =$ Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

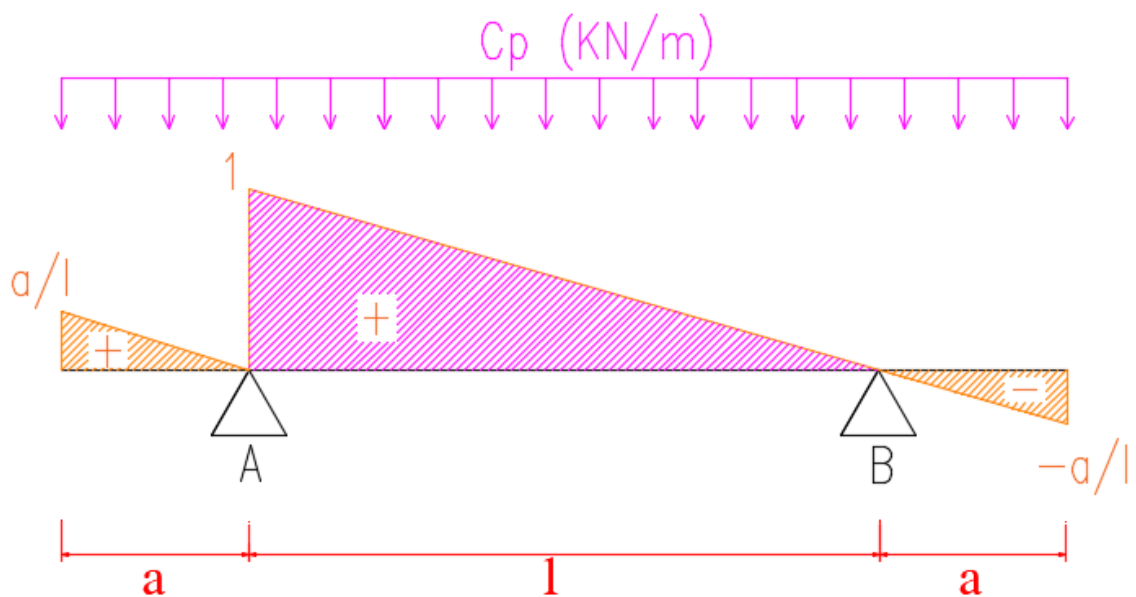
$\hat{Area}_{\square_{\eta_3,(-1)}} =$ Área do retângulo definida pelas coordenadas η_3 e -1 (Representada pela hachura azul na Figura 132).

É importante observar que, se $l < 4.50\ m$ não haverá contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo.

d) Força Cortante Máxima à direita do apoio:

O cálculo da Força Cortante máxima devido à carga permanente para a seção à direita do apoio é dado através da equação (60) a seguir:

Figura 133- Carga permanente posicionada na linha de influência de esforço cortante da seção a direita do apoio.



Fonte: Autoria própria

$$F_g = C_p \cdot \hat{Area}_{\Delta_{(1)}} \quad (60)$$

Onde:

F_g = Força Cortante máxima devido à carga permanente;

C_p = Carga permanente total obtida através da seção transversal;

$\text{Área}_{\Delta(1)}$ = Área do triângulo definida através da coordenada +1

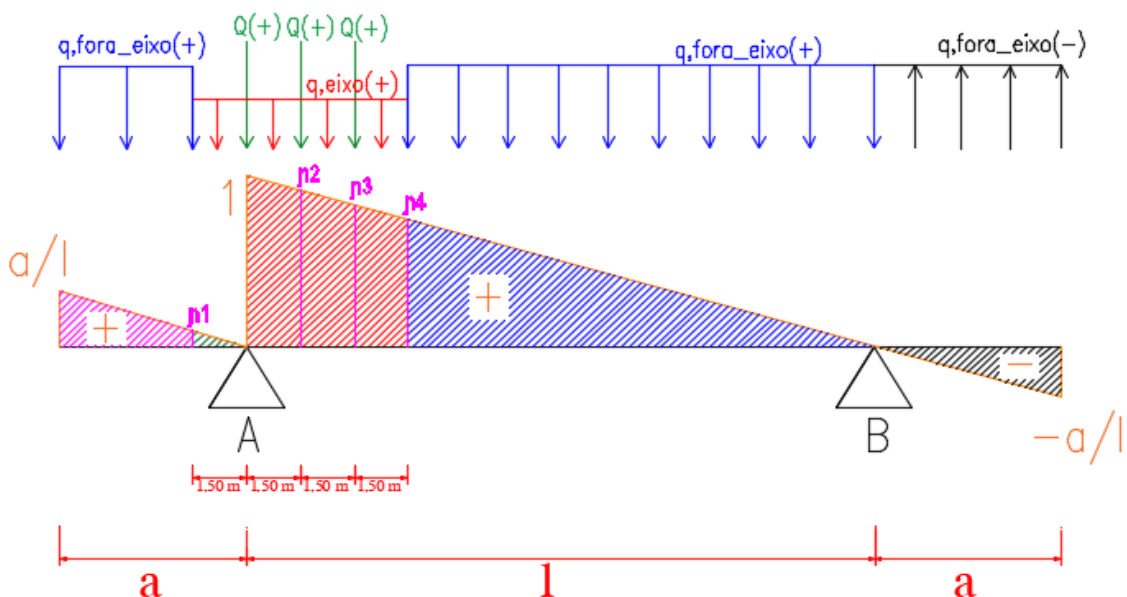
(Representada pela hachura rosa na Figura 133).

As parcelas de carga permanente sobre as áreas representadas pelas hachuras laranja se cancelam, visto que as mesmas possuem o mesmo valor, porém sinais opostos.

Para o cálculo da Força Cortante máxima à direita do apoio devido às cargas móveis não há uma equação que se aplique em todos os casos.

A Figura 134 a seguir, por exemplo, representa o caso em que o vão longitudinal (l) é maior que 4,50 metros e que comprimento o balanço (a) é maior que 1,50 metros, ou seja, onde há a contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo no meio do vão e no balanço esquerdo.

Figura 134 - Cargas móveis posicionadas na linha de influência de esforço cortante da seção a direita do apoio.



Fonte: Autoria própria

A equação (61) a seguir permite calcular a Força Cortante máxima à direita do apoio para o caso apresentado na Figura 134:

$$\begin{aligned}
 F_q = & Q_{(+)} \cdot (1 + \eta_2 + \eta_3) + q_{eixo (+)} \cdot \left(\text{Área}_{\text{trapézio}_{1,\eta_4}} + \text{Área}_{\Delta_{\eta_1}} \right) \\
 & + q_{fora_eixo (+)} \cdot \left(\text{Área}_{\Delta_{\eta_4}} + \text{Área}_{\text{trapézio}_{\eta_1, \left(\frac{a}{l}\right)}} \right) \\
 & + q_{fora_eixo (-)} \cdot \left(\text{Área}_{\Delta_{\left(\frac{-a}{l}\right)}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

Onde:

F_q = Força Cortante máxima devido às cargas móveis;

$Q_{(+)}$ = Carga concentrada no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$1, \frac{a}{l}, \frac{-a}{l}, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ e η_4 = Coordenadas da linha de influência;

$q_{eixo (+)}$ = Carga uniformemente distribuída no eixo do veículo para o trem-tipo longitudinal positivo;

$\text{Área}_{\text{trapézio}_{1,\eta_4}}$ = Área do trapézio definida pelas coordenadas 1 e η_4

(Representada pela hachura vermelha na Figura 134);

$\text{Área}_{\Delta_{\eta_1}}$ = Área do triângulo definida pela coordenada η_1 (Representada pela hachura verde na Figura 134);

$q_{fora_eixo (+)}$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo;

$\text{Área}_{\Delta_{\eta_4}}$ = Área do triângulo definida pela coordenada η_4 (Representada pela hachura azul na Figura 134);

$\text{Área}_{\text{trapézio}_{\eta_1, \frac{a}{l}}} = \text{Área do trapézio definida pelas coordenadas } \eta_1 \text{ e } \frac{a}{l}$

(Representada pela hachura rosa na Figura 134);

$q_{\text{fora eixo}(-)}$ = Carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal negativo;

$\text{Área}_{\Delta_{\frac{-a}{l}}} = \text{Área do triângulo definida pela coordenada } \frac{-a}{l}$ (Representada pela hachura preta na Figura 134).

Para o caso de $l = 4,50$ metros, não haverá a contribuição da carga uniformemente distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo longitudinal positivo no meio do vão e, para o caso de $a \leq 1,50$ metros não haverá contribuição desta mesma carga no balanço esquerdo.

Em todos os casos, posiciona-se a carga distribuída fora do eixo do veículo do trem-tipo negativo no balanço direito (parte negativa da linha de influência de força cortante à direita do apoio), pois a mesma contribui para o valor de força cortante máxima na seção à direita do apoio.

Vale ressaltar que esta planilha só é capaz de calcular a força cortante máxima à direita do apoio para valores do comprimento do vão (l) maiores ou igual a 4,50 metros, visto que, os casos em que l é menor que 4,50 metros resultam em diversos posicionamentos das cargas móveis condicionados também ao valor do comprimento do balanço (a), o que dificulta a generalização deste esforço para quaisquer valores de l e a .

6.2.2.3 Resultados

De forma semelhante à planilha para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado sem balanço, tem-se, nas imagens a seguir, os resultados do cálculo dos coeficientes de impacto para cargas móveis, a majoração dos

esforços devido às cargas móveis através deste coeficiente e o resultado das combinações.



Figura 135 - Resultados: Coeficiente de impacto e esforços devido às cargas permanentes e móveis para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

RESULTADOS							
MOMENTO FLETOR							
SÍMBOLO	Mg	Mq,máx	CIV	CNF	CIA	CI,total	Mq,máx (com impacto)
DESCRIÇÃO	Momento Fletor devido à Carga Permanente (KN.m)	Momento Fletor Máximo devido à Carga Móvel (KN.m)	Coeficiente de Impacto Vertical	Coeficiente de Número de Faixas	Coeficiente de Impacto Adicional	CIV x CNF x CIA Para Mq,máx	Momento Fletor Máximo devido à Carga Móvel com Impacto (KN.m)
SEÇÃO NO MEIO DO VÃO	428.77	453.76	1.35	0.90	1.00	1.22	552.68
SEÇÃO NO APOIO	-359.38	-237.62	1.35	0.90	1.25	1.52	-360.89

RESULTADOS							
FORÇA CORTANTE							
SÍMBOLO	Vg	Vq,máx	CIV	CNF	CIA	CI,total	Vq,máx (com impacto)
DESCRIÇÃO	Força Cortante devido à Carga Permanente (KN)	Força Cortante Máxima devido à Carga Móvel (KN)	Coeficiente de Impacto Vertical	Coeficiente de Número de Faixas	Coeficiente de Impacto Adicional	CIV x CNF x CIA Para Mq,máx	Força Cortante Máxima devido à Carga Móvel com Impacto (KN)
SEÇÃO À ESQUERDA DO APOIO	-229.34	-191.35	1.35	0.90	1.00	1.22	-232.50
SEÇÃO À DIREITA DO APOIO	293.02	198.38	1.35	0.90	1.25	1.52	301.29

Fonte: Autoria própria

Figura 136 - Resultados: Momento fletor (ELU e ELS) para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

RESULTADOS	
MOMENTO FLETOR	
Momento Fletor Máximo - ELU - Combinação Última Normal (KN.m)	Md,máx
Momento Fletor Máximo - ELS - Combinação Frequente de Serviço (KN.m)	Mcf,máx
	Md,máx
	Mcf,máx
	Md,máx
	Mcf,máx

Fonte: Autoria própria

Figura 137 - Resultados: Força cortante (ELU e ELS) para pontes em viga com vão longitudinal simplesmente biapoiado com balanço.

RESULTADOS		
FORÇA CORTANTE		
Força Cortante Máxima - ELU - Combinação Última Normal (KN)	Vd,máx	
Força Cortante Máxima - ELS - Combinação Frequente de Serviço (KN)	Vcf,máx	
	Vd,máx	-658.35
	Vcf,máx	-345.59
	Vd,máx	847.52
	Vcf,máx	443.67

Fonte: Autoria própria

6.2.3 Esforços Devido às Transversinas

Os dados de entrada referentes às transversinas necessários para as planilhas de cálculo dos esforços solicitantes máximos devem ser calculados de acordo com os procedimentos descritos a seguir.

As cargas concentradas devido às transversinas devem ser calculadas da seguinte forma:

$$F_T = (h_T \cdot b_T \cdot l) \cdot \gamma_{concreto} \quad (62)$$

Onde,

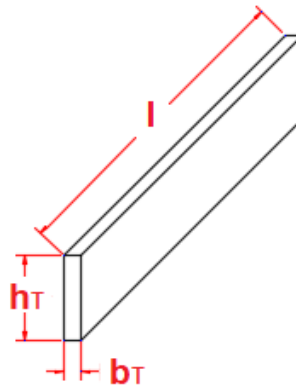
h_T = altura da transversina (m);

b_T = base da transversina (m);

l = distância transversal livre entre longarinas (m);

$\gamma_{concreto}$ = peso específico do concreto armado (KN/m³).

Figura 138 - Dimensões da transversina.



Fonte: Autoria própria

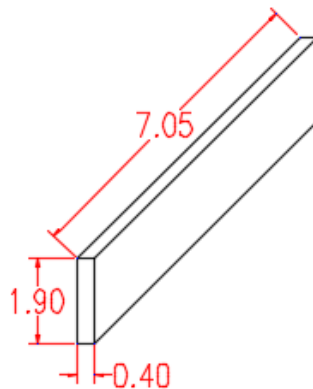
No caso de pontes em viga com o vão simplesmente biapoiado e simétricas, cada viga recebe a mesma carga. Ou seja, a parcela de carga de cada transversina distribuída para cada viga é calculada ao dividir a equação (62) por dois:

$$F_T(V1) = F_T(V2) = \frac{(h_T \cdot b_T \cdot l) \cdot \gamma_{concreto}}{2} \quad (63)$$

Assim, os valores de cargas obtidos devido às transversinas são inseridos no programa Ftool e obtêm-se, assim, os esforços em cada seção devido às mesmas.

6.2.3.1 Exemplos de Cálculos dos Esforços Devido às Transversinas para Pontes em Viga com o Vão Longitudinal Simplesmente Biapoiado e Simétrica

Figura 139 - Dimensões da transversina a ser analisada.



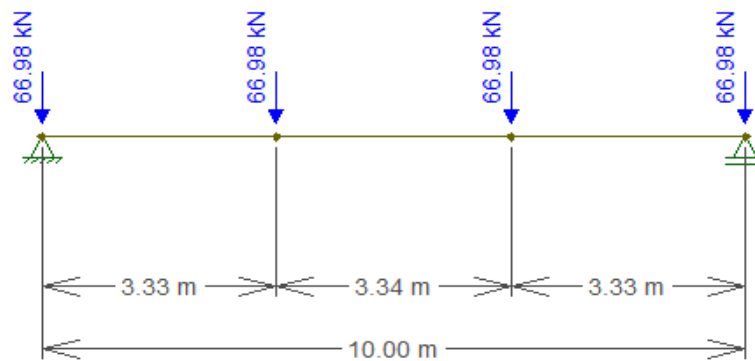
Fonte: Autoria própria

Calcula-se então a parcela de carga de cada transversina distribuída para cada viga:

$$F_T (V1) = F_T (V2) = \frac{(1.90 \text{ m} \cdot 0.40 \text{ m} \cdot 7.05 \text{ m}) \cdot 25 \text{ KN/m}^3}{2} = 66.98 \text{ KN} \quad (64)$$

O exemplo a apresentado a seguir (Figura 140) trata-se de uma ponte com as dimensões das transversinas expostos na Figura 139 e com a seção longitudinal em viga com vão de 10.00 metros simplesmente biapoiado sem balanço.

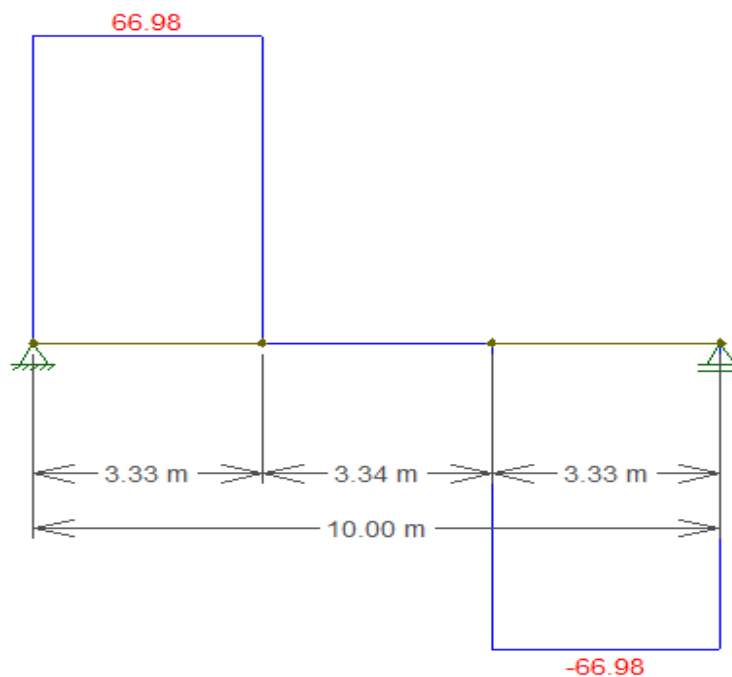
Figura 140 - Carga das transversinas posicionadas na seção longitudinal.



Fonte: Autoria própria

a) Força Cortante

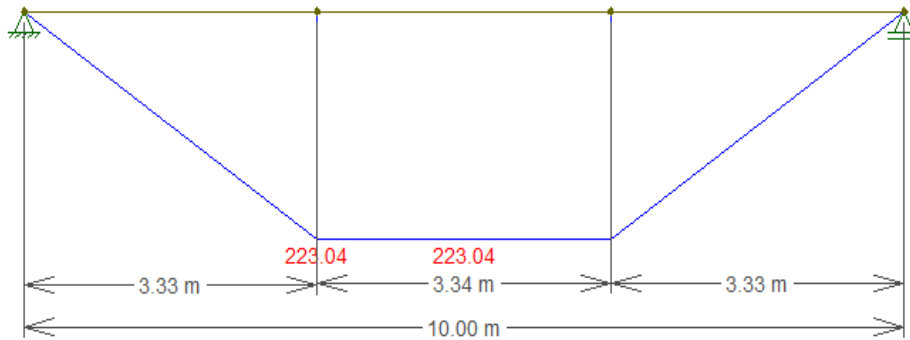
Figura 141 - Força cortante devido às transversinas.



Fonte: Autoria própria

b) Momento Fletor

Figura 142 - Momento fletor devido às transversinas.



Fonte: Autorial própria

Neste exemplo, os valores a serem inseridos nos dados de entrada da planilha de cálculo dos esforços solicitantes máximos para pontes em viga com o vão simplesmente biapoiado sem balanço seriam:

- Força cortante devido à carga permanente das transversinas (seção no apoio) = 66,98 kN
- Momento fletor devido à carga permanente das transversinas (seção no meio do vão) = 223,04 kN.m

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de planilhas interativas para a determinação das cargas permanentes e cargas móveis (trens-tipos) de pontes rodoviárias com seção transversal de duas vigas, de grelha (vigas múltiplas, entre elas: três, quatro, cinco, seis e sete vigas) e de seção celular, o que faz com que estas planilhas sejam facilitadoras de cálculo para projetos de pontes rodoviárias, visto que o processo manual para estes cálculos é bastante trabalhoso.

Foram elaboradas também mais duas planilhas que calculam os esforços solicitantes máximos. Estes esforços são determinados através das cargas já calculadas pelas outras planilhas. Estas planilhas foram elaboradas para o caso de pontes em viga com o vão longitudinal simplesmente biapoiado com e sem balanço, tornando-as, assim, uma possível ferramenta para auxiliar no dimensionamento dos elementos estruturais desses tipos de pontes rodoviárias.

Atendendo a principal motivação deste trabalho, ou seja, o fato de que não foi encontrado um software livre e gratuito no qual é possível entrar com dados referentes à seção transversal de uma ponte rodoviária de concreto armado e, com isso, obter as cargas móveis (trens-tipo) e as cargas permanentes, tem-se que a elaboração destas planilhas de cálculo podem auxiliar nas atividades acadêmicas e também fomentar uma futura implementação em outras linguagens ou fomentar um aperfeiçoamento das mesmas de forma a estudar também os esforços em todas as seções da estrutura, resultando nas respectivas envoltórias, por exemplo.

8. BIBLIOGRAFIA

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1940, NB-1 – “*Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1941, NB-2 – “*Cálculo e Execução de Pontes em Concreto Armado*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1943, NB-6 – “*Carga móvel em ponte rodoviária*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1960, NB-6 – “*Carga móvel em ponte rodoviária*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 7188 – “*Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987, NBR 7187 – “*Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido – Procedimento*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, NBR 7187 – “*Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – Procedimento*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, NBR 8681 – “*Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014, NBR 6118 – “*Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013, NBR 7188 – “*Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*”. Rio de Janeiro, RJ.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1996, “*Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais*”. Rio de Janeiro, RJ.

EL DEBS M.K.; TAKEYA, T. *“Introdução às pontes de concreto”*. Texto provisório de apoio à disciplina de pontes. SET 412. (Apostila). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.

LEONHARDT, F. *“Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto”*. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.

MARCHETTI, O. *“Pontes em Concreto Armado”*, 1ª ed. Editora Blucher, São Paulo, SP, 2008.

MARTHA, L. F. *“Análise de Estruturas: conceitos e métodos básicos”*, Elsevier Ediora, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

PFEIL, W. *“Pontes em Concreto Armado”*. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, RJ, 1983.

SANTOS, João Pedro M. Cruz. *“Análise da Carga Móvel e da Protensão na Superestrutura de Pontes Biapoiadas em Vigas Pré-moldadas Protendidas”*. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.

STUCCHI, F. R. *“Pontes e Grandes Estruturas”*. (Notas de Aula). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

STUCCHI, F. R. *“Projeto de Pontes”*. (Apostila). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

VITORIO, J. A. P. *“Pontes Rodoviárias: Fundamentos, Conservação e Gestão”*. 1ª ed. Recife, CREA-PE, 2002.