



Miguel Filipe Oliveira Saraiva

Licenciado em Engenharia Civil

**Efeitos estruturais das sobrecargas
rodoviárias definidas nas normas mais
utilizadas pela engenharia portuguesa em
tabuleiros de betão de nervura única e em
caixão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor António Lopes Batista, Professor
Associado Convidado, FCT - UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos

Vogal: Prof. Doutor António Lopes Batista



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013

“Copyright” Miguel Filipe Oliveira Saraiva, FCT / UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A conclusão da presente dissertação marca o fim de um ciclo de cinco bons anos passados na FCT/UNL e o começo de outro na minha futura vida profissional. Aproveito assim este espaço para expressar a minha gratidão e reconhecimento a todas as pessoas que me acompanharam e apoiaram nesta longa jornada:

- Ao Prof. Doutor António Lopes Batista, orientador desta tese de mestrado, por toda a disponibilidade, incentivo e empenho proporcionados e pela contribuição fundamental que prestou na realização deste estudo;
- Ao Eng^o Guilherme Gomes (TPF Planege) pela simpatia e disponibilidade manifestadas não só para esclarecer as dúvidas que surgiram na execução dos modelos de elementos finitos, mas também por complementar os meus conhecimentos inerentes a essa temática;
- Ao Eng^o João Pinho (COBA) pela revisão efetuada aos conteúdos apresentados no segundo capítulo, permitindo realizar um estudo mais correto e completo;
- A todos os meus colegas e amigos de curso, um reconhecimento pelo espírito de entreaajuda e companheirismo que se gerou entre nós, em especial ao Licínio pela sua contribuição elementar na realização desta dissertação;
- Um sincero obrigado aos meus amigos de infância e mais chegados, que sempre compreenderam as minhas ausências nas alturas de maior tensão e, por ainda assim, partilharem diversos momentos de descontração e palavras amigas quando mais precisei;
- Em último lugar mas não menos importante, deixo um apreço muito especial à minha família e à Joana por todo o apoio prestado, pela compreensão nos momentos difíceis e pelo carinho sempre dispensado nesta importante etapa da minha vida.

Resumo

As ações do tráfego rodoviário são definidas nos regulamentos de estruturas vigentes de cada país por modelos de sobrecargas. Em Portugal vigora o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), mas espera-se, num futuro próximo, adotar a norma europeia (EC1). Porém, o mercado da engenharia de pontes portuguesa está a voltar-se, maioritariamente, para os continentes africano e americano, onde vigoram outros regulamentos.

Neste contexto, surge o interesse de estudar as diferenças de efeitos que os modelos de sobrecarga dos respetivos regulamentos produzem em pontes rodoviárias. Para tal realizou-se o presente estudo, com o objetivo de fornecer, ao meio técnico nacional, resultados comparativos entre os esforços produzidos pelos modelos de sobrecarga verticais definidos nas normas mais utilizadas pela engenharia de pontes portuguesa. O estudo abrange tabuleiros de médio vão, com secção em nervura única, e tabuleiros de grande vão, constituídos por secções em caixão.

Efetuiu-se uma revisão bibliográfica relativa a quatro estudos já realizados no âmbito deste tema, com o objetivo de auxiliar o tipo de abordagem a realizar neste trabalho e enquadrar os resultados.

Além do regulamento português e do europeu, foram considerados os regulamentos sul-africano, brasileiro e norte-americano. Os modelos de sobrecargas verticais, definidos em cada uma destas normas, estão descritos no segundo capítulo do presente trabalho. Com esses modelos de sobrecargas e com a modelação em elementos finitos de seis tabuleiros com diferentes secções, efetuou-se uma análise longitudinal dos esforços. Adicionalmente realizou-se uma análise transversal dos esforços em duas dessas estruturas com secção em caixão. Os casos de estudo escolhidos são apresentados detalhadamente no quarto capítulo.

Longitudinalmente analisaram-se os máximos valores dos momentos fletores, do esforço transversal e do momento torsor produzidos nos seis tabuleiros pelos modelos de sobrecargas dos regulamentos. Os resultados obtidos, apresentados no capítulo 5, foram comparados entre si tomando como referência os valores dos esforços obtidos pelo RSA.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados da análise transversal. Foram determinados e comparados os momentos fletores máximos negativos na secção de apoio nas almas e o momento máximo positivo na laje intermédia. Os mesmos esforços, obtidos através de superfícies de influência, foram comparados com os resultados dos modelos de elementos finitos.

Termos Chave:

Regulamentos de estruturas	Tabuleiros de nervura única	Esforços máximos
Sobrecargas verticais rodoviárias	Tabuleiros em caixão	Comparação de resultados

Abstract

The actions of road traffic, reproduced as live load models, are defined by the structural regulations of each country. In Portugal, the current national code is *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes* (RSA). However, in near future, it will be replaced by Eurocode (EC1). Furthermore, the market of Portuguese bridges engineering is expanding, mostly to countries in Africa and America, which have their own regulations.

Thus, it becomes important to study the differences between the effects produced by the various live load models in road bridges. Accordingly, this work has the objective to provide the national technical community, with the comparative results between the effects produced by the vertical live load models more used by the Portuguese bridges engineering. The present study includes decks with medium spans, made of single-section rib, and large spans, consisting of box-girder sections.

Four studies, which approached a similar subject as the present work, are presented on the third chapter. The purpose is to support the process of this study and complete their results.

In addition to the Portuguese code and the Eurocode, the regulation from South-Africa and both the Brazilian and the North-American norms will be analysed and respected. The vertical live load models defined in these norms are described in the second chapter of this study. With those models and the finite element models of six decks with different sections, a longitudinal analysis was made. Furthermore, two of the decks were subjected to a transverse analysis. The study cases chosen are presented, in detail, in the fourth chapter.

Longitudinally were studied the maximum values of bending moments, shear force and torsional moment produced on the six decks, loaded with the live load models described on the regulations. The results of the longitudinal analysis, presented in the fifth chapter, were compared to the effects created by the Portuguese live load models.

The results of transverse analysis are presented in the sixth chapter. It was analyzed the sagging and the hogging bending moments on the slab and under the webs of the deck. The comparative analysis between norms was performed in the sixth chapter. The same effects were analyzed by influence surfaces and were made a comparison with the results of the finite element method.

Keywords:

Structural regulations

Single section-rib's decks

Maximum effects

Vertical roadway live loads

Box-grider's decks

Comparison results

Índice de matérias

Agradecimentos.....	I
Resumo	III
Abstract.....	V
Índice de matérias	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tabelas.....	XIII
Lista de símbolos e abreviaturas	XV
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Atualidade do tema	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Abordagens consideradas nos estudos.....	3
Capítulo 2	5
Definição das ações do tráfego rodoviário	5
2.1 Regulamentos considerados no trabalho.....	5
2.2 Regulamento português.....	6
2.3 Regulamento europeu.....	8
2.4 Regulamento norte-americano.....	15
2.5 Regulamento sul-africano	19
2.6 Regulamento brasileiro.....	22
2.7 Considerações sobre a aplicação dos regulamentos	24
Capítulo 3	25
Revisão bibliográfica no âmbito do tema	25
3.1 Considerações gerais.....	25
3.2 Segurança e ações em pontes rodoviárias – LNEC.....	26
3.3 Ação do tráfego rodoviário em pontes de betão armado – FEUP	27
3.4 Estudo comparativo entre modelos de sobrecargas rodoviárias de diferentes normas – ISEL	28
3.5 Estudo comparativo dos efeitos das sobrecargas do RSA e do Eurocódigo em tabuleiros de pontes rodoviárias – IST.....	29
3.6 Apreciação dos estudos apresentados	31
Capítulo 4	33
Escolha dos casos de estudo	33
4.1 Considerações gerais.....	33
4.2 Apresentação do caso de estudo 1	34
4.3 Apresentação do caso de estudo 2	35

4.4	Apresentação do caso de estudo 3	36
4.5	Apresentação do caso de estudo 4	38
4.6	Apresentação do caso de estudo 5	41
4.7	Apresentação do caso de estudo 6	44
Capítulo 5	47
Apresentação e discussão de resultados da análise longitudinal	47
5.1	Considerações gerais.....	47
5.2	Análise longitudinal do caso de estudo 1	48
5.3	Análise longitudinal do caso de estudo 2	52
5.4	Análise longitudinal do caso de estudo 3	56
5.5	Análise longitudinal do caso de estudo 4	60
5.6	Análise longitudinal do caso de estudo 5	64
5.7	Análise longitudinal do caso de estudo 6	68
Capítulo 6	73
Apresentação e discussão de resultados da análise transversal	73
6.1	Considerações gerais.....	73
6.2	Análise transversal do caso de estudo 3.....	74
6.3	Análise transversal do caso de estudo 6.....	83
Capítulo 7	93
Considerações finais	93
7.1	Enquadramento geral do trabalho	93
7.2	Escolha de casos de estudo para comparação de resultados	94
7.3	Resultados relevantes das análises na direção longitudinal	94
7.4	Resultados relevantes das análises na direção transversal	95
7.5	Desenvolvimentos futuros.....	96
Referências bibliográficas	97
ANEXOS	99
Anexo A1 - Esquemas dos carregamentos da análise longitudinal	A1-1
A1.1	– Caso de Estudo 1.....	A1-3
A1.2	– Caso de Estudo 2.....	A1-8
A1.3	– Caso de Estudo 3.....	A1-13
A1.4	– Caso de Estudo 4.....	A1-18
A1.5	– Caso de Estudo 5.....	A1-23
A1.6	– Caso de Estudo 6.....	A1-28
Anexo A2 - Esquemas dos carregamentos da análise transversal	A2-1
A2.1	– Caso de Estudo 3.....	A2-3
A2.2	– Caso de Estudo 6.....	A2-11

Índice de figuras

Figura 2-1 : Configuração em planta do veículo tipo do RSA	6
Figura 2-2 : Distribuição das sobrecargas linear e uniforme num tabuleiro de nervura única (RSA)	7
Figura 2-3 : Exemplo genérico da divisão de um tabuleiro em diversas vias (EC1).....	8
Figura 2-4 : Exemplo genérico do carregamento LM1 nas vias de um tabuleiro.....	10
Figura 2-5 : Disposição dos veículos em planta no caso de verificações locais (EC1)	10
Figura 2-6 : <i>Load Model 2</i>	10
Figura 2-7 : <i>Truck</i> (HS20-44) em planta e na direção longitudinal.....	16
Figura 2-8 : <i>Tandem</i> (H20-44) em planta e na direção longitudinal.....	16
Figura 2-9: Exemplo de distribuição da <i>lane load</i> na direção transversal e longitudinal de um tabuleiro de nervura única dividido em duas vias com largura w_{via} superior a 3,05 m.....	17
Figura 2-10 : Modelo <i>Truck + Lane Load</i> num vão genérico.....	17
Figura 2-11 : Modelo <i>Tandem + Lane Load</i> num vão genérico	17
Figura 2-12 : Exemplo da distribuição das cargas para cálculo do momento negativo máximo (AASHTO)	18
Figura 2-13 : Carregamento do tipo NA (1) num tabuleiro de nervura única dividido em duas vias.....	20
Figura 2-14 : Geometria do veículo do modelo <i>NB Loading</i>	21
Figura 2-15 : <i>Standard type NC-30x5x40</i>	21
Figura 2-16 : Veículos das classes 45 e 30 (ABNT).....	22
Figura 2-17 : Veículo da classe 12 (ABNT)	22
Figura 2-18 : Configuração em planta das sobrecargas na estrada e nos passeios (ABNT).....	23
Figura 4-1 : Corte longitudinal pelo eixo (caso de estudo 1)	34
Figura 4-2 : Secção transversal do tabuleiro (caso de estudo 1).....	34
Figura 4-3 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 1	34
Figura 4-4 : Corte longitudinal pelo eixo (caso de estudo 2)	35
Figura 4-5 : Secção transversal do tabuleiro (caso de estudo 2).....	35
Figura 4-6 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 2	35
Figura 4-7 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 50,00 m (caso de estudo 3)	36
Figura 4-8 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos intermédios 60,00 m (caso de estudo 3)	36
Figura 4-9 : Secção transversal a meio vão (caso de estudo 3).....	36
Figura 4-10 : Secção transversal junto ao apoio nos pilares (caso de estudo 3).....	37
Figura 4-11 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 3	37
Figura 4-12 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 80,00 m (caso de estudo 4).....	38
Figura 4-13 : Corte longitudinal pelo eixo - meio tramo central 120,00 m (caso de estudo 4)	38
Figura 4-14 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 4)	39
Figura 4-15 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 4	39

Figura 4-16 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 140,00 m (caso de estudo 5).....	41
Figura 4-17 : Corte longitudinal pelo eixo – meio tramo central 220,00 m (caso de estudo 5)	41
Figura 4-18 : Secção transversal do pilar (caso de estudo 5)	41
Figura 4-19 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 5)	42
Figura 4-20 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 5	43
Figura 4-21 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 140,00 m (caso de estudo 6).....	44
Figura 4-22 : Corte longitudinal pelo eixo – meio tramo central 220,00 m (caso de estudo 6)	44
Figura 4-23 : Secção transversal do pilar (caso de estudo 6)	44
Figura 4-24 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 6)	45
Figura 4-25 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 6	46
Figura 5-1 : Estrutura do caso de estudo 1.....	48
Figura 5-2 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos.....	49
Figura 5-3 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos.....	49
Figura 5-4 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	50
Figura 5-5 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	50
Figura 5-6 : Estrutura do caso de estudo 2.....	52
Figura 5-7 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos.....	53
Figura 5-8 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos.....	53
Figura 5-9 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	54
Figura 5-10 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	54
Figura 5-11 : Estrutura do caso de estudo 3.....	56
Figura 5-12 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos.....	57
Figura 5-13 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos.....	57
Figura 5-14 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	58
Figura 5-15 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	58
Figura 5-16 : Estrutura do caso de estudo 4.....	60
Figura 5-17 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos.....	61
Figura 5-18 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos.....	61
Figura 5-19 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	62
Figura 5-20 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	62
Figura 5-21 : Estrutura do caso de estudo 5.....	64
Figura 5-22 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos.....	65
Figura 5-23 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos.....	65
Figura 5-24 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	66
Figura 5-25 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	66
Figura 5-26 : Estrutura do caso de estudo 6.....	68

Figura 5-27 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos	69
Figura 5-28 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos	69
Figura 5-29 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos.....	70
Figura 5-30 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos.....	70
Figura 6-1 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva global.....	74
Figura 6-2 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Vista lateral.....	74
Figura 6-3 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Vista em planta da laje de plataforma	74
Figura 6-4 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva dos vãos extremos.....	75
Figura 6-5 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva dos vãos intermédios (diafragmas não representados)	75
Figura 6-6 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção de apoio com diafragma	75
Figura 6-7 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção corrente dos vãos	75
Figura 6-8 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção de apoio nos encontros	75
Figura 6-9 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S1 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3.....	77
Figura 6-10 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S2 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3.....	77
Figura 6-11 : Representação gráfica dos momentos fletores positivos em S3 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3.....	78
Figura 6-12 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S1, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.....	81
Figura 6-13 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S2, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.....	81
Figura 6-14 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S3, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.....	82
Figura 6-15 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Perspetiva global.....	83
Figura 6-16 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Vista lateral.....	83
Figura 6-17 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Vista em planta da laje de plataforma.....	83
Figura 6-18 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. <i>Edge Constraints</i> nas secções de alargamento das almas.....	84
Figura 6-19 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. <i>Edge Constraints</i> nos diafragmas	84
Figura 6-20 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Pormenor da ligação tabuleiro/pilar	85
Figura 6-21 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Discretização da secção do pilar.....	85
Figura 6-22 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção na extremidade sobre o encontro	85
Figura 6-23 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção de $\frac{1}{2}$ vão do tramo central.....	85
Figura 6-24 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção de apoio no pilar.....	85
Figura 6-25 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S1 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6.....	87

Figura 6-26 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S2 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6.....	87
Figura 6-27 : Representação gráfica dos momentos fletores positivos em S3 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6.....	88
Figura 6-28 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S1, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6.....	91
Figura 6-29 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S2, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6.....	91
Figura 6-30 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S3, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6.....	92

Índice de tabelas

Tabela 2-1 : Dimensões das rodas e pesos do veículo tipo (RSA)	6
Tabela 2-2 : Valores das sobrecargas linear e uniforme (RSA)	7
Tabela 2-3 : Número e largura das vias (EC1)	8
Tabela 2-4 : Valores característicos dos subsistemas TS e UDL	9
Tabela 2-5 : Fatores de correção α_Q e α_q em função da via i considerada (EC1)	9
Tabela 2-6 : <i>Load Model 3</i> : Veículos especiais.....	11
Tabela 2-7 : Número e largura das vias (AASHTO).....	15
Tabela 2-8 : Fator de múltipla presença da AASHTO.....	18
Tabela 2-9 : Fator de amplificação dinâmica da AASHTO	18
Tabela 2-10 : Número de vias definidas na SATCC	19
Tabela 2-11 : Valor característico do carregamento do tipo NA (1).....	20
Tabela 2-12 : Dimensões do veículo NC.....	21
Tabela 2-13 : Pesos dos veículos, cargas concentradas e cargas distribuídas (ABNT)	22
Tabela 2-14 : Características do veículo consoante a classe da ponte (ABNT)	23
Tabela 4-1 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 1	34
Tabela 4-2 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 2	35
Tabela 4-3 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 3	37
Tabela 4-4 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 4	40
Tabela 4-5 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 5	43
Tabela 4-6 : Propriedades da secção dos pilares do caso de estudo 5	43
Tabela 4-7 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 6	46
Tabela 4-8 : Propriedades da secção dos pilares do caso de estudo 6	46
Tabela 5-1 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 1	48
Tabela 5-2 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 1	49
Tabela 5-3 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 2	52
Tabela 5-4 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 2	53
Tabela 5-5 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 3	56
Tabela 5-6 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 3	57
Tabela 5-7 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 4	60
Tabela 5-8 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 4	61
Tabela 5-9 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 5	64

Tabela 5-10 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 5.....	65
Tabela 5-11 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 6.....	68
Tabela 5-12 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e a sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 6.....	69
Tabela 6-1 : Momentos fletores máximos transversais do caso de estudo 3.....	76
Tabela 6-2 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de $\frac{1}{2}$ vão, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 3.....	76
Tabela 6-3 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de apoio, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 3.....	77
Tabela 6-4 : Momentos fletores negativos em S1, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3.....	79
Tabela 6-5 : Momentos fletores negativos em S2, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3.....	80
Tabela 6-6 : Momentos fletores positivos em S3, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3.....	80
Tabela 6-7 : Momentos fletores máximos transversais do caso de estudo 6.....	86
Tabela 6-8 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de $\frac{1}{2}$ vão, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 6.....	86
Tabela 6-9 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de apoio, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 6.....	87
Tabela 6-10 : Momentos fletores negativos em S1, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6.....	89
Tabela 6-11 : Momentos fletores negativos em S2, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6.....	90
Tabela 6-12 : Momentos fletores positivos em S3, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6.....	90

Lista de símbolos e abreviaturas

a	Dimensão longitudinal da roda do veículo tipo do RSA
AASHTO	AASHTO LRFD <i>Bridge Design Specifications</i> (Regulamento norte-americano)
ABNT	ABNT NBR 7188 (Regulamento brasileiro)
b	Dimensão transversal da roda do veículo tipo do RSA
b_x	Dimensões transversais b_1, b_2 e b_3 das rodas dos veículos da ABNT
EC1	EN 1991 – 2 – 2003 (Regulamento europeu)
L	Comprimento do vão contínuo carregado
Lane Load	Subsistema definido na AASHTO constituído por cargas uniformemente distribuídas
LM1	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 1</i> definido no EC1
LM2	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 2</i> definido no EC1
LM3	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 3</i> definido no EC1
LM4	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 4</i> definido no EC1
m	Fator de múltipla presença a aplicar nos veículos da AASHTO
m_{s1}^-	Momento fletor máximo, na direção transversal, no encastramento da consola (secção S1)
m_{s2}^-	Momento fletor máximo, na direção transversal, na ligação da laje intermédia às almas (secção S2)
m_{s3}^+	Momento fletor máximo, na direção transversal, no meio vão da laje intermédia (secção S3)
M^+	Momento fletor máximo positivo na direção longitudinal
M^-	Momento fletor máximo negativo na direção longitudinal
n	Número de vias fictícias
NA (1)	Subsistema definido na SATCC constituído por cargas de faca na longitudinal
NA (2)	Subsistema definido na SATCC constituído por cargas concentradas
NA (3)	Sistema definido na SATCC constituído por um veículo com 1 eixo de 2 rodas
NB	Sistema definido na SATCC constituído por 24/36 veículos com 4 eixos de 4 rodas
NC	Sistema definido na SATCC constituído por um veículo de características especiais
p	Peso da carga uniforme distribuída definida na ABNT
Q	Peso de uma roda do VT do RSA
q_1	Peso da SL do RSA
q_2	Peso da SU do RSA

Q_{ik}	Peso de cada eixo que constitui o veículo TS do LM1 em cada via i
q_{ik}	Peso do subsistema UDL em cada via i
q_u	Peso do subsistema <i>lane load</i> definido na AASHTO em cada via fictícia
Q_a	Peso do subsistema NA (1) em cada via fictícia
RSA	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (regulamento português)
SATCC	SATCC <i>Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts</i> (regulamento sul-africano)
SL	Sobrecarga linear do RSA
SU	Sobrecarga uniforme do RSA
T	Momento torsor máximo na direção longitudinal
Tandem	Subsistema definido na AASHTO constituído por um veículo com 2 eixos de 2 rodas
Truck	Subsistema definido na AASHTO constituído por um veículo com 3 eixos de 2 rodas
TS	Subsistema definido no EC1 constituído por um veículo com 2 eixos de 2 rodas
UDL	Subsistema definido no EC1 constituído por cargas uniformemente distribuídas
V	Esforço transverso máximo na direção longitudinal
VT	Veículo tipo do RSA
w	Largura do tabuleiro entre lancis ou entre lancil e separador físico
w_E	Largura da via fictícia excedente definida no EC1
w_{fr}	Largura de cada faixa de rodagem
w_v	Largura de cada via fictícia
w_{vt}	Largura de cada via de tráfego
α_{Q1}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – TS para a primeira via fictícia
α_{Qi}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – TS para a segunda via fictícia e restantes
α_{q1}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a segunda via fictícia e restantes
α_{qi}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a segunda via fictícia e restantes
α_{qE}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a via fictícia excedente
φ	Fator de amplificação dinâmico

Capítulo 1

Introdução

1.1 Atualidade do tema

As características do tráfego rodoviário têm sofrido uma contínua evolução nas últimas décadas, verificando-se um aumento de intensidade, uma alteração do espaçamento e número de eixos dos veículos, um aumento dos seus pesos próprios e ainda um acréscimo do peso das mercadorias transportadas pelos camiões, resultante do esforço de racionalização de meios e custos por parte das empresas transportadoras. O tipo de tráfego também varia de região para região, estando associado à situação económica de cada país [CALÇADA, 2001].

Pelo carácter imprevisível e pelo elevado grau de incerteza associados ao tráfego de uma ponte, torna-se difícil simular com exatidão, através de regulamentos, as ações rodoviárias em cada obra. Por forma a contornar esse problema, os regulamentos vigentes em cada país definem modelos globais de sobrecargas, que pretendem simular a maioria das situações de tráfego a que as pontes estarão sujeitas durante o seu período de vida útil, mesmo que em certos casos o carregamento provocado por esses modelos seja demasiado penalizador.

Assim, ao longo dos anos, os regulamentos têm sido continuamente modificados por forma a tentar acompanhar a evolução do tráfego rodoviário. Em Portugal vigora, desde 1983, o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) mas já existe, no que se refere à definição das sobrecargas rodoviárias, uma versão definitiva do Eurocódigo 1 – Parte 2 (EC1). Espera-se que a curto prazo se adote o regulamento europeu em Portugal, o que acarretará, para o caso das pontes rodoviárias, uma alteração significativa no formato e na intensidade das sobrecargas, nomeadamente no que respeita ao peso dos veículos. Por este motivo justifica-se a realização de estudos comparativos, em termos de esforços, das sobrecargas do RSA e do EC1, por forma a informar o meio técnico nacional relativamente ao impacto que a utilização corrente do EC1 trará.

Acresce ainda que a engenharia de pontes portuguesa, no período atual de diminuição significativa de trabalho no país, se está a voltar para outros mercados, no sentido de rentabilizar toda a experiência acumulada, nas últimas 4 décadas, do intenso trabalho de projeto e construção. Esses mercados localizam-se predominantemente em África e na América do Sul. No Norte de África é considerada, habitualmente, a regulamentação europeia, mas nos países anglófonos da África Austral adota-se a regulamentação da república sul-africana, ao passo que em Angola e Moçambique consideram-se, muitas vezes, os regulamentos portugueses. Na América do Sul são correntemente utilizados os regulamentos norte-americanos, mas no Brasil existem normas específicas para o projeto de obras rodoviárias.

Nestas condições decidiu-se considerar, neste estudo comparativo, para além do RSA e do EC1, a norma sul-africana (SATCC), a regulamentação norte-americana (AASHTO) e o regulamento brasileiro (ABNT).

1.2 Objetivos do trabalho

O pré-dimensionamento, que corresponde à definição das formas e dimensões dos elementos estruturais, constitui uma fase muito importante no desenvolvimento de um projeto, nomeadamente no caso das pontes. O tempo dispendido numa escolha criteriosa das soluções estruturais reflete-se, na fase de projeto de execução, em importantes economias de construção e um adequado funcionamento das obras. Contudo, só através da rotina e da experiência se consegue aprimorar a rentabilidade que deriva de um bom pré-dimensionamento.

No caso das pontes, o pré-dimensionamento consiste na definição do número e comprimento dos vãos e na geometria e dimensões dos elementos estruturais. A experiência de projeto e construção de pontes rodoviárias, por parte da engenharia portuguesa, tem como referência os modelos de sobrecarga definidos no RSA, pelo que o meio técnico nacional está acostumado ao pré-dimensionamento de pontes tendo como referência os esforços que resultam da consideração das sobrecargas do regulamento português.

Prevê-se que o EC1 entre em vigor, em Portugal, nos próximos anos. Esta alteração poderá obrigar ao ajuste da definição da geometria de pontes rodoviárias a que os engenheiros portugueses estão habituados. O aumento do peso dos veículos e a alteração do formato de carregamento dos tabuleiros que o EC1 trará, irá provocar, em muitos casos, um agravamento dos esforços. Considerando ainda a necessidade da engenharia de pontes portuguesa se estar a voltar para mercados estrangeiros, é de esperar que também os regulamentos vigentes noutros países considerem modelos de sobrecarga de formato e intensidade diferentes dos definidos no RSA, acarretando uma variação dos valores dos esforços e, eventualmente, da geometria das secções.

Por estas razões torna-se importante estudar a relação entre os efeitos provocados pelos modelos dos diferentes regulamentos e o RSA, não só em termos de valores máximos mas também percentuais. Assim, o principal objetivo desta dissertação é a determinação da relação entre os esforços máximos longitudinais e transversais produzidos pelos modelos de sobrecargas verticais, definidos nos vários regulamentos, em pontes rodoviárias. Este estudo comparativo abrange tabuleiros de médio vão, com secção de nervura única, e ainda de grande vão, com secção em caixa.

Com essa comparação de efeitos pretende-se fornecer indicações que permitam identificar quais os regulamentos que levam à obtenção de esforços mais gravosos em tabuleiros de secção mais comum, dentro de uma gama de vãos previamente escolhida.

Na direção transversal os esforços podem ser obtidos através da realização de um modelo tridimensional em elementos finitos, o que exige um grande esforço da criação da malha de cálculo, ou por métodos mais expeditos, como é o caso das superfícies de influência, cuja utilização permite determinar os esforços no tabuleiro de uma forma aproximada. Por essa razão interessa estudar se a diferença de valores entre esses dois métodos é muito elevada e em que circunstâncias a utilização das superfícies de influência pode ser proveitosa.

É também objetivo deste trabalho apresentar e sintetizar os modelos de sobrecargas que os cinco regulamentos referidos consideram para o dimensionamento das pontes, sendo tal apresentado no capítulo 2.

A publicação do EC1 tem suscitado, no caso das pontes, a realização de estudos comparativos com o RSA. Da bibliografia conhecida são apresentados, sucintamente, no terceiro capítulo, os resultados relevantes de três dissertações de mestrado que tiveram como objetivo comum comparar os efeitos produzidos pelos modelos de sobrecargas rodoviárias definidos no RSA e no EC1. Pretende-se com esse capítulo apresentar os estudos já realizados no âmbito desse tema e disponibilizar as conclusões de cada autor, no sentido de enquadrar as conclusões obtidas no presente estudo.

1.3 Abordagens consideradas nos estudos

O estudo comparativo dos efeitos produzidos pelos modelos de sobrecarga definidos nos cinco regulamentos mencionados assentará na análise de seis casos de estudo, correspondentes a seis tabuleiros cujo dimensionamento se baseou em algumas estruturas projetadas e construídas pela engenharia de pontes portuguesa. Os dois primeiros casos de estudo consistem em duas obras com dois vãos de 25,00 m e secção com nervura única, variando apenas na largura do tabuleiro. As restantes quatro obras, com secção em caixão unicelular, têm vãos de maiores dimensões. Do terceiro ao quinto caso de estudo o comprimento dos vãos aumenta mas a largura do tabuleiro mantém-se constante. No sexto caso analisa-se uma obra com vãos idênticos aos do quinto caso de estudo, mas considerando um tabuleiro de maior largura.

A variação das características geométricas que se verifica de caso de estudo para caso de estudo permite compreender a influência que a largura do tabuleiro e o comprimento dos vãos têm nos esforços finais. Espera-se que os modelos de sobrecarga constituídos por cargas distribuídas tenham maior influência nos esforços finais de tabuleiros mais largos e com maiores vãos, enquanto que os sistemas compostos por forças concentradas sejam os condicionantes em tabuleiros mais estreitos e de menores vãos.

Para comparar os efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias verticais definidas nos diversos regulamentos, determinaram-se os esforços máximos na direção longitudinal e na direção transversal. Para a análise longitudinal desenvolveram-se modelos de elementos finitos constituídos por elementos de barra. Recorrendo a esses modelos, calcularam-se os momentos fletores máximos, o esforço transversal máximo e o momento torsor máximo que ocorrem nas seis estruturas analisadas. Para tal efetuou-se uma alternância de sobrecargas tendo em conta a linha de influência do esforço analisado.

A análise transversal foi realizada apenas para os terceiro e sexto casos de estudo, por corresponderem às pontes que apresentam maior diferença na largura do tabuleiro. Desta análise pretendeu-se obter os momentos fletores máximos no apoio de laje nas almas e a meio vão da laje intermédia, com auxílio de modelos tridimensionais de elementos finitos. Os resultados obtidos da análise desses modelos foram posteriormente comparados com os esforços calculados, simplificadamente, através de superfícies de influência.

Sendo o RSA a norma de referência nacional, em ambas as análises a comparação de valores tomou como referência os esforços obtidos pelo regulamento português, tornando-se assim mais perceptíveis as diferenças percentuais entre os efeitos produzidos pelos modelos de sobrecarga correspondentes a cada regulamento.

De todas as ações do tráfego a que as pontes estão sujeitas, são as sobrecargas rodoviárias verticais que condicionam o dimensionamento dos tabuleiros, sendo essa a razão deste estudo se debruçar apenas neste tipo de carregamentos. Assim o termo sobrecarga empregue ao longo do presente estudo refere-se apenas às sobrecargas rodoviárias que têm direção vertical, ficando fora do âmbito deste trabalho todas as outras ações do tráfego.

O presente trabalho foi realizado em simultâneo com um outro muito similar, mas considerando os efeitos das sobrecargas rodoviárias em tabuleiros vigados [CRUZ, 2013]. Como muita da pesquisa foi realizada em conjunto, os capítulos referentes à definição das ações do tráfego rodoviário (Capítulo 2) e à revisão bibliográfica no âmbito do tema (Capítulo 3) têm uma abordagem similar.

Capítulo 2

Definição das ações do tráfego rodoviário

2.1 Regulamentos considerados no trabalho

As ações do tráfego rodoviário em pontes são definidas pelos regulamentos de estruturas em vigor em cada país. Cada regulamento estabelece um ou mais modelos de sobrecarga com a finalidade de simular os efeitos reais causados pelo tráfego rodoviário. Tais modelos, quando aplicados na estrutura, tendem a reproduzir as distribuições dos máximos ou mínimos efeitos resultantes da resposta estrutural sob solicitação das ações do tráfego rodoviário durante o seu período de vida útil [MASCARENHAS, 1978].

Os modelos de sobrecarga, ou sistemas de sobrecarga, podem ser compostos por diferentes tipos de carregamento. Em geral são compostos por um sistema de cargas concentradas ou por um sistema dividido em dois subsistemas aplicados em simultâneo, um de cargas concentradas e outro de cargas distribuídas. Cada norma define a disposição das cargas, a sua intensidade e as condições de aplicação.

Além dos esforços estáticos gerados pelas ações verticais, é necessário ter em conta os efeitos dinâmicos que essas ações produzem na estrutura. Porém, de modo a evitar uma análise dinâmica, os modelos de sobrecarga especificados na maioria dos regulamentos são modelos estáticos cujos valores característicos das cargas incluem os efeitos dinâmicos. Caso esses efeitos não estejam implícitos nos modelos, é comum os regulamentos especificarem a aplicação de coeficientes de amplificação dinâmicos.

No âmbito desta dissertação serão considerados cinco regulamentos onde a engenharia de pontes portuguesa tenha ou possa vir a ter intervenção no projeto e construção de novas pontes. Esses regulamentos são os seguintes:

- RSA: Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (regulamento português) [RSA, 1983];
- EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes (regulamento europeu) [EC1, 2003];
- AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (regulamento norte-americano) [AASHTO, 2007];
- SATCC *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts* (regulamento sul-africano) [SATCC, 2001];
- ABNT NBR 7188 (regulamento brasileiro) [NBR, 1982].

No presente capítulo apresentam-se as sobrecargas rodoviárias verticais definidas nestes cinco regulamentos.

2.2 RSA (regulamento português)

2.2.1 Generalidades

O Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) foi aprovado em Portugal em 1983. Revogou as antigas normas portuguesas, nomeadamente o Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP) e o Regulamento de Pontes Metálicas (RPM), introduzindo profundas alterações nos critérios gerais de verificação de segurança nos diversos tipos de estruturas e materiais [PIPA, 2009].

O RSA divide-se em duas partes distintas. A primeira parte define os critérios gerais de segurança e na segunda quantificam-se as ações, incluindo os sismos.

No Artigo 41.º do capítulo IX são definidas as sobrecargas rodoviárias através de dois modelos de carga distintos e de atuação separada, o veículo tipo e as sobrecargas linear e uniforme.

As pontes podem ser classificadas como sendo de Classe I ou Classe II, dependendo do tipo de tráfego a que estão sujeitas. No âmbito deste trabalho as pontes em estudo serão de Classe I, o que corresponde a um tráfego intenso ou pesado.

2.2.2 Veículo Tipo

O veículo tipo é formado por 3 eixos, cada um de duas rodas, com a disposição e as dimensões ilustradas na figura 2-1. O veículo deverá ser colocado em qualquer posição da faixa de rodagem, com o seu eixo paralelo ao eixo do tabuleiro. No caso de existir um separador físico entre as faixas de rodagem, devem ser considerados dois veículos, um em cada faixa.

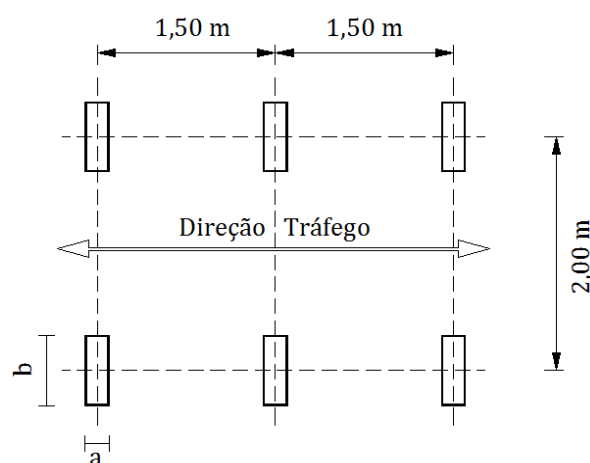


Figura 2-1 : Configuração em planta do veículo tipo do RSA

Cada roda do veículo tipo transmite uma carga vertical Q ao pavimento, através de uma superfície retangular de dimensões $a \times b$ (Figura 2-1 e tabela 2-1).

Tabela 2-1 : Dimensões das rodas e pesos do veículo tipo (RSA)

Classe da Ponte	Q [kN]	a [m]	b [m]
Classe I	100,0	0,20	0,60
Classe II	50,0	0,20	0,40

Transversalmente, o veículo deverá ocupar a posição mais desfavorável para o esforço a analisar nas faixas de rodagem e bermas. A roda do veículo poderá, no limite, ficar encostada ao lancil.

2.2.3 Sobrecargas linear e uniforme

Este modelo de sobrecarga é composto por uma carga linear (q_1), distribuída na direção transversal, e ainda por uma carga uniformemente distribuída (q_2) nas direções longitudinal e transversal do tabuleiro.

Estas sobrecargas atuam simultaneamente e na largura do tabuleiro, composto pelas faixas de rodagem e bermas. A tabela 2-2 fornece os valores das sobrecargas referidas:

Tabela 2-2 : Valores das sobrecargas linear e uniforme (RSA)

Classe da Ponte	q_1 [kN/m]	q_2 [kN/m ²]
Classe I	50,0	4,0
Classe II	30,0	3,0

A distribuição destas sobrecargas, num tabuleiro de uma ponte de Classe I, toma a configuração, para uma largura w entre lancis ou perfis de segurança, representada na figura 2-2:

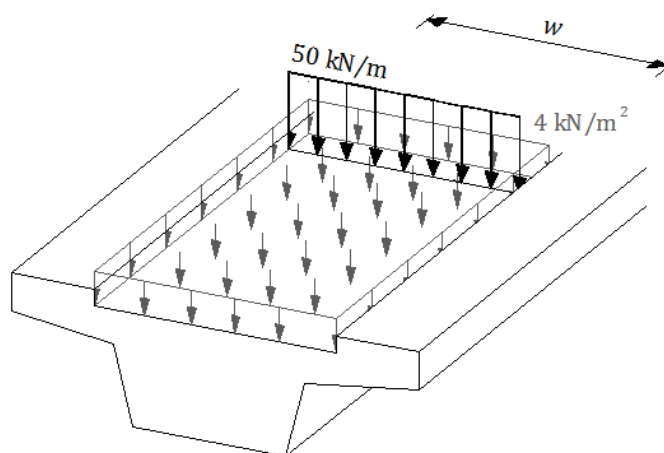


Figura 2-2 : Distribuição das sobrecargas linear e uniforme num tabuleiro de nervura única (RSA)

Os dois modelos de sobrecarga deverão ser considerados tanto numa análise longitudinal como numa análise transversal. Para efeitos de dimensionamento, deverá ser considerado o modelo de sobrecarga que provoque os esforços mais elevados.

2.3 EN 1991 – 2 – 2003 (regulamento europeu)

2.3.1 Generalidades

Em 1990 o CEN (Comité Europeu de Normalização) iniciou a elaboração dos Eurocódigos Estruturais com o objetivo de servirem de referência para os estados membros da União Europeia. Pretendia-se com a nova regulamentação comprovar a conformidade das obras já realizadas, bem como garantir os principais requisitos estruturais de resistência mecânica, estabilidade e segurança. Em Portugal ainda não foi publicado nenhum Decreto-Lei, até à data, que os coloque em vigor, apesar de já terem sido elaborados diversos Anexos Nacionais de aplicação [PIPA, 2009].

Os Eurocódigos são compostos por vários documentos, ou partes, e pelos respetivos Anexos Nacionais. As ações do tráfego rodoviário em pontes estão descritas no Eurocódigo 1 - Parte 2 (EC1). Neste documento são definidas as ações em pontes rodoviárias, ferroviárias e pedonais. No âmbito deste estudo será apenas considerado o conteúdo da sua secção 4.3, relativa a ações verticais em pontes rodoviárias.

2.3.2 Número de vias

Na norma europeia, bem como em muitas outras normas, está previsto que se proceda à divisão das zonas de circulação da ponte em diversas *notional lanes*, ou vias fictícias (doravante usar-se-á a designação de vias). O número de vias é determinado consoante a largura entre lancis ou barreiras físicas (w), de acordo com a tabela 2-3:

Tabela 2-3 : Número e largura das vias (EC1)

Largura entre lancis - w [m]	Número de vias - n	Largura das vias - w_v [m]	Largura excedente - w_E [m]
$w < 5,40$	$n = 1$	3,00	$w - 3,00$
$5,40 \leq w < 6,00$	$n = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6,00 \leq w$	$n = \text{int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3,00	$w - 3n$

Note-se que as vias referidas nesta secção e nos subcapítulos posteriores são fictícias, servem apenas para efeitos de dimensionamento, pelo que não devem ser confundidas com as vias de tráfego assinaladas nas estradas. Deve referir-se que, caso exista algum separador físico entre as faixas de rodagem, a largura w a considerar será a distância entre o lancil e o separador físico.

Na figura 2-3 representa-se um exemplo genérico da divisão de um tabuleiro em diversas vias.

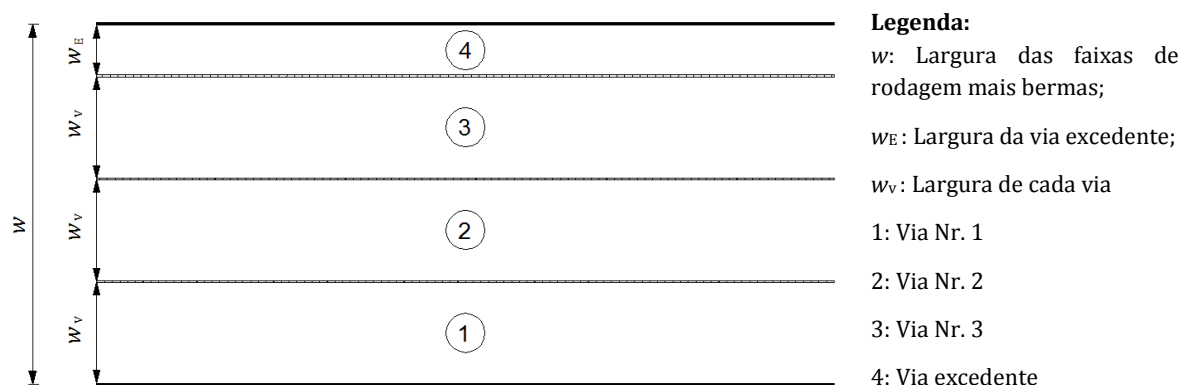


Figura 2-3 : Exemplo genérico da divisão de um tabuleiro em diversas vias (EC1)

2.3.3 Modelos de sobrecarga

O Eurocódigo 1 – Parte 2 (Secção 4.3) define quatro modelos de sobrecarga para as ações verticais devidas ao tráfego rodoviário. O modelo a considerar será aquele que produzir efeitos mais desfavoráveis na estrutura.

2.3.3.1 – *Load Model 1* (LM1)

Este modelo de sobrecarga abrange a maioria dos efeitos causados pelo tráfego comum (carros e camiões). É o sistema de sobrecarga aconselhado para efetuar uma análise global e local dos esforços.

O modelo consiste na aplicação de uma carga uniformemente distribuída na área de cada via (subsistema UDL) juntamente com um veículo de dois eixos colocado no centro da via (subsistema TS). Na tabela 2-4 apresentam-se os valores que cada um destes carregamentos pode assumir.

Tabela 2-4 : Valores característicos dos subsistemas TS e UDL

Número da via i	Subsistema TS	Subsistema UDL
	Peso de um eixo Q_{ik} [kN]	q_{ik} [kN/m ²]
Via 1	300,0	9,0
Via 2	200,0	2,5
Via 3	100,0	2,5
Outras vias	0	2,5
Via excedente	0	2,5

Em cada roda deverá ser considerada uma superfície de contacto com o pavimento de 0,40 m x 0,40 m, e o valor destas cargas deverá ser multiplicado por fatores de correção (α_Q e α_q), que têm em conta o tipo de ponte em análise bem como a sua influência do tráfego da região, o número médio de veículos por ano, etc. Os valores desses fatores variam de país para país, estando definidos nos respetivos Anexos Nacionais. No caso de Portugal, o Anexo Nacional não foi homologado até à data mas sugere-se que se adotem os fatores que constam na tabela 2-5 [NP-EC1, 2012].

Tabela 2-5 : Fatores de correção α_Q e α_q em função da via i considerada (EC1)

Classificação da Ponte	α_{Q1}	α_{Qi} ($i \geq 2$)	α_{q1}	α_{qi} ($i \geq 2$)	α_{qE}
Classe I	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Classe II	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0

Classe I: Pontes inseridas em itinerários onde se prevê que grande parte do tráfego total de veículos pesados seja tráfego industrial internacional.

Classe II: Pontes inseridas em itinerários com características de tráfego mais corrente, incluindo estradas e autoestradas.

As pontes que serão objeto de análise deste trabalho serão consideradas como sendo de Classe II.

Assim, o primeiro modelo de sobrecarga (LM1) consiste no carregamento simultâneo de um veículo (TS) e uma carga uniformemente distribuída (UDL) em cada via do tabuleiro. A figura 2-4 pretende ilustrar um exemplo da divisão da área de um tabuleiro em 3 vias e a posição a considerar para os veículos.

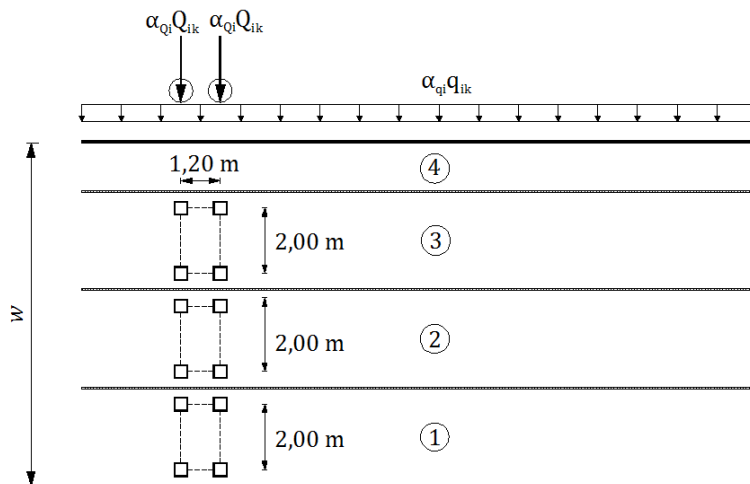


Figura 2-4 : Exemplo genérico do carregamento LM1 nas vias de um tabuleiro

Os veículos devem ocupar a posição transversal mais desfavorável na respetiva via. No caso de duas vias adjacentes, os respetivos veículos terão de estar afastados no mínimo 50 cm, como se ilustra na figura 2-5.

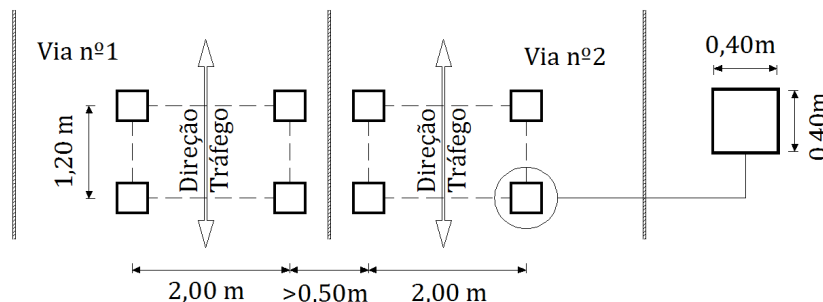


Figura 2-5 : Disposição dos veículos em planta no caso de verificações locais (EC1)

2.3.3.2 – Load Model 2 (LM2)

O segundo modelo de carga definido no EC1 consiste na aplicação de um único eixo de duas rodas em qualquer zona das faixas de rodagem e bermas. Este carregamento pretende simular os efeitos dinâmicos locais de um tráfego normal em pequenos tabuleiros (3,00 a 7,00 m de largura).

A carga do eixo é de 400 kN no total. Tal como no *Load Model 1*, esta carga deve ser afetada por um fator de correção β_Q , que toma o mesmo valor de α_{Q1} .

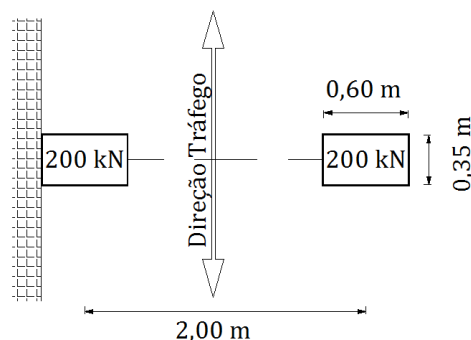


Figura 2-6 : Load Model 2

Na vizinhança de juntas de dilatação (a uma distância D em metros) deverá ser aplicado um fator de amplificação dinâmica φ definido pela seguinte expressão:

$$\varphi = 1,30 \left(1 - \frac{D}{26} \right) \geq 1$$

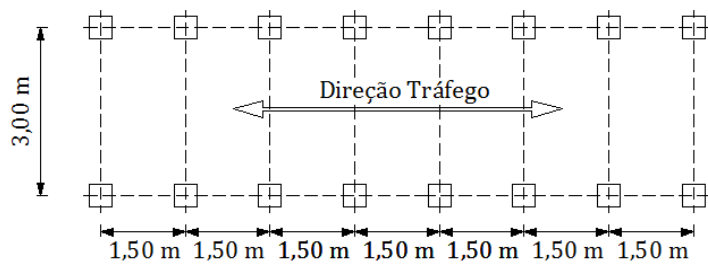
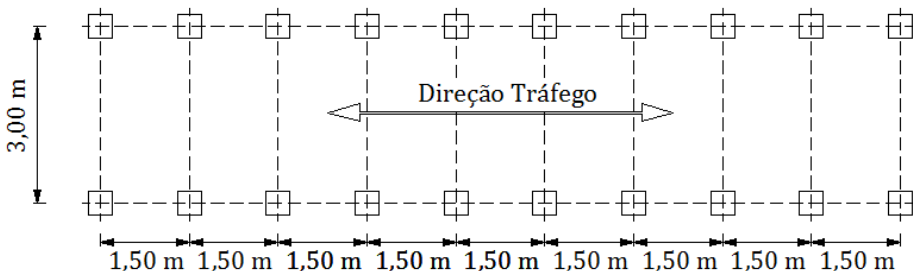
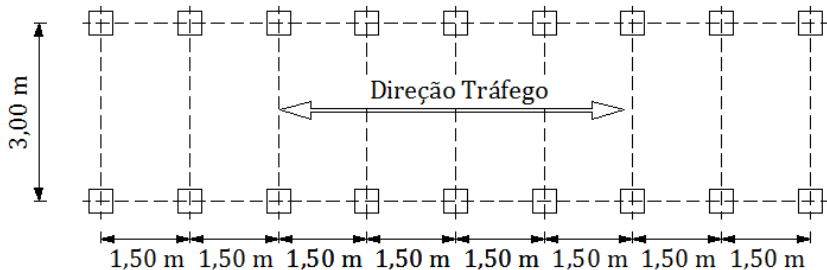
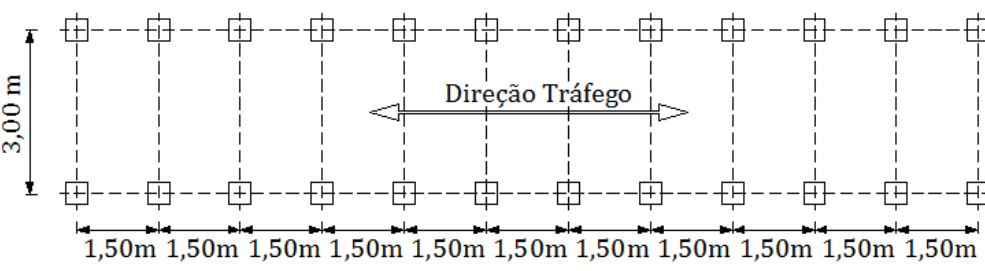
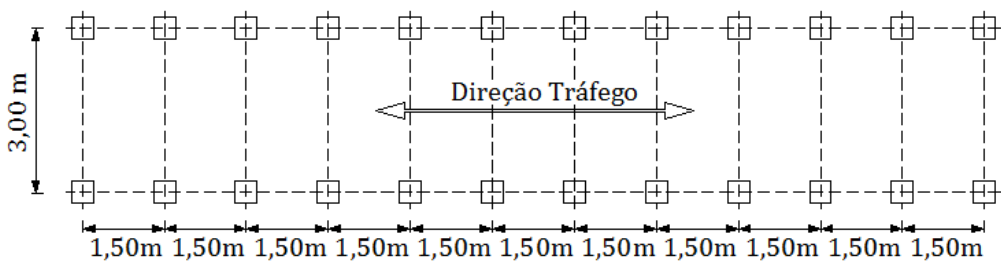
Os tabuleiros dos casos de estudo da presente dissertação não apresentam juntas intermédias, razão pela qual o fator de amplificação dinâmica φ não será tido em conta.

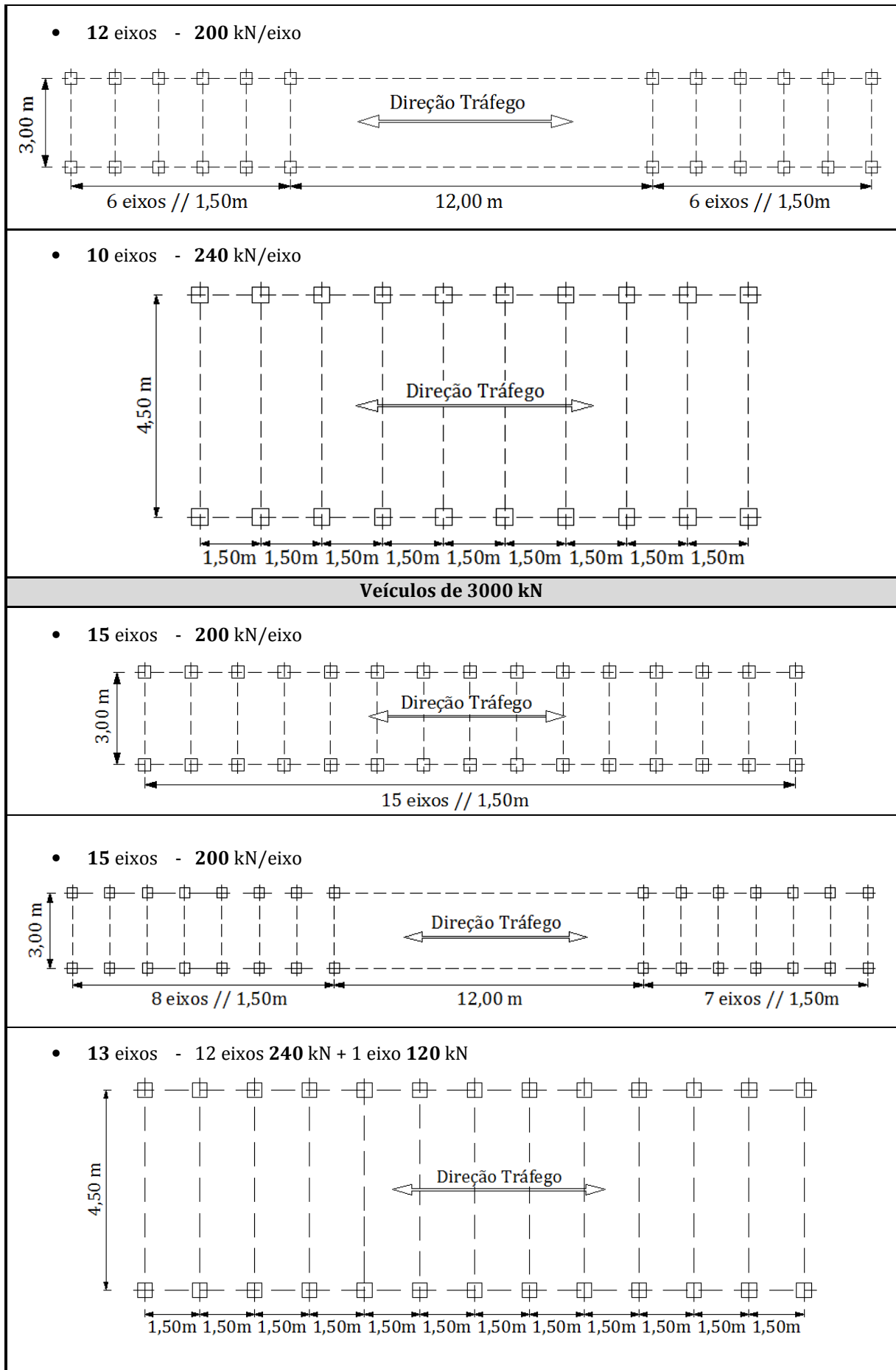
2.3.3.3 – *Load Model 3* (LM3)

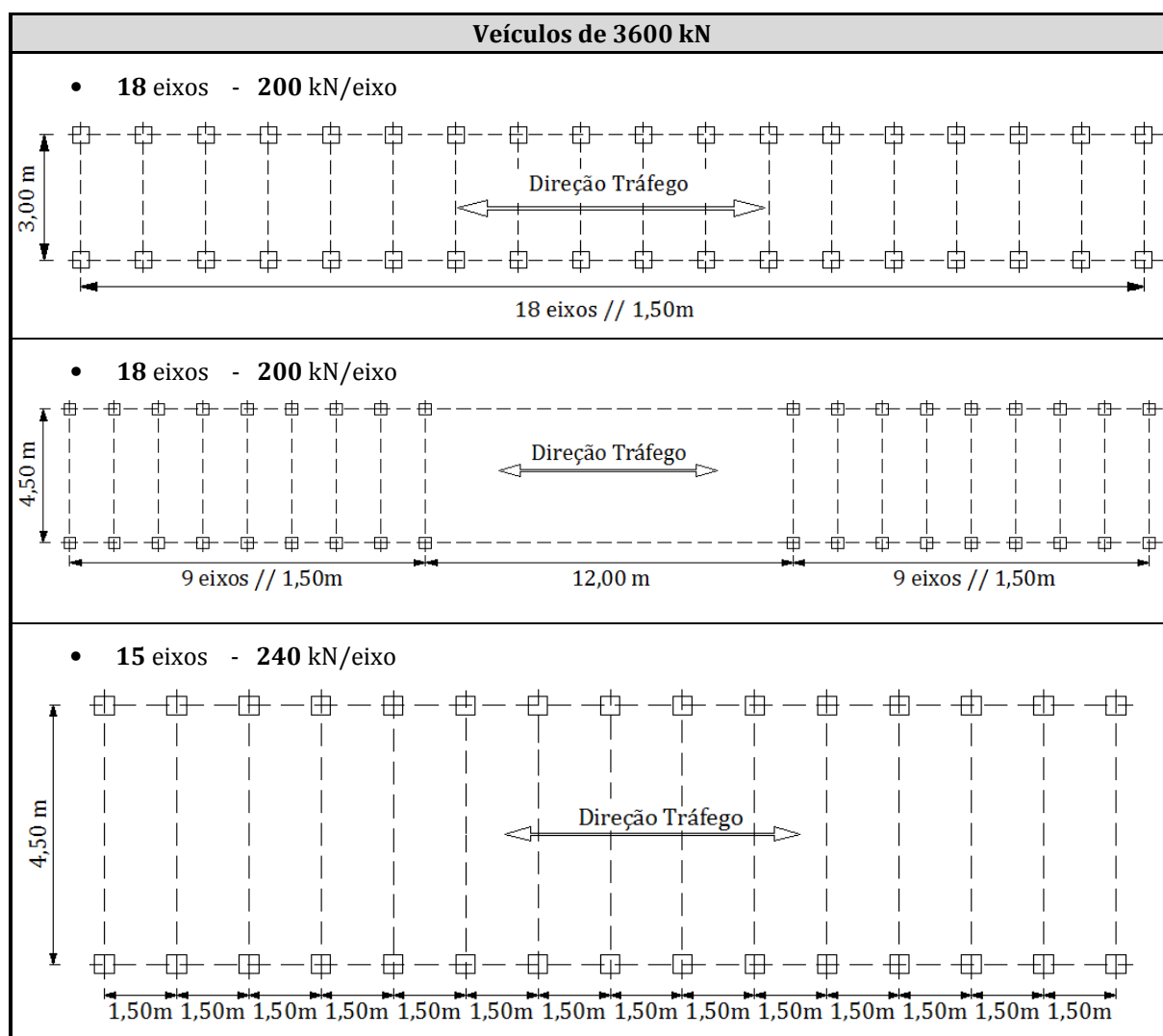
O terceiro modelo de sobrecarga abrange um diversificado conjunto de veículos considerados especiais, que circulam apenas em condições de tráfego controlado pelas autoridades. No anexo A do EC 1-2 estão definidos os veículos especiais que têm entre 4 a 15 eixos e pesos entre 600 kN e 3600 kN inclusive (Tabela 2-6).

Tabela 2-6 : *Load Model 3*: Veículos especiais

Veículo de 600 kN	
<p>4 eixos</p> <p>150 kN/eixo</p>	
Veículo de 900 kN	
<p>6 eixos</p> <p>150 kN/eixo</p>	
Veículos de 1200 kN	
<p>6 eixos</p> <p>200 kN/eixo</p>	
<p>8 eixos</p> <p>150 kN/eixo</p>	

Veículos de 1500 kN	
<p>8 eixos</p> <p>7 eixos 200 kN + 1 eixo 100 kN</p>	
<p>10 eixos</p> <p>150 kN/eixo</p>	
Veículos de 1800 kN	
<p>9 eixos</p> <p>200 kN/eixo</p>	
<p>12 eixos</p> <p>150 kN/eixo</p>	
Veículos de 2400 kN	
<ul style="list-style-type: none"> • 12 eixos - 200 kN/eixo 	
	





Estes veículos apresentam pesos muito superiores aos dos veículos que geralmente circulam nas estradas. Em situação de projeto é o Dono de Obra que decide o tipo de veículo a considerar, consoante o tipo de ponte e o tráfego a que estará sujeita.

Um dos últimos casos em que se considerou este modelo de sobrecarga em Portugal foi na ponte da Lezíria, sobre o rio Tejo, que serve a autoestrada A10 entre o Carregado e Benavente. O concessionário desta infraestrutura, a Brisa, definiu que deveria ser considerado um veículo de 1800 kN com rodas afastadas transversalmente de 3,00 m, tendo sido estabelecido um caminho de rodagem por forma a que não fosse condicionante do dimensionamento.

Atendendo às suas características específicas, no âmbito deste estudo não será considerado este modelo de sobrecarga.

2.3.3.4 - *Load Model 4* (LM4)

O último modelo de sobrecarga referido no EC1 pretende representar um conjunto de automóveis a transitar na ponte, provocando não só ações verticais como também vibrações na ponte. Estes efeitos podem ser modelados por uma carga uniformemente distribuída, de valor igual a 5,0 kN/m², em qualquer zona do tabuleiro (inclui a amplificação causada pelos efeitos dinâmicos).

Este modelo deve ser usado para verificações gerais, em situações transitórias de projeto, e é relevante apenas para pontes localizadas em cidades ou na sua periferia. Só deve ser utilizado caso não se aplique o *Load Model 1* ou este não seja condicionante. Por estas razões não será considerado no presente trabalho.

2.4 AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (regulamento norte-americano)

2.4.1 Generalidades

A AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) é a entidade responsável pelo estabelecimento de normas, especificações e protocolos usados no projeto de estradas nos Estados Unidos da América. Para projeto de pontes desenvolveu uma especificação que utiliza a metodologia do *Load and Resistance Factor Design* (LRFD), denominada *Bridge Design Specifications* [MILLER, 2007].

Por se tratar de uma norma americana, as unidades de cálculo são as do sistema em vigor nesse país (*ft, kip, klf*). Contudo, para comparar os resultados obtidos pelas diferentes normas, converteram-se as unidades de força e comprimento em *kilonewtons* e metros, respetivamente.

2.4.2 Número de vias

Tal como no regulamento europeu, está previsto que se proceda a uma divisão da plataforma em diversas vias fictícias.

Na maioria dos casos o número de vias corresponde à parte inteira de $w/3,66$, onde w representa a largura da estrada, entre lancis ou entre perfis de segurança (excluindo separador central). Quando a largura w se situa entre 6,10 m e 7,32 m, consideram-se duas vias com largura igual a metade da estrada. Se a largura das vias de tráfego for inferior a 3,66 m, o número de vias fictícias deverá ser igual ao número de vias de tráfego.

Tabela 2-7 : Número e largura das vias (AASHTO)

Largura entre lancis - w , ou largura das vias de tráfego - w_{vt}	Número de vias - n	Largura da via - w_v
$w_{vt} < 3,66$ m	$n =$ número vias de tráfego	w_{vt}
$6,10$ m $< w < 7,32$ m	$n = 2$	$\frac{w}{2}$
$w \notin]6,10$ m ; $7,32$ m[$n = \text{Int} \left(\frac{w}{3,66} \right)$	$\frac{w}{\text{Int} \left(\frac{w}{3,66} \right)}$

2.4.3 Modelos de sobrecarga

O regulamento AASHTO específico para pontes propõe um modelo de sobrecarga denominado HL-93 (Highway Loading, developed in 1993) que consiste na consideração de três tipos de veículos, sendo dois tipos de camiões individuais (H20-44 e HS20-44) e um aglomerado de pequenos camiões (H15) muito próximos entre si.

O modelo de sobrecarga HL-93 pretende representar um conjunto de cargas que produzam um efeito semelhante aos efeitos gerados pelos veículos ilegais que transportam cargas acima das regulamentadas.

2.4.3.1 -*Truck* (HS20-44)

O *Truck* HS20-44 consiste num veículo constituído por 6 rodas (3 eixos) com afastamento transversal de 1,83 m. Longitudinalmente, dois dos eixos estão afastados entre si 4,27 m e o restante apresenta um afastamento variável entre 4,27 m e 9,14 m. Os eixos traseiros pesam 142,3 kN cada, enquanto que o eixo dianteiro pesa 35,6 kN. As rodas, constituídas por um ou mais pneus devem ser consideradas como um retângulo de 50,80 cm por 25,40 cm, com a maior dimensão na direção transversal.

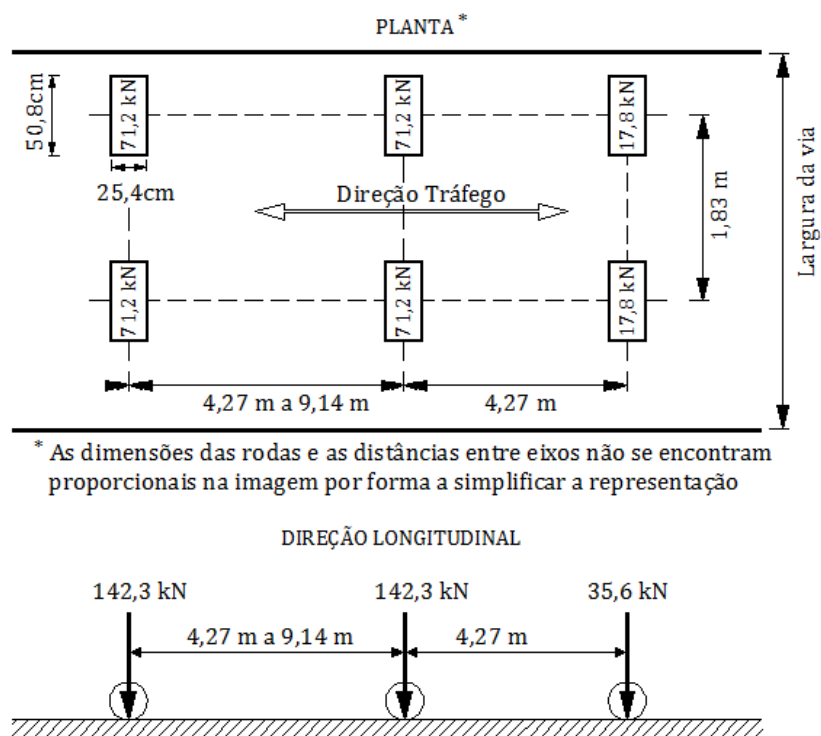


Figura 2-7 : *Truck* (HS20-44) em planta e na direção longitudinal

2.4.3.2 – *Tandem* (H20-44)

O *Tandem* H20-44 é um veículo de 4 rodas (2 eixos) com afastamento longitudinal de 1,22 m e transversal de 1,83 m. Cada eixo tem um peso de 111,2 kN (55,6 kN por roda). Tal como o *Truck*, as rodas devem ser consideradas retangulares e com dimensões de 50,80 cm por 25,40 cm.

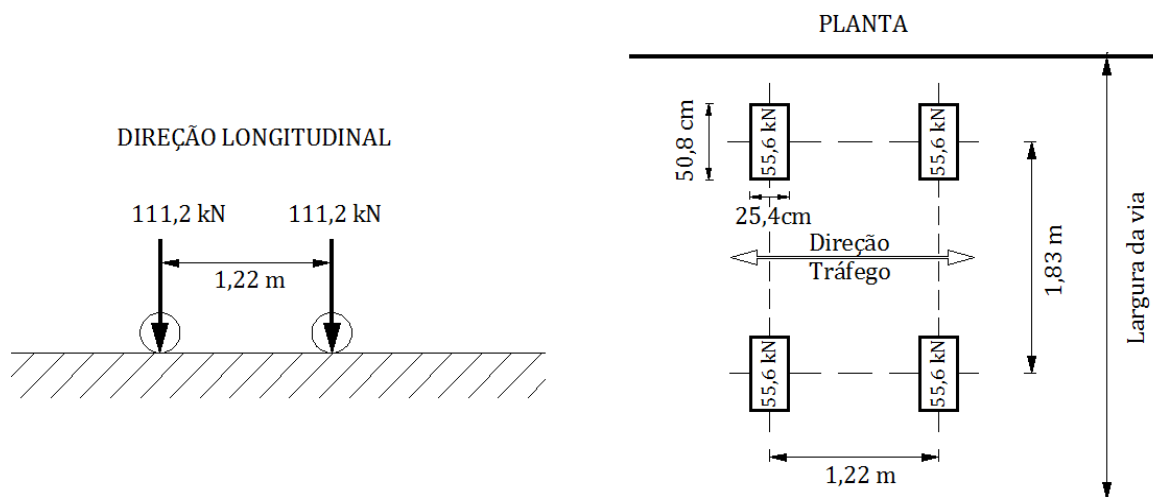


Figura 2-8 : *Tandem* (H20-44) em planta e na direção longitudinal

2.4.3.3 – *Lane Load* (q_u)

Este carregamento representa as ações induzidas pelo tráfego de um conjunto de camiões do tipo H15 (veículos com 15 toneladas) pouco afastados. Trata-se de uma carga uniformemente distribuída de 9,3 kN/m na direção longitudinal, por via. Na direção transversal distribui-se numa largura máxima de 3,05 m em cada via. Desta forma a sobrecarga uniforme toma um valor distribuído na área do tabuleiro de 3,1 kN/m² até uma largura máxima de 3,05 m por via.

A figura 2-9 ilustra um exemplo da distribuição da sobrecarga uniforme num tabuleiro de nervura única dividido em duas vias.

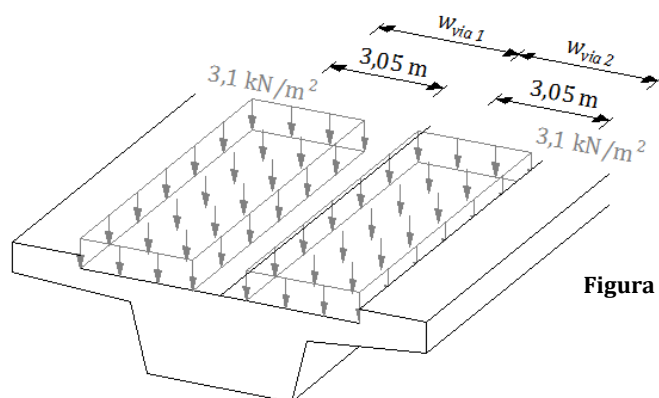


Figura 2-9: Exemplo de distribuição da *lane load* na direção transversal e longitudinal de um tabuleiro de nervura única dividido em duas vias com largura w_{via} superior a 3,05 m

2.4.4 Sobrecargas a considerar

O modelo de sobrecarga HL-93 a considerar corresponde ao que provocar os maiores esforços entre as combinações *Truck + Lane Load* e *Tandem + Lane Load*. Assim, na direção longitudinal, os modelos de carga em cada vão e por cada via apresentam as configurações representadas nas figuras 2-10 e 2-11.

- *Truck + Lane Load*

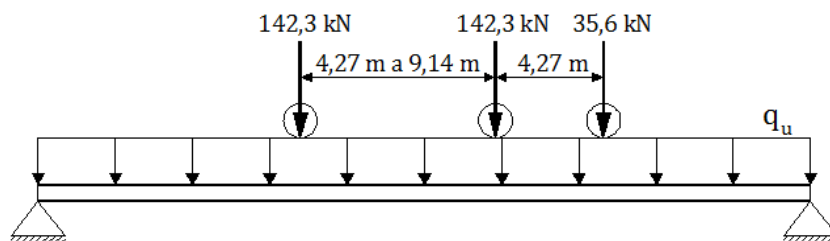


Figura 2-10 : Modelo *Truck + Lane Load* num vão genérico

- *Tandem + Lane Load*:

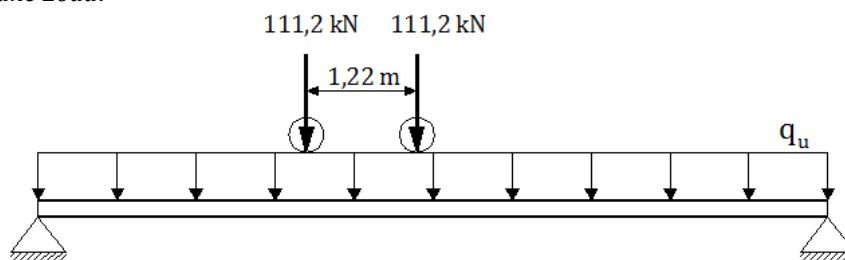


Figura 2-11 : Modelo *Tandem + Lane Load* num vão genérico

Numa análise longitudinal, para determinar os máximos momentos positivos no vão considera-se a sobrecarga uniforme q_u e apenas um veículo (*Tandem* ou *Truck*) colocado na posição mais gravosa do vão. Contudo, o regulamento define que no cálculo dos momentos fletores negativos máximos devem considerar-se apenas 90% dos esforços causados pela atuação simultânea da carga uniformemente distribuída q_u e de dois veículos *Truck HS20-44*, colocados entre os pontos de inflexão das linhas de influência. O afastamento longitudinal entre o eixo traseiro e o eixo dianteiro dos camiões deverá tomar um valor igual ou superior a 15,24 m e a distância entre os eixos deverá ser de 4,27 m.

Na figura 2-12 apresenta-se um exemplo da distribuição de cargas para calcular o momento fletor negativo no 2º apoio de uma ponte com 3 vãos.

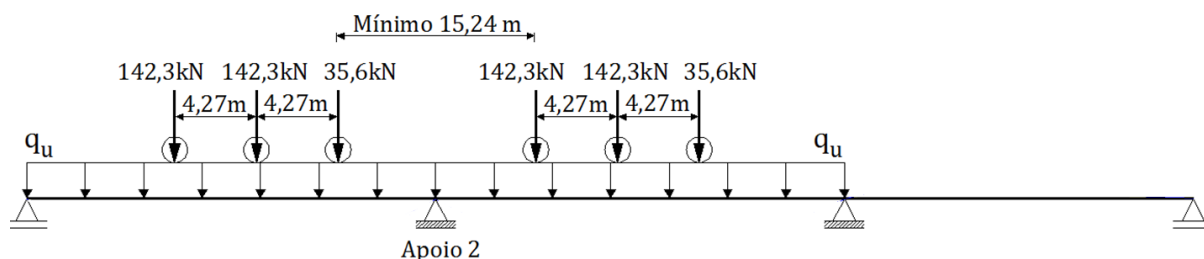


Figura 2-12 : Exemplo da distribuição das cargas para cálculo do momento negativo máximo (AASHTO)

Numa análise transversal, a sobrecarga uniforme deve ser distribuída em cada via de maneira a produzir os efeitos mais gravosos do esforço a analisar. O veículo é colocado a uma distância mínima de 30 cm entre o eixo da roda e a extremidade do passeio ou a 60 cm da via adjacente.

Tanto na direção longitudinal como na transversal, a parcela que provoque uma redução das solicitações deve ser ignorada.

2.4.5 Fator de múltipla presença

Para ter em conta a ação simultânea de vários veículos, os efeitos das sobrecargas deverão ser multiplicados por uma fator de múltipla presença. Esse fator depende do número de vias carregadas e toma os valores que constam na tabela 2-8.

Tabela 2-8 : Fator de múltipla presença da AASHTO

Número de vias carregadas	Fator de múltipla presença - m
1	$m = 1,20$
2	$m = 1,00$
3	$m = 0,85$
>3	$m = 0,65$

Note-se que este fator de múltipla presença não deve ser aplicado à carga uniformemente distribuída *Lane Load*, mas sim apenas aos veículos.

2.4.6 Fator de amplificação dinâmica

As cargas inerentes aos veículos *Tandem* e *Truck* devem ser multiplicados por um fator de amplificação dinâmica (φ), de modo a ter em conta, de forma simplificada, os correspondentes efeitos dinâmicos (Tabela 2-9).

Tabela 2-9 : Fator de amplificação dinâmica da AASHTO

Características	Fator dinâmico - φ
Tabuleiros simplesmente apoiados: <ul style="list-style-type: none"> • Todos os estados limites 	$\varphi = 1,75$
Para outros casos: <ul style="list-style-type: none"> • Estado limite de fadiga ou fratura • Restantes estados limites 	$\varphi = 1,15$ $\varphi = 1,33$

Apesar de não serem considerados estados limites de verificação de segurança neste estudo, considerou-se o fator dinâmico de $\varphi=1,33$ por ser o que se ajusta melhor ao tipo de análise pretendida. Note-se que este fator de amplificação dinâmica não deve ser aplicado à *Lane Load*.

2.5 SATCC Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts (regulamento sul-africano)

2.5.1 Generalidades

A SATCC (*Southern Africa Transport and Communications Commission*) é a entidade responsável pelos transportes e vias de comunicação da África do Sul. Com o objetivo de melhorar a eficiência do sistema de transporte rodoviário e melhorar a qualidade de serviço em todos os países pertencentes à SADC (*Southern Africa Development Community*), foi desenvolvida uma especificação referente à conceção de estruturas rodoviárias denominado por *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*, homologado em 1999 [JONES, 2002].

2.5.2 Número de vias

Cada faixa de rodagem deve ser dividida em vias fictícias para, posteriormente, se proceder ao seu carregamento com os modelos de sobrecarga indicados na norma. Essa divisão é efetuada de acordo com a tabela 2-10. Note-se que a largura de cada faixa de rodagem (w_{fr}) corresponde à largura de circulação de estrada em conjunto com a largura das bermas, retirando-se o separador para efeitos de cálculo.

Tabela 2-10 : Número de vias definidas na SATCC

Largura das faixas de rodagem - w_{fr}	Número de vias - n
$w_{fr} \leq 4,80$ m	$n = \text{Int} \left(\frac{w_{fr}}{3} \right)$
$4,80 \text{ m} < w_{fr} \leq 7,40$ m	$n = 2$
$7,40 \text{ m} < w_{fr} \leq 11,10$ m	$n = 3$
$11,10 \text{ m} < w_{fr} \leq 14,80$ m	$n = 4$
$14,80 \text{ m} < w_{fr} \leq 18,50$ m	$n = 5$
$18,50 \text{ m} < w_{fr} \leq 22,00$ m	$n = 6$

Para os casos em que $w_{fr} > 4,80$ m, a largura transversal de cada via deve estar compreendida entre 2,40 m e 3,70 m inclusivé. Essa largura deverá ser igual em todas as vias adotadas e de maneira a que o tabuleiro seja dividido no menor número possível de vias.

2.5.3 Modelos de sobrecarga

A SATCC define três modelos de sobrecarga rodoviária distintos, nomeadamente:

- *Normal Loading* (NA)
- *Abnormal Loading* (NB)
- *Super Loading* (NC)

Cada um deste tipo de sobrecargas deve de ser considerado de forma independente. O modelo que produzir os efeitos mais gravosos deverá ser o modelo a considerar para o dimensionamento da estrutura.

2.5.3.1 – *NA Loading*

Representa o tráfego normal numa ponte ou viaduto. A estrutura deverá ser dimensionada de modo a resistir aos efeitos máximos causados pela combinação de (1) com (2) ou apenas de (3):

- (1) Este carregamento pretende simular um conjunto de veículos ligeiros a circular longitudinalmente na ponte. Consideram-se duas cargas uniformemente distribuídas afastadas 1,90 m, paralelas e de valor igual, no sentido do eixo de cada via. Cada carga tem um valor $Q_a/2$, onde Q_a varia conforme o comprimento contínuo carregado (L).

Tabela 2-11 : Valor característico do carregamento do tipo NA (1)

Comprimento contínuo carregado - L [m] *	Q_a [kN/m]
$L < 36$	36
$L \geq 36$	$\frac{180}{\sqrt{L}} + 6$

* $L = L_{\text{vãos carregados consecutivos}} \times n$

Deverá ser considerado este tipo de carregamento em cada via do tabuleiro.

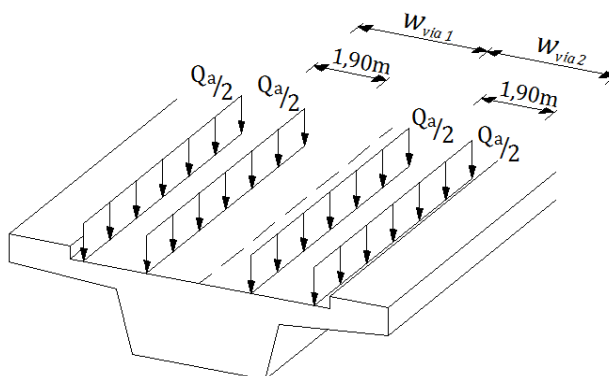


Figura 2-13 : Carregamento do tipo NA (1) num tabuleiro de nervura única dividido em duas vias

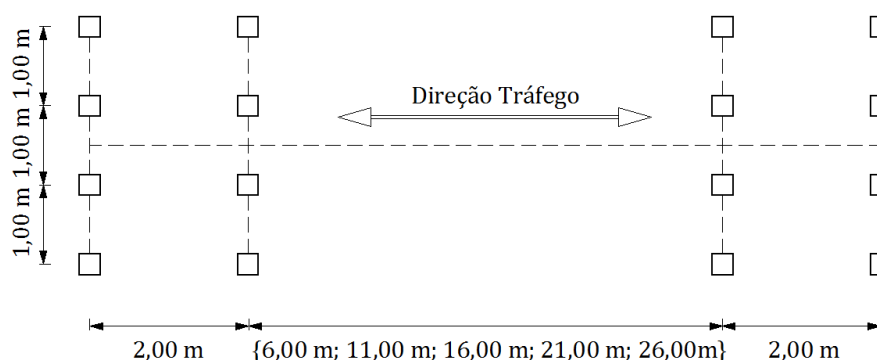
- (2) Carregamento constituído apenas por um eixo na direção transversal de cargas concentradas afastadas de 1,90m. O eixo do veículo apresenta um valor de $\frac{144}{\sqrt{n}}$ kN por via, onde n é a sequência do número da via carregada ($n=1$ para a primeira via carregada com o eixo do veículo, $n=2$ para a segunda via, etc.).
- (3) Duas rodas com 100 kN cada, com um afastamento não inferior a 1,00 m e uma área de contacto (circular ou quadrada) de 0,10 m², localizadas em qualquer sítio e em qualquer direção da estrada e bermas.

Contudo, caso o tabuleiro seja muito estreito, com uma largura w_{fr} inferior a 3,00 m, os carregamentos pontuais (2) e (3) não deverão ser considerados.

Transversalmente, o carregamento (1) pode ocupar qualquer posição da via, estando limitado a uma distância mínima à face do lancil de 0,25 m. A sobrecarga (2) coincide transversalmente com a carga (1), não sendo permitido considerar uma distância inferior a 0,50 m entre veículos de vias adjacentes.

2.5.3.2 - NB Loading

Este modelo de sobrecarga pretende simular a circulação de veículos pesados especiais. O veículo é composto por quatro eixos de quatro rodas cada. O afastamento entre os eixos das extremidades e os interiores são de 2,00 m enquanto que a distância entre eixos interiores é variável, tomando os valores de 6,00 m, 11,00 m, 16,00 m, 21,00 m ou 26,00 m. Esta distância entre eixos deverá ser tal que provoque os efeitos mais gravosos na estrutura. Cada roda pesa 2,5 kN, o que perfaz 10,0 kN por eixo.


Figura 2-14 : Geometria do veículo do modelo NB Loading

Deverão ser aplicados dois tipos diferentes de veículos conforme o tipo de obra. Em tabuleiros mais estreitos aplica-se o *NB Loading 24* e em tabuleiros mais largos considera-se o *NB Loading 36*.

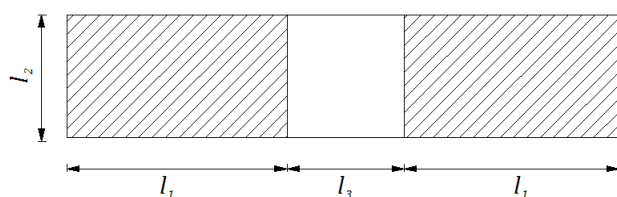
- *NB Loading 24*: consiste num veículo com 240 kN por eixo (60 kN por roda). A superfície de contacto do pneu com o pavimento é definida por um círculo de 0,28 m de diâmetro ou um quadrado com 0,25 m de lado. Neste estudo, será considerado este veículo em tabuleiros com largura inferior a 15,00 m;
- *NB Loading 36*: consideram-se 360 kN em cada eixo (90 kN por roda). A área efetiva de contacto é definida por um círculo de 0,34 m de diâmetro ou um quadrado com 0,30 m de lado. No presente trabalho, este tipo de carregamento será considerado para os casos de estudo cujos tabuleiros tenham uma largura de 15,00 m ou superior.

O veículo, transversalmente, pode ocupar qualquer posição do tabuleiro até a uma distância mínima de 0,60 m do passeio. Nos casos em que o passeio tenha uma largura inferior a 0,60 m, o veículo é colocado a uma distância até 0,15 m.

2.5.3.3 – NC Loading

O último sistema de sobrecarga proposto pelo regulamento sul-africano abrange os carregamentos produzidos pelas várias combinações de rodas de um reboque com suspensão hidráulica e destinado a transportar cargas muito pesadas (*Standard Type NC-30 x 5 x 40*).

Deve ser considerada uma carga uniformemente distribuída de 30 kN/m² em toda a área a sombreado da figura 2-15.


**Figura 2-15 : Standard type NC-30x5x40
(Carregamento distribuído de 30 kN/m²)**
Tabela 2-12 : Dimensões do veículo NC

Parâmetro	Dimensões
l_1	{5,00; 10,00; 15,00; 20,00} m
l_2	{3,00; 4,00; 5,00;} m
l_3	{0; 5,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00} m

A determinação das áreas carregadas é efetuada através da definição dos valores dos parâmetros l_1 , l_2 e l_3 . Esses parâmetros deverão ser escolhidos por forma a que o carregamento produza os efeitos mais gravosos na estrutura, podendo tomar os valores indicados na tabela 2-12.

Contudo, os parâmetros l_1 , l_2 e l_3 dependem do tipo de ponte e das condições do tráfego a que esta estará sujeita, ficando a sua definição a cargo do concessionário da infraestrutura. Por estas razões não será considerado este veículo nos casos de estudo do presente trabalho.

2.6 ABNT NBR 7188 (regulamento brasileiro)

2.6.1 Generalidades

Fundada em 1940, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) tem a função de elaborar todas as normas técnicas brasileiras. A norma específica para a definição das ações do tráfego rodoviário corresponde à ABNT NBR 7188, de 1970, tendo sido posteriormente atualizada em 1982, 1987 e 2003. A sigla NBR representa o carácter voluntário do regulamento, não sendo por isso obrigatório utilizá-lo [CAVALCANTI, 2004].

2.6.2 Classes das pontes

O regulamento destina-se ao dimensionamento de pontes rodoviárias e pedestres. No que se refere às pontes rodoviárias, estas dividem-se em três classes:

- Classe 45: base do sistema é um veículo de 450,0 kN de peso total;
- Classe 30: base do sistema é um veículo de 300,0 kN de peso total;
- Classe 12: base do sistema é um veículo de 120,0 kN de peso total.

Para efeitos de cálculo, as pontes dos casos de estudo serão consideradas da classe 45, por proporcionar os efeitos mais gravosos.

2.6.3 Modelos de sobrecarga

Os modelos de sobrecarga consistem no carregamento de um veículo tipo, simulado por forças concentradas, e uma carga uniformemente distribuída em toda a área do tabuleiro e do passeio, representando o tráfego intenso que pode ocorrer na ponte. Estes carregamentos tomam os valores que constam na tabela 2-13.

Tabela 2-13 : Pesos dos veículos, cargas concentradas e cargas distribuídas (ABNT)

Classe da Ponte	Veículo [kN]	Carga uniforme distribuída
		p [kN/m ²]
Classe 45	450,0	5,0
Classe 30	300,0	5,0
Classe 12	120,0	4,0

O veículo é orientado na direção do tráfego, sempre na posição mais desfavorável para o esforço que está a ser analisado, não sendo considerada a parte do carregamento que provoque a redução das solicitações. O veículo ocupa uma área retangular de 6,00×3,00 m², independentemente da sua classe.

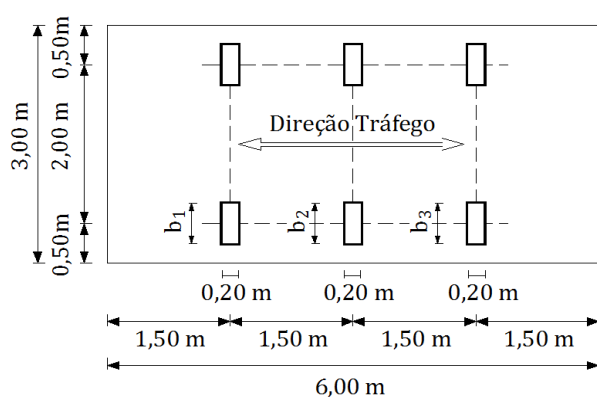


Figura 2-16 : Veículos das classes 45 e 30 (ABNT)

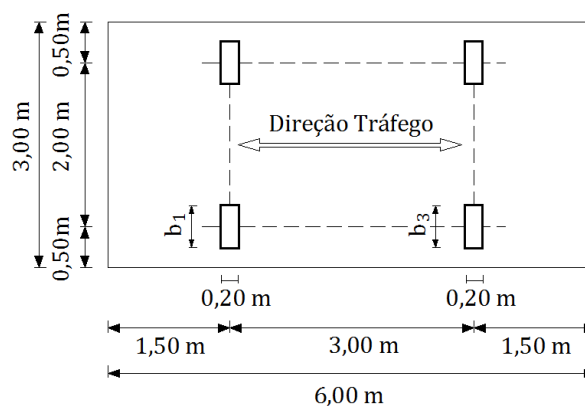


Figura 2-17 : Veículo da classe 12 (ABNT)

A área ocupada pelo veículo é um retângulo fictício de 3,00 por 6,00 m, como ilustram as figuras 2-16 e 2-17. O veículo a considerar em pontes de classes 45 e 30 é constituído por 3 eixos, enquanto que nas pontes de classe 12 o veículo possui 2 eixos. A tabela 2-14 fornece os dados relativos ao veículo, consoante a classe da ponte.

Tabela 2-14 : Características do veículo consoante a classe da ponte (ABNT)

Características	Unid.	Classe 45	Classe 30	Classe 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN	450,0	300,0	120,0
Peso total de cada roda dianteira	kN	75,0	50,0	20,0
Peso total de cada roda traseira	kN	75,0	50,0	40,0
Peso total de cada roda intermédia	kN	75,0	50,0	-
Largura de contacto b_1 das rodas dianteiras	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contacto b_3 das rodas traseiras	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contacto b_2 das rodas intermédias	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contacto de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Áreas de contacto de cada roda	m ²	$0,20 \times b_x$	$0,20 \times b_x$	$0,20 \times b_x$
Distância longitudinal entre eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância transversal entre eixos	m	2,00	2,00	2,00

Os valores b_1 , b_2 e b_3 referem-se às figuras 2-16 e 2-17.

A sobrecarga uniforme p atua em toda a área da estrada e de passeios, descontando a área correspondente ao veículo. A figura 2-18 ilustra a distribuição em planta da carga p no tabuleiro.

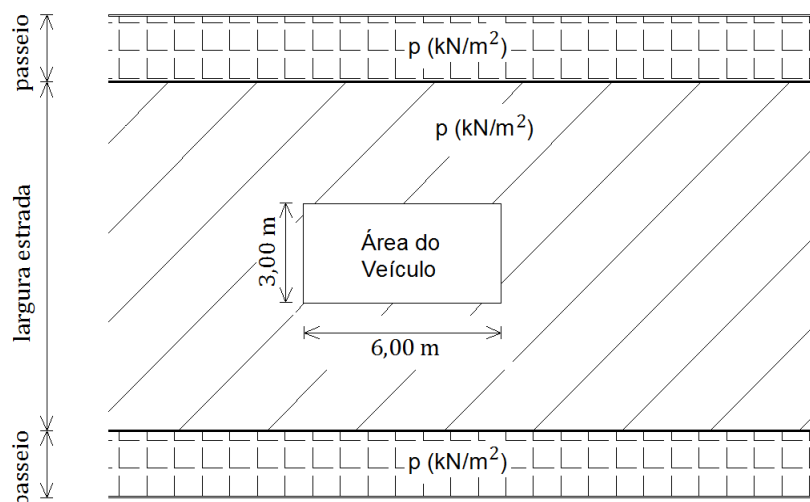


Figura 2-18 : Configuração em planta das sobrecargas na estrada e nos passeios (ABNT)

2.6.4 Fator de amplificação dinâmica

A carga distribuída e o veículo devem ser multiplicados por um fator de amplificação dinâmica (φ), que varia com o vão carregado.

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot L \geq 1$$

Caso o menor vão seja igual ou superior a 70% do maior vão, pode-se considerar um vão ideal equivalente à média aritmética dos vãos. Este fator não é considerado na carga distribuída p aplicada nos passeios.

2.7 Considerações sobre a aplicação dos regulamentos

Os cinco regulamentos abordados definem modelos de sobrecargas com algumas semelhanças entre si. O veículo do RSA tem geometria igual aos veículos de classes 30 e 45 da ABNT, apesar das suas cargas serem de valor diferente, e a SATCC, o EC1 e a AASHTO consideram também uma divisão do tabuleiro em diversas vias fictícias, onde são aplicados sistemas de cargas concentradas ou distribuídas. O EC1 e a SATCC são as únicas normas que consideram veículos de carácter especial e veículos ligeiros específicos para a análise dos efeitos locais.

A consideração dos efeitos dinâmicos também segue abordagens semelhantes entre as normas, considerado através de um fator de amplificação dinâmica na AASHTO e na ABNT, ou estando implícito nos valores característicos das sobrecargas, como é o caso do RSA e da SATCC. O EC1 considera uma metodologia intermédia, em que os efeitos dinâmicos estão implícitos nos valores das cargas dos modelos, ou através de um fator dinâmico aplicado ao *Load Model 2*. Contudo, o tipo de aplicação dos modelos é diferente de regulamento para regulamento, sendo mais direto no RSA e na ABNT, e mais aprofundado no EC1, na SATCC e na AASHTO.

A ABNT considera apenas um sistema de sobrecargas, constituído por um veículo e uma sobrecarga uniforme, que atua em todo o tabuleiro exceto na área ocupada pelo veículo. É um modelo de fácil aplicação, mas pouco específico para a análise de efeitos locais. O RSA apresenta a vantagem de definir dois modelos de sobrecargas diferentes, um mais direcionado para o tráfego de obras pequenas e efeitos locais, e outro para obras grandes.

O EC1, a SATCC e a AASHTO, por serem normas mais recentes, definem os modelos de sobrecargas rodoviárias de uma forma mais completa, para permitir ajustar os modelos de sobrecargas ao tráfego real. A norma norte-americana define dois modelos de sobrecarga que se adaptam a diferentes tipos de tráfego. Porém, a consideração dos fatores dinâmicos e de múltipla presença torna-se confusa, dado que são aplicados só em determinadas circunstâncias e apenas aos valores característicos dos veículos. Também o processo de divisão do tabuleiro, em vias fictícias, é pouco claro, podendo levar a erros de aplicação.

Ao contrário dos restantes regulamentos, a norma sul-africana não considera sobrecargas de superfície em todo o tabuleiro, definindo apenas sobrecargas lineares e concentradas. Considera modelos muito diversificados, o que permite efetuar análises dos efeitos globais e locais das estruturas. No entanto, as intensidades das sobrecargas variam de via para via e com o comprimento contínuo carregado, o que poderá induzir em erro durante a aplicação dos modelos.

No EC1, o sistema de divisão do tabuleiro em diferentes vias é muito direto, indicando a largura e o número de vias a adotar consoante a largura do tabuleiro. Dependendo do tipo de tráfego, são atribuídos diferentes fatores de correção aos valores característicos dos veículos. Desta forma, e através dos diferentes modelos de sobrecarga definidos, o EC1 abrange a generalidade das características do tráfego rodoviário. Porém, torna-se confuso considerar diferentes intensidades da sobrecarga distribuída e dos veículos, de via para via.

Em suma, o RSA e a ABNT definem modelos simples e de aplicação direta mas são modelos pouco ajustáveis aos diferentes tipos de tráfego rodoviário que podem ocorrer nas estruturas. A SATCC e a AASHTO são mais abrangentes, mas apresentam um processo de definição e aplicação dos modelos mais difícil, podendo gerar erros na sua utilização. Os modelos do EC1 permitem definir sobrecargas que caracterizam melhor os diversos tipos de tráfego, através de um método de aplicação simples e direto. Por esta razão, o regulamento europeu aparenta ser a norma mais interessante para caracterizar as ações do tráfego rodoviário.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica no âmbito do tema

3.1 Considerações gerais

A evolução das características do tráfego rodoviário, verificada nas últimas décadas, levou à necessidade de reformular os regulamentos específicos para o dimensionamento obras rodoviárias. Em Portugal evoluir-se-á, do RSA para o EC1, nos próximos anos. Essa alteração de normas vigentes motivou a realização de diversos estudos, nomeadamente no que respeita a obras rodoviárias, por forma a antecipar ao meio técnico nacional as modificações que advêm dessa mudança de regulamentos.

Na pesquisa bibliográfica efetuada foram identificados quatro estudos comparativos dos efeitos induzidos pelos modelos de sobrecargas rodoviárias de diversos regulamentos, nomeadamente entre o RSA e o EC1. Três desses estudos, realizados entre 2008 e 2013 [FREITAS, 2008; ALVES, 2012; ROBALO, 2013], tiveram como objetivo comum comparar os esforços gerados pelos modelos de sobrecargas do EC1 e do RSA em tabuleiros de vão e largura variável. Considera-se ainda um estudo realizado no LNEC [MASCARENHAS, 1978], que apesar de comparar regulamentos que não se encontram atualmente em vigor, apresenta conclusões importantes acerca das características dos modelos de sobrecargas rodoviárias e as suas influências nos efeitos induzidos nos tabuleiros.

Com o presente capítulo pretende-se efetuar uma revisão dos estudos já realizados no âmbito do tema, de modo a auxiliar no tipo de abordagem a realizar neste trabalho e a enquadrar as suas conclusões.

3.2 Segurança e ações em pontes rodoviárias – LNEC (1978)

3.2.1 Âmbito do estudo

No sentido de apoiar a elaboração das propostas de revisão dos regulamentos então em vigor, em outubro de 1978 foi publicado um relatório pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), da autoria do Eng^o Artur Mascarenhas, como parte de um conjunto de trabalhos preparatórios para a elaboração do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), em 1983, por parte da comissão de revisão dos regulamentos técnicos do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (MOPTC).

Pretendia-se com este estudo obter uma panorâmica global das metodologias de caracterização das ações de tráfego em outros regulamentos europeus e realizar uma análise comparativa das solicitações e esforços inerentes a esses regulamentos.

O relatório inicia-se com uma alusão aos estados limites últimos e de utilização e uma descrição dos principais problemas na caracterização das ações verticais e na determinação dos respetivos efeitos. Após efetuar uma extensa análise dos diferentes modelos de sobrecarga definidos em cada um dos cinco regulamentos estudados (português, inglês, francês, alemão e espanhol) e relacionar os efeitos por cada um deles produzidos em tabuleiros bi-apoiados, termina-se com uma síntese comparativa dos resultados obtidos e as respetivas conclusões.

3.2.2 Estudo comparativo entre as normas vigentes e respetivas conclusões

O estudo comparativo considerou os modelos de sobrecarga das normas portuguesa, inglesa, francesa, alemã e espanhola. Analisou os efeitos que cada um dos sistemas produzia num tramo isostático de um tabuleiro com vão variável entre 10,00 m e 100,00 m. Também foi considerada uma variação do número e largura das vias de tráfego.

Com os valores característicos dos esforços máximos das sobrecargas rodoviárias, concluiu-se que para vãos superiores a 25,00 m e tabuleiros com mais do que 2 vias, os submodelos de sobrecargas constituídos por cargas uniformemente distribuídas (lineares ou transversais) são condicionantes relativamente aos submodelos constituídos por veículos tipo (cargas concentradas). Contudo, estes últimos são mais gravosos para vãos inferiores a 25,00 m.

Comparando os resultados obtidos para o momento fletor máximo e o esforço transversal máximo, refere-se que na maioria dos casos obtêm-se valores mais elevados que os efeitos produzidos pelos sistemas de sobrecarga da norma portuguesa, atingindo em certas situações momentos fletores 80% superiores. A mesma conclusão é verificada no que se refere ao esforço transversal, mas apresentando percentagens de acréscimo um pouco mais baixas. Os regulamentos alemão e espanhol eram os mais gravosos, seguidos das normas francesa e inglesa. Concluiu-se ainda que o alargamento da secção e o correspondente aumento do número de vias de tráfego diminuíam essas máximas diferenças percentuais, havendo casos em que o regulamento português era mais gravoso que os regulamentos francês e inglês.

Após uma exaustiva comparação e discussão de resultados fez-se um reparo acerca da falta de informação básica referente às características do tráfego atual e futuro do país, bem como às lacunas existentes nas metodologias utilizadas para definição das sobrecargas rodoviárias. Sugeriu-se que num próximo regulamento deveriam ser diferenciadas as características do tráfego consoante o tipo de ponte, que se tivesse em conta a composição e o espaçamento entre veículos e ainda que se procurasse atender aos efeitos induzidos pela circulação de veículos com cargas especiais.

3.3 Ação do tráfego rodoviário em pontes de betão armado – FEUP (2008)

3.3.1 Generalidades

Em fevereiro de 2008 foi submetida, para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil (especialização em estruturas), na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a dissertação de mestrado intitulada *Acção do Tráfego Rodoviário em Pontes de Betão Armado – Análise da situação portuguesa e comparação com os modelos propostos pelo EC1 e pelo RSA*, da autoria de João Miguel Mesquita Freitas. A dissertação foi orientada pelo Professor Doutor António Abel Ribeiro Henriques.

A referida tese de mestrado apresentou um estudo comparativo entre os modelos das ações do tráfego rodoviário em pontes de betão armado propostos pelo RSA e pelo EC1. Adicionalmente foi efetuado um enquadramento do tráfego português no cenário do tráfego rodoviário europeu e foi realizada uma análise estatística do tráfego português em dois troços de estradas com elevado movimento de veículos pesados. Pretendeu-se inferir se a transição da norma vigente em Portugal (RSA) para a nova regulamentação europeia seria adequada ao contexto nacional.

3.3.2 Caracterização do tráfego rodoviário português

Com base em dados fornecidos pela Estradas de Portugal (EP) referentes ao ano de 2006, analisou-se o tráfego em dois troços de estrada distintos pertencentes à rede de estradas portuguesas. O primeiro troço corresponde à autoestrada A3 entre os $Pk_{inicial}$: 111.100 e Pk_{final} : 112.000, situado em Valença, junto à fronteira entre Portugal e Espanha. O segundo troço pertence à autoestrada A22, entre o $Pk_{inicial}$: 129.766 e o Pk_{final} : 152.000, junto à Ponte Internacional do Guadiana, junto à fronteira com Espanha.

Da análise do volume de tráfego nos dois troços verificou-se que a distribuição mensal é idêntica nos dois casos, apresentado valores de volume de tráfego maiores no mês de agosto e de menor intensidade de tráfego nos meses de janeiro e fevereiro. Concluiu-se ainda que o troço da autoestrada A3 tem um volume de passagem de veículos superior ao do outro troço.

Visto que as características do tráfego pesado são um fator importante a ter em conta no dimensionamento de pontes, procedeu-se a um estudo da distribuição dos pesos desta categoria de veículos nos dois troços já referidos. Esse estudo permitiu formular um modelo de sobrecarga representativo da ação do tráfego pesado nesses dois troços, seguindo o procedimento de cálculo sugerido em *Moses & Ghosn* (1985).

3.3.3 Estudo comparativo dos modelos de ação do tráfego rodoviário

Na primeira parte do trabalho determinou-se um modelo de sobrecarga representativo do tráfego que circulava nos dois troços já referidos. Esse modelo de sobrecarga e os modelos definidos no RSA e no EC1 serviram para determinar os esforços num tabuleiro simplesmente apoiado com uma largura de 8,00 m e vão variável entre 3,00 m e 60,00 m.

Foram analisados o momento fletor na secção de meio vão e o esforço transversal junto aos apoios, secções onde os respetivos esforços são máximos. Concluiu-se que ambos os esforços, para o modelo de sobrecarga do EC1, apresentavam valores superiores aos do modelo do RSA, sendo duas vezes maiores em vãos próximos de 60,00 m. Para vãos até cerca de 45,00 m, os efeitos obtidos pelos modelos de simulação do tráfego da A3 e da A22 superaram os valores obtidos pelo RSA.

A comparação dos resultados permitiu concluir que os efeitos causados pelo EC1 aproximam-se mais do modelo representativo do tráfego nacional do que o próprio RSA. Concluiu-se também que se deve proceder à substituição do RSA pelo EC1, por forma a representar-se melhor a realidade efetiva do tráfego nacional.

O estudo termina com o incentivo de se proceder a um estudo semelhante, mas envolvendo mais cenários/exemplos, nomeadamente com variação das secções dos tabuleiros e das condições de apoio, por forma a complementar os resultados obtidos.

3.4 Estudo comparativo entre modelos de sobrecargas rodoviárias de diferentes normas – ISEL (2012)

3.4.1 Generalidades

A fim de obter o grau de Mestre em Engenharia Civil (especialização em Estruturas), Manuel Pedro da Conceição Alves apresentou a dissertação intitulada *Modelação de Sobrecargas Rodoviárias - Estudo comparativo entre diferentes normas*, em dezembro de 2012, no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. A dissertação teve como orientador o Professor Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto.

O principal objetivo desta tese de mestrado foi aprofundar o estudo das sobrecargas rodoviárias em pontes de pequeno e médio vão, considerando os sistemas de sobrecargas descritos em diferentes regulamentos.

Na primeira parte do trabalho são apresentados os aspetos condicionantes das ações do tráfego rodoviário e enquadrados os modelos de sobrecarga regulamentares. No capítulo 3 são definidos os modelos de sobrecarga de cinco regulamentos (português, europeu, brasileiro, norte-americano e canadiano) que, no capítulo 4, foram considerados no carregamento de uma ponte bi-apoiada com vão variável entre 20,00 m e 50,00 m. No final procedeu-se ao dimensionamento de um tabuleiro de nervura única recorrendo aos sistemas de sobrecargas rodoviárias do RSA e do EC1, com o intuito de quantificar a diferença de pré-esforço requerido.

3.4.2 Principais fatores que influenciam os efeitos das sobrecargas rodoviárias

É referido que o tipo de tráfego varia de intensidade, composição e velocidade, consoante o itinerário rodoviário. Os veículos variam no seu peso bruto e no número, peso e espaçamento dos eixos. Estas características são tratadas através de um sistema de medição denominado por *Weigh-in-Motion* (WIM).

São apresentadas e definidas todas as características do tráfego rodoviário, sendo enquadradas nos modelos de sobrecarga de cada regulamento, nomeadamente o peso dos eixos dos veículos tipo e as sobrecargas uniformemente distribuídas. Reforça-se a ideia de que os modelos de sobrecarga sugeridos nos regulamentos, apesar de não representarem os veículos reais, pretendem simular o mais aproximadamente possível os efeitos causados pelo tráfego rodoviário.

3.4.3 Efeitos produzidos pelos modelos de carga dos vários regulamentos

Com o intuito de estudar em que medida o EC1 traduz um agravamento dos efeitos das sobrecargas rodoviárias relativamente ao RSA, na segunda parte da dissertação apresenta-se um estudo comparativo dos efeitos causados pelos modelos que constam em cada um dos regulamentos, numa ponte bi-apoiada com vão variável entre 20,00 m e 50,00 m. Foi também considerado um sucessivo alargamento da secção do tabuleiro, constituído por 2 a 4 vias de tráfego, com 3,00 m de largura cada.

Além de se efetuar a comparação entre o RSA e o EC1, também se procedeu ao carregamento do mesmo tabuleiro bi-apoiado recorrendo aos sistemas de sobrecargas propostos pelo regulamento canadiano (CAN/CSA-S6-00 –*Canadian Highway Bridge Design Code*), pelo regulamento norte-americano (AASHTO - LRFD *Bridge Design Specifications*) e ainda pela norma brasileira (ABNT NBR 7188).

Desta forma foi possível estudar os modelos de sobrecarga condicionantes e também a influência do número de vias e comprimento do vão no valor do momento positivo máximo e do esforço transversal máximo, nas secções de meio-vão e de apoio, respetivamente.

Após a apresentação dos resultados em forma de tabelas e gráficos, procedeu-se a uma comparação de resultados. Os modelos de sobrecarga do regulamento europeu produziram efeitos mais graves na maioria das situações estudadas. Contudo, no que se refere especificamente ao momento fletor máximo,

esta diferença de efeitos diminui comparativamente às normas portuguesa e brasileira em tabuleiros com 4 vias de tráfego e vãos superiores a 40,00 m.

Comprovou-se ainda que à medida que o vão aumenta, os submodelos que consideram uma sobrecarga uniformemente distribuída são mais condicionantes, razão pela qual em vãos com mais de 50,00 m e tabuleiros com 4 vias o regulamento brasileiro, cujo valor da carga distribuída é o mais elevado de entre todos os modelos, apresenta os efeitos mais gravosos. Relativamente aos momentos fletores e aos esforços transversos gerados pelos modelos das normas canadiana e norte-americana, em nenhuma ocasião apresentaram efeitos superiores aos produzidos pelos modelos condicionantes do RSA.

Comparando apenas o RSA com o EC1, verificou-se um incremento considerável no valor dos esforços produzidos pelos sistemas de sobrecarga europeus, atingindo um máximo, relativamente ao RSA, de 75% para momentos fletores e 79% em termos de esforço transversal. Contudo, através do dimensionamento de um tabuleiro de nervura única, concluiu-se que apesar de ocorrer um aumento significativo dos efeitos causados pelos valores característicos das sobrecargas, o incremento nos esforços atuantes de cálculo não é tão expressivo.

No final sugeriu-se que se procedesse a um estudo semelhante para regulamentos de países onde a construção de novas pontes desempenhe um papel económico importante, motivando ainda que se efetuassem estudos deste tipo em regulamentos direcionados para a avaliação da segurança de pontes já existentes.

3.5 Estudo comparativo dos efeitos das sobrecargas do RSA e do Eurocódigo em tabuleiros de pontes rodoviárias – IST (2013)

3.5.1 Generalidades

Em junho de 2013 foi apresentada a dissertação de mestrado intitulada *Structural Analysis of Road Bridge Decks: Comparison between the Portuguese code (RSA) and the Eurocode Load Model 1: Evaluation of the global and local effects*, da autoria de João Nuno Tabora Brás Robalo, para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil (especialização em Estruturas) no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. A orientação do referido estudo foi assegurada pelo Professor Doutor Francisco Baptista Esteves Virtuoso e pelo Professor Doutor Ricardo de Figueiredo Vieira.

A tese de mestrado teve a finalidade de avaliar as diferenças entre os efeitos causados pelos modelos de sobrecarga rodoviária descritos no RSA e no EC1, em tabuleiros vigados, nas direções transversal e longitudinal. Na análise transversal, determinaram-se os esforços recorrendo a métodos semi-analíticos e desenvolveram-se dois métodos adequados à determinação dos esforços da laje de um tabuleiro com duas vigas, para cargas distribuídas e concentradas.

3.5.2 Desenvolvimento de métodos semi-analíticos

São apresentados três métodos semi-analíticos para o cálculo dos momentos fletores na consola de tabuleiros vigados, quando sujeitos a cargas concentradas. Apresentam-se vários métodos, nomeadamente um método simples, que não tem em conta a variação da espessura da consola nem a posição da carga, e um método mais recente, proposto por *Sawko & Mills (1971)*, e posteriormente reformulado por *Bakht & Holland (1976)* e *Mufti et. Al (1993)*, que consideram a variação de espessura e a posição das cargas.

Após um estudo da influência das propriedades da consola no valor do momento fletor na viga, desenvolve-se um novo método semi-analítico, baseado na utilização de funções trigonométricas, que tem em consideração as referidas propriedades, para além da variação da espessura. Essas propriedades são consideradas através da inclusão de quatro coeficientes que foram calibrados com auxílio de um

programa de elementos finitos. Após uma comparação dos momentos fletores transversais na consola, obtidos pelo novo método e por um programa de elementos finitos, verificou-se uma boa aproximação dos resultados, comprovando a validade desse novo método.

O novo método foi generalizado para o cálculo dos momentos transversais no painel de laje entre vigas, tendo-se procedido a um ajustamento das expressões analíticas e a uma calibração de novos coeficientes. Os resultados obtidos pelo novo método foram muito semelhantes aos resultados conseguidos através de um programa de elementos finitos.

3.5.3 Estudo comparativo entre o RSA e o EC1

Na segunda parte da dissertação é realizada uma comparação dos esforços transversais e longitudinais causados pelos modelos de sobrecargas do RSA e o *Load Model 1* do EC1 num tabuleiro com duas vigas. Estudaram-se diversos casos que variam entre si no comprimento do vão (de 20,00 m até 50,00 m, com um incremento de 5,00 m), no número de vãos (1, 2, 3, e 5 vãos) e na largura do tabuleiro (de 8,00 m até 20,00 m, com um incremento de 4,00 m).

Com recurso ao método semi-analítico proposto e ao método analítico de *Timoshenko*, foi efetuada uma análise transversal, na secção de meio-vão, dos momentos fletores na consola e no painel de laje intermédio, considerando a variação da largura do tabuleiro e diferentes espessuras na extremidade da consola.

Para a análise longitudinal foi determinada a percentagem dos esforços correspondentes às sobrecargas face aos esforços totais da ponte, recorrendo a um programa de elementos finitos. Com estes resultados concluiu-se que em todas as situações estudadas o EC1 era sempre mais gravoso que o RSA, apresentando valores de momentos fletores e esforço transversal entre 35% a 60% superiores.

De modo a testar os resultados obtidos, foi efetuada uma análise comparativa entre os efeitos produzidos pelas sobrecargas dos dois regulamentos em duas pontes reais, uma constituída por um tabuleiro com duas vigas e outra por um tabuleiro com duas nervuras. Os esforços na direção transversal foram novamente calculados pelo método semi-analítico proposto e pelo método analítico de *Timoshenko*. Na direção longitudinal voltou-se a usar um programa de elementos finitos. Novamente os valores do EC1 foram sempre superiores aos do RSA.

No capítulo final dá-se relevo à utilidade do novo método semi-analítico, com o qual se conseguem calcular, com boa aproximação, os esforços causados por qualquer tipo de modelo de carga de faca ou concentrada, e conclui-se que o regulamento português é, em todos os casos estudados, menos condicionante que o regulamento europeu.

Sugere-se ainda que se desenvolvam métodos que permitam determinar os esforços transversos na laje do tabuleiro e os momentos fletores, na direção longitudinal, para cargas concentradas e incentiva-se a que se proceda a estudos comparativos entre diferentes regulamentos.

3.6 Apreciação dos estudos apresentados

As três dissertações de mestrado apresentam muitas semelhanças de conteúdo e nas conclusões. Apesar do relatório do LNEC ter sido publicado cerca de 30 anos antes dos outros trabalhos referidos, todos eles tiveram como objetivos comuns descrever os sistemas de carregamento em pontes rodoviárias de diversos regulamentos e relacionar os efeitos que esses modelos produzem em pontes com vão variável.

As conclusões do relatório do LNEC já não são atuais, visto que os regulamentos considerados nesse estudo já não se encontram em vigor, impossibilitando uma comparação de resultados com os outros três trabalhos. Porém, é de sublinhar que a preocupação demonstrada acerca da necessidade de alterar determinados aspetos nos regulamentos foi tida em conta na elaboração do RSA (1983) e hoje em dia fazem parte na definição dos modelos de sobrecargas do EC1. É de salientar que se concluiu que os sistemas de cargas concentradas têm mais influência nos esforços de pontes com tabuleiros mais largos e de vãos menores, enquanto que os sistemas de cargas distribuídas tornam-se condicionantes em pontes de vãos maiores e tabuleiros mais largos.

O estudo realizado por João Freitas (FEUP) abrangeu várias problemáticas interessantes, nomeadamente o estudo estatístico do tráfego português e a consequente modelação da sobrecarga representativa dos troços analisados. Os resultados permitiram concluir que o EC1 é sempre mais gravoso que o RSA. Contudo, a comparação entre os regulamentos foi realizada apenas para o caso de um tabuleiro bi-apoiado, de largura constante e com vão variável entre 3,00 m e 60,00 m. Este tipo de estruturas são comuns para uma gama de vãos até 40,00 m, sendo improvável construir-se uma ponte bi-apoiada com vão superior. Uma vez que os resultados obtidos neste trabalho não abrangem a maioria das estruturas de pontes construídas atualmente, não se garante que as conclusões obtidas se verifiquem noutros casos.

A dissertação de Manuel Alves (ISEL) dispõe de muita informação sobre a caracterização do tráfego rodoviário e sobre a abordagem que diferentes regulamentos fazem sobre essas características. Compara cinco regulamentos diferentes, mais especificamente os modelos de sobrecarga rodoviária que cada norma define. No que se refere ao estudo comparativo entre o RSA e o EC1, mais uma vez é concluído que a norma europeia induz efeitos mais gravosos que a norma portuguesa. Contudo, tal como no trabalho de João Freitas, esta conclusão refere-se aos esforços obtidos numa ponte bi-apoiada com vão variável entre 20,00 m e os 50,00 m. Apesar de se ter estudado adicionalmente a influência da largura do tabuleiro nos esforços, não foram estudados os efeitos de torção.

O estudo comparativo de João Robalo (IST) considerou mais situações. Para além da análise transversal de tabuleiros com duas vigas, foi realizada uma análise longitudinal onde varia o número de vãos e a largura do tabuleiro. Este último aspeto permitiu estudar os efeitos causados pelos modelos de sobrecarga do RSA e do EC1 nos momentos fletores negativos. Mais uma vez foi comprovado que o regulamento europeu é mais gravoso que o português.

Referidas estas conclusões, confirma-se que o EC1 é sempre condicionante face ao RSA. No entanto, alguns dos estudos foram realizados para tabuleiros simplesmente apoiados de secção constante, o que leva a que as suas conclusões se cinjam a um número restrito de situações, não sendo por isso possível extrapolar todas elas para o contexto real. Apesar da dissertação de João Robalo conter casos de estudo com um número diferente de vãos, apenas foram estudadas pontes constituídas por duas vigas ou duas nervuras. Assim, afigura-se útil proceder a um estudo mais abrangente, com diferentes tipos de secções de tabuleiros e dimensões de vãos, por forma a complementar os estudos realizados.

Capítulo 4

Escolha dos casos de estudo

4.1 Considerações gerais

Escolheu-se um conjunto de casos de estudo para determinar os efeitos estruturais causados pelos modelos de sobrecargas rodoviárias dos cinco regulamentos descritos no segundo capítulo e proceder a uma comparação desses mesmos efeitos.

Os casos de estudo foram escolhidos tendo em consideração a experiência da engenharia de pontes portuguesa. São considerados tabuleiros de médio vão, de secção com nervura única, e tabuleiros de grande vão, com secção em caixão. A escolha deste tipo de secções deveu-se ao objetivo, previamente definido, de comparar esforços de flexão, transversos e de torção.

A análise estrutural dos diferentes casos de estudo será feita com recurso a um programa tridimensional de elementos finitos. Para a análise na direção longitudinal foram consideradas discretizações com elementos de barra, para a determinação dos valores máximos dos momentos fletores (positivo e negativo), do esforço transversal e do momento torsor. A análise na direção transversal, com vista à obtenção dos momentos fletores condicionantes na laje de plataforma, foi realizada apenas para dois casos de estudo, correspondentes a tabuleiros com secções em caixão com larguras muito diferentes, usando uma discretização dessas estruturas com elementos finitos de casca.

Os modelos de cálculo foram desenvolvidos com recurso ao programa de elementos finitos SAP2000® (análise elástica linear). Os modelos utilizados na análise longitudinal são constituídos apenas por elementos de barra (*frames*), definidos pelas propriedades das secções do tabuleiro. Este tipo de modelo é adequado, para uma análise longitudinal, porque os tabuleiros das obras têm secções de nervura única ou em caixão unicelular. Os sistemas de sobrecarga, que são tridimensionais, foram reduzidos a carregamentos de peças lineares, forças concentradas ou cargas distribuídas.

Nos casos de estudo 3 e 6 foram elaborados adicionalmente modelos de elementos finitos para determinar os efeitos transversais. Esses modelos são constituídos por elementos de casca (*shell*) por forma a determinar os momentos fletores máximos nas secções de apoio nas almas e de meio vão da laje intermédia. Estes modelos serão apresentados no sexto capítulo.

Em suma, é objetivo do atual capítulo apresentar os tabuleiros das obras de cada caso de estudo e os modelos de cálculo utilizados na análise longitudinal.

Consideraram-se características de rigidez das obras correspondentes à utilização, em todas elas, de betão da classe C30/37.

4.2 Apresentação do caso de estudo 1

4.2.1 Caracterização estrutural

A primeira obra em análise é um tipo de estrutura muito comum no restabelecimento de caminhos rurais. O tabuleiro é de nervura única e tem uma largura total de 6,00 m, com dois passeios e cornijas com 1,00 m de largura. A única via de tráfego, com 4,00 m, serve os dois sentidos. A secção é constante ao longo dos 2 vãos de 25,00 m que se encontram apoiados num pilar e em dois encontros de extremidade. A geometria e as dimensões do tabuleiro estão representadas nas figuras 4-1 e 4-2.

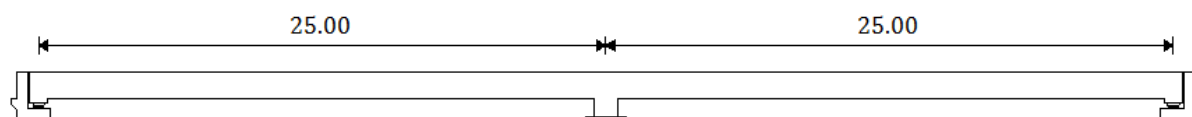


Figura 4-1 : Corte longitudinal pelo eixo (caso de estudo 1)

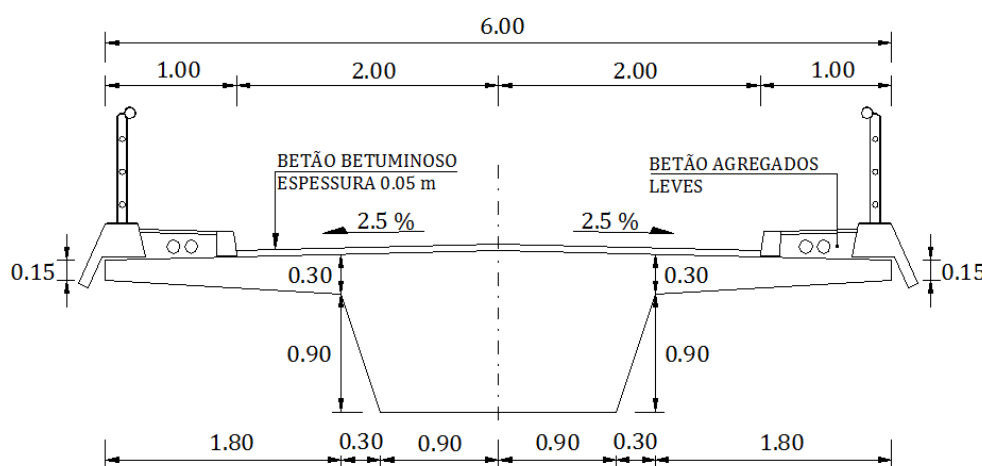


Figura 4-2 : Secção transversal do tabuleiro (caso de estudo 1)

4.2.2 Modelo de elementos finitos de barra

Na figura 4-3 apresenta-se o modelo de elementos finitos de barra utilizado para estudar os esforços longitudinais do caso de estudo 1. Os apoios de extremidade restringem a rotação segundo o eixo x e os deslocamentos segundo y e z . O apoio situado entre as duas barras restringe todos os deslocamentos lineares e a rotação segundo x .

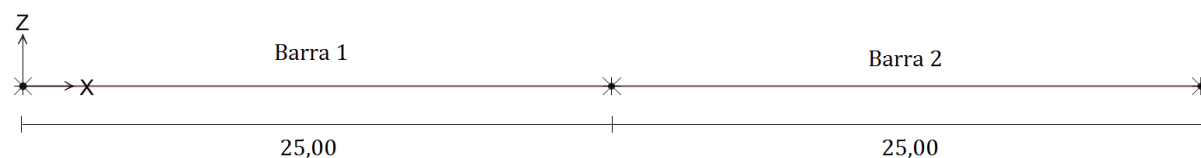


Figura 4-3 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 1

Na tabela 4-1 apresentam-se os valores das propriedades geométricas da secção transversal do tabuleiro (área, momentos de inércia baricêntricos segundo y e z e fator de rigidez de torção) que foram atribuídos aos elementos de barra.

Tabela 4-1 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 1

Nº Barra	Área [m ²]	I _{yG} [m ⁴]	I _{zG} [m ⁴]	J [m ⁴]
1 e 2	3,46	0,43	4,51	0,88

4.3 Apresentação do caso de estudo 2

4.3.1 Caracterização estrutural

Tal como no primeiro caso de estudo, a obra é constituída por 2 vãos de 25,00 m apoiados num pilar e em dois encontros de extremidade (Figura 4-4). A secção de nervura única é constante em todo o desenvolvimento do tabuleiro, composto por duas vias de tráfego com 3,00 m cada, duas bermas com 1,00 m e dois passeios e cornijas também com 1,00 de largura. A geometria e dimensões da secção transversal estão representadas na figura 4-5.

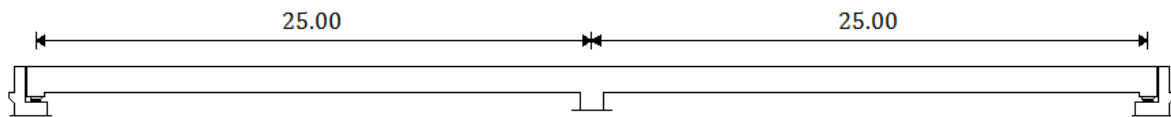


Figura 4-4 : Corte longitudinal pelo eixo (caso de estudo 2)

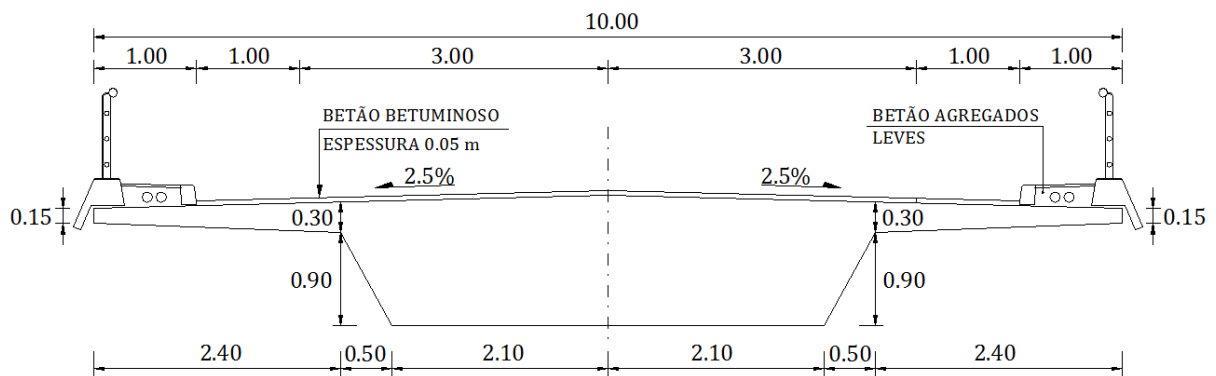


Figura 4-5 : Secção transversal do tabuleiro (caso de estudo 2)

4.3.2 Modelo de elementos finitos de barra

O modelo de elementos finitos de barra utilizado para determinar os efeitos longitudinais do caso de estudo 2 apresenta-se na figura 4-6. Os nós de extremidade restringem os deslocamentos segundo y e z e a rotação em x . O apoio do pilar restringe os deslocamentos lineares nas três direções e restringe a rotação segundo o eixo x .

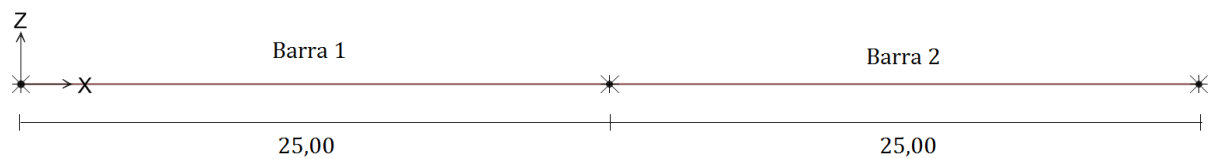


Figura 4-6 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 2

As propriedades geométricas da secção atribuídas aos elementos de barra apresentam-se na tabela 4-2.

Tabela 4-2 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 2

Nº Barra	Área [m ²]	I _{yG} [m ⁴]	I _{zG} [m ⁴]	J [m ⁴]
1 e 2	7,04	0,91	26,60	2,58

4.4 Apresentação do caso de estudo 3

4.4.1 Caracterização estrutural

O tabuleiro do terceiro caso de estudo tem secção em caixão, com altura constante e uma largura total de 15,00 m. É dividido em duas faixas de rodagem, cada uma composta por uma via de tráfego e uma berma. Os passeios e a cornija ocupam uma largura de 1,50 m. Longitudinalmente a obra é constituída por 2 vãos extremos de 50,00 m e 3 tramos intermédios de 60,00 m (Figuras 4-7 e 4-8).

Junto aos pilares há uma variação da espessura do banzo inferior e da alma entre as secções A, B e C. Junto aos encontros de extremidade, a secção do tabuleiro varia simultaneamente a espessura do banzo inferior e da alma entre as secções A e C (figura 4-7).

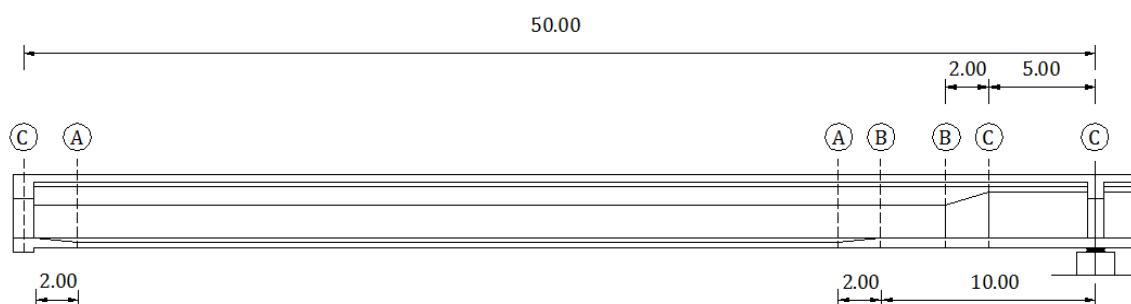


Figura 4-7 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 50,00 m (caso de estudo 3)

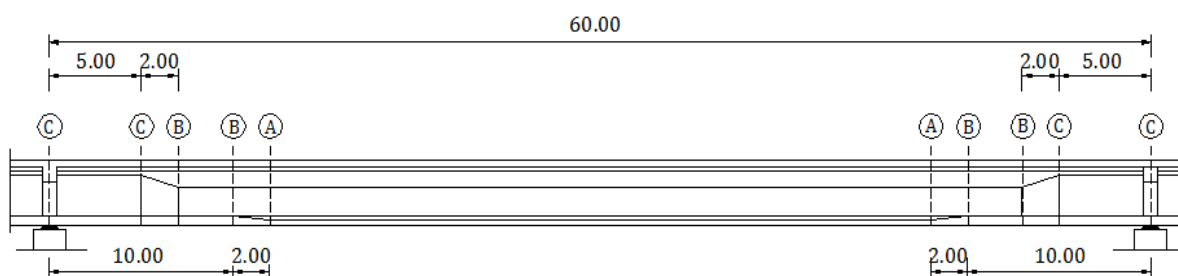


Figura 4-8 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos intermédios 60,00 m (caso de estudo 3)

Nas figuras 4-9 e 4-10 estão representadas as secções transversais do tabuleiro da obra, a meio vão e junto aos apoios dos pilares, respetivamente.

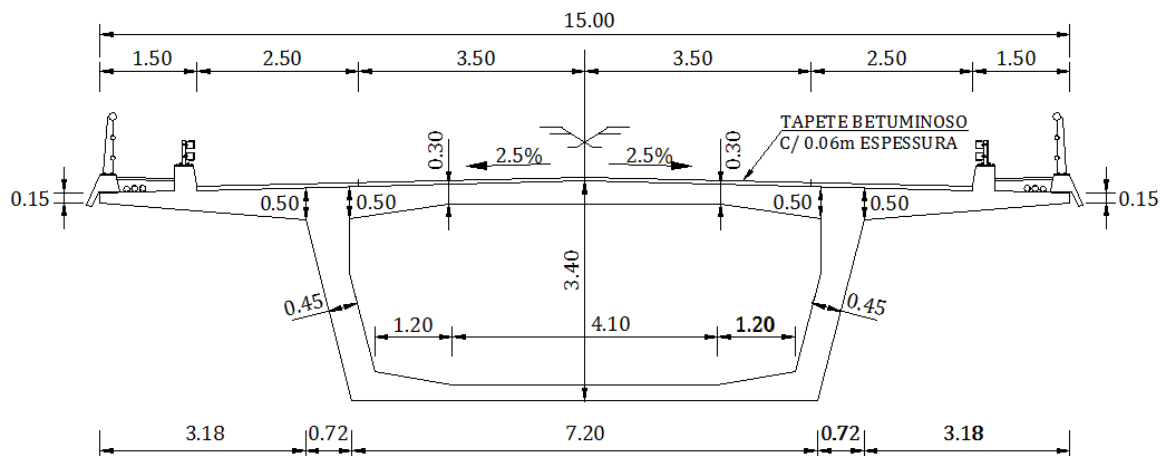


Figura 4-9 : Secção transversal a meio vão (caso de estudo 3)

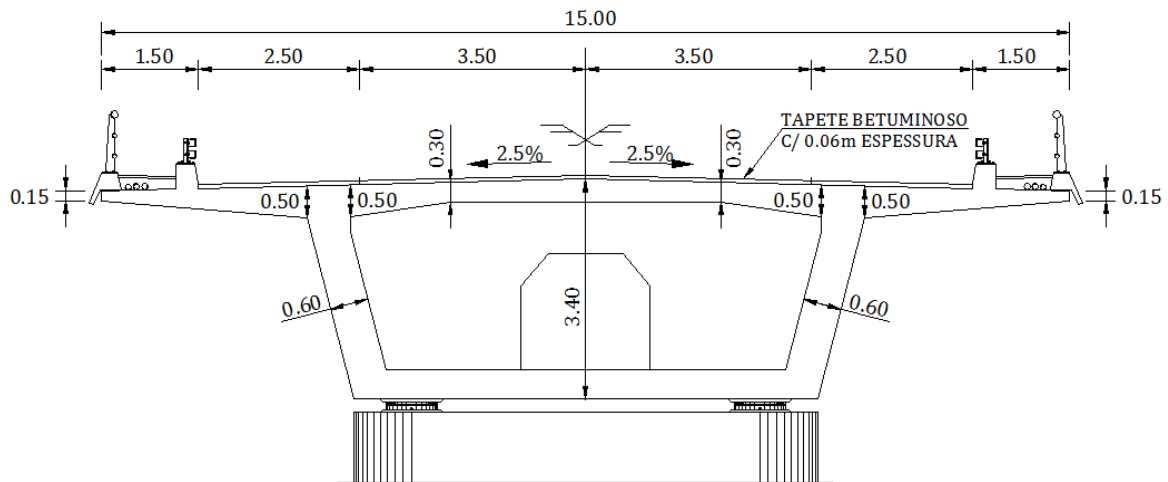


Figura 4-10 : Secção transversal junto ao apoio nos pilares (caso de estudo 3)

Este caso de estudo inclui-se na família de tabuleiros com secção em caixão, de menor vão, construídos tramo a tramo, eventualmente com recurso a cimbra inferior auto-lançável, sendo a continuidade estabelecida a quinto de vão. A largura do tabuleiro corresponde ao de uma estrada nacional. O dimensionamento do tabuleiro baseou-se nas soluções utilizadas nos viadutos de acesso às pontes sobre o rio Zambeze (Moçambique), em Caia e em Tete, construídos nos últimos anos.

4.4.2 Modelo de elementos finitos de barra

Na figura 4-11 apresenta-se o modelo de elementos finitos de barra utilizado no cálculo dos esforços na direção longitudinal. Os encontros de extremidade restringem os deslocamentos lineares em y e z e a rotação em x . Os pilares, como não restringem as rotações em y e z , podem ser considerados como apoios simples com restrição da rotação em x .

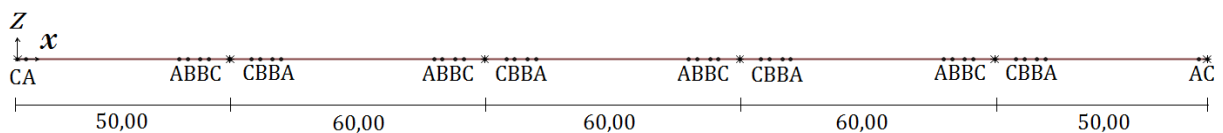


Figura 4-11 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 3

Os elementos de barra que constituem o modelo de elementos finitos têm secção constante ou variável. Na transição entre secções diferentes considerou-se uma variação linear das propriedades apresentadas na tabela 4-3.

Tabela 4-3: Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 3

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m ²]	I_{yG} [m ⁴]	I_{zG} [m ⁴]	J [m ⁴]
A	{2; 38; 62; 98; 122; 158; 182; 218; 242; 278}	10,02	15,60	137,57	36,73
B	{40; 43; 57; 60; 100; 103; 117; 120; 160; 163; 177; 180; 220; 223; 237; 240}	10,97	18,52	138,76	41,58
C	{0; 45; 55; 105; 115; 165; 175; 225; 235; 280}	11,55	18,87	145,49	42,84

4.5 Apresentação do caso de estudo 4

4.5.1 Caracterização estrutural

A obra do quarto caso de estudo é composta por 3 tramos, um vão central de 120,00 m e dois vãos extremos de 80,00 m. A secção em caixão tem altura variável em todos os vãos, como indicam as figuras 4-12 e 4-13.

Transversalmente o tabuleiro comporta duas faixas de rodagem compostas por uma via de tráfego e uma berma de 3,50 m e 2,50 m respetivamente. Os passeios, a cornija e o soco de apoio do perfil de segurança ocupam 1,50 m cada (figura 4-14).

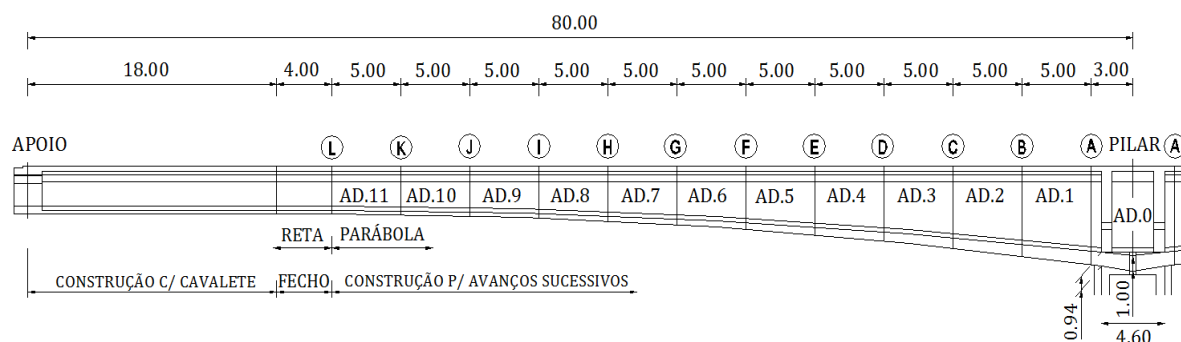


Figura 4-12 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 80,00 m (caso de estudo 4)

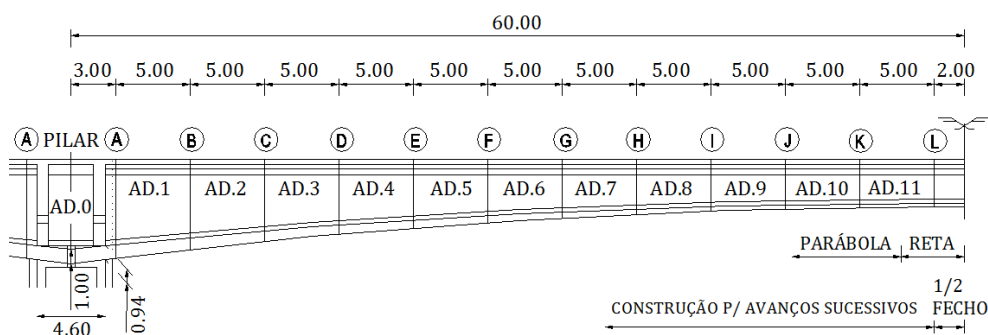


Figura 4-13 : Corte longitudinal pelo eixo - meio tramo central 120,00 m (caso de estudo 4)

Este caso de estudo corresponde a uma solução de tabuleiro a construir por avanços sucessivos em consola a partir do coroamento dos pilares. Nos vãos extremos há troços, junto aos encontros, a serem construídos com o auxílio de um cavalete apoiado no solo. Escolheu-se uma largura de tabuleiro indicada para servir uma estrada nacional. O vão de 120,0 m foi escolhido por se tratar de uma dimensão competitiva para se utilizar o método construtivo referido. O dimensionamento do tabuleiro baseou-se no projeto da ponte sobre o rio Sabor na albufeira da barragem de jusante do aproveitamento hidroelétrico com o mesmo nome, recentemente construída.

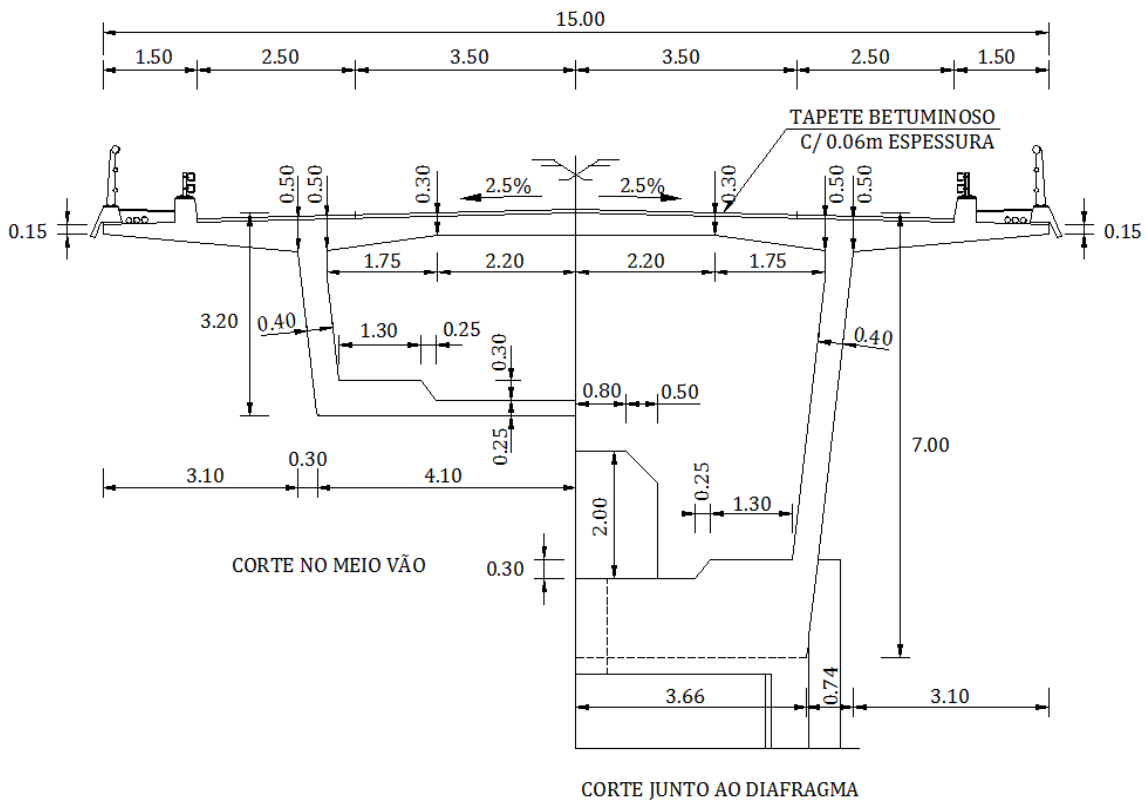


Figura 4-14 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 4)

4.5.2 Modelo de elementos finitos de barra

Na figura 4-15 está representado o modelo de elementos finitos de barra utilizado no cálculo dos esforços longitudinais da ponte do caso de estudo 4. Os elementos de barra que simulam as diversas aduelas do tabuleiro têm propriedades variáveis entre as secções das suas extremidades. A secção do tabuleiro é constante entre os nós que simulam os encontros e a secção L.

Os encontros de extremidade restringem os deslocamentos em y e z e a rotação em x. Os dois pilares, como não restringem na totalidade as rotações em y e z devido à diferença da sua inércia e da inércia do tabuleiro, foram considerados, simplifadamente, como apoios simples com restrição da rotação segundo x.

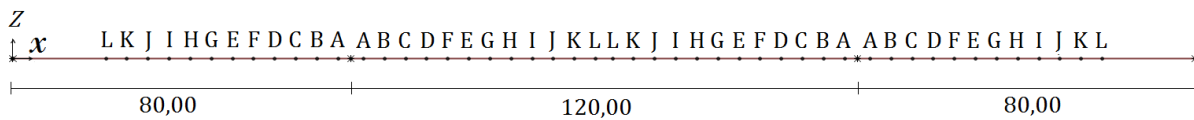


Figura 4-15 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 4

As coordenadas e as propriedades geométricas de cada secção do tabuleiro constam na tabela 4-4.

Tabela 4-4 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 4

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m²]	I_{yG} [m⁴]	I_{zG} [m⁴]	J [m⁴]
A	{77; 83; 197; 203}	17,03	117,44	189,99	148,38
B	{72; 78; 192; 208}	15,97	93,52	183,26	129,35
C	{67; 93; 187; 213}	14,85	72,60	175,87	109,89
D	{62; 98; 182; 218}	14,02	56,48	171,21	94,80
E	{57; 103; 177; 223}	13,20	41,14	165,32	81,29
F	{52; 108; 172; 228}	12,37	35,21	159,17	68,07
G	{47; 113; 167; 233}	11,73	28,52	154,30	58,19
H	{42; 118; 162; 238}	11,22	23,82	150,38	50,66
I	{37; 123; 157; 243}	10,71	19,59	146,37	43,33
J	{32; 128; 152; 248}	10,47	17,76	144,44	39,95
K	{27; 133; 147; 253}	10,30	16,53	143,08	37,62
L	{22; 138; 142; 258}	10,12	15,32	141,66	35,24

4.6 Apresentação do caso de estudo 5

4.6.1 Caracterização estrutural

O quinto caso de estudo consiste numa obra de secção em caixão de altura variável, com 2 tramos extremos de 140,00 m e um vão intermédio com 220,00 m. A ligação entre os pilares e o tabuleiro é contínua.

O tabuleiro tem uma largura total de 15,00 m e altura máxima de 14,00 m. Acomoda duas faixas de rodagem com uma via de tráfego e uma berma de 3,50 m e 2,50 m, respetivamente. A secção é constante entre o apoio de extremidade e a secção V (figura 4-16) e varia de altura até à secção de apoio no pilar. As espessuras das almas variam de 50 cm para 60 cm entre na secção O (Figuras 4-16, 4-17, 4-18 e 4,19).

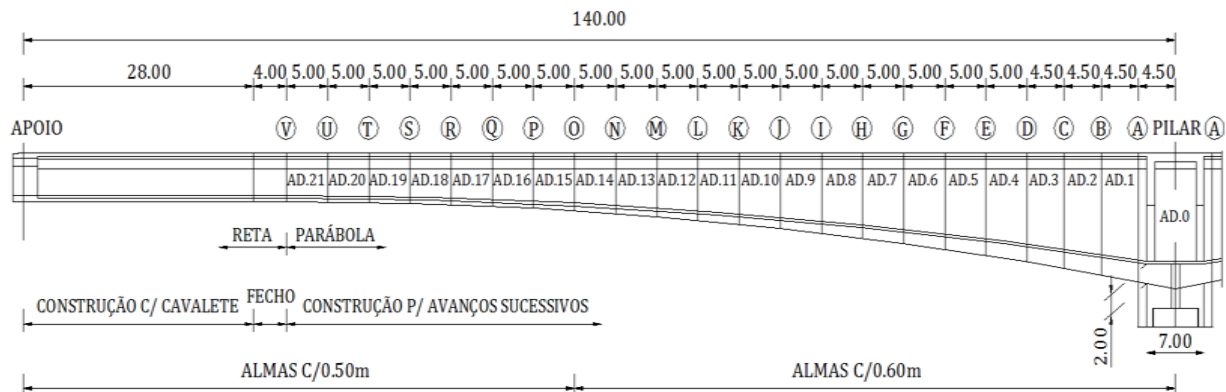


Figura 4-16 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 140,00 m (caso de estudo 5)

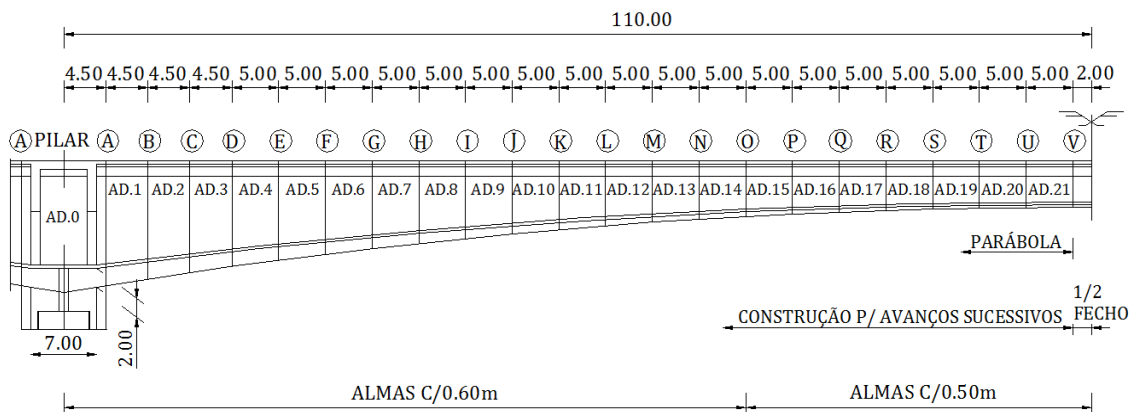


Figura 4-17 : Corte longitudinal pelo eixo - meio tramo central 220,00 m (caso de estudo 5)

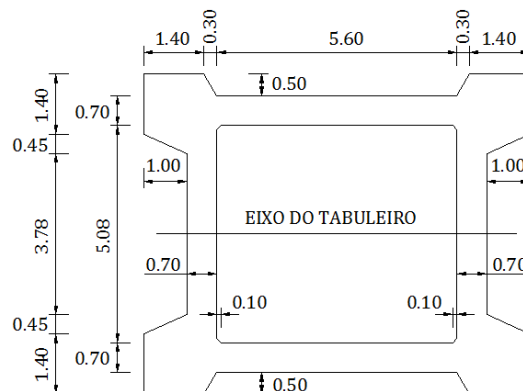


Figura 4-18 : Secção transversal do pilar (caso de estudo 5)

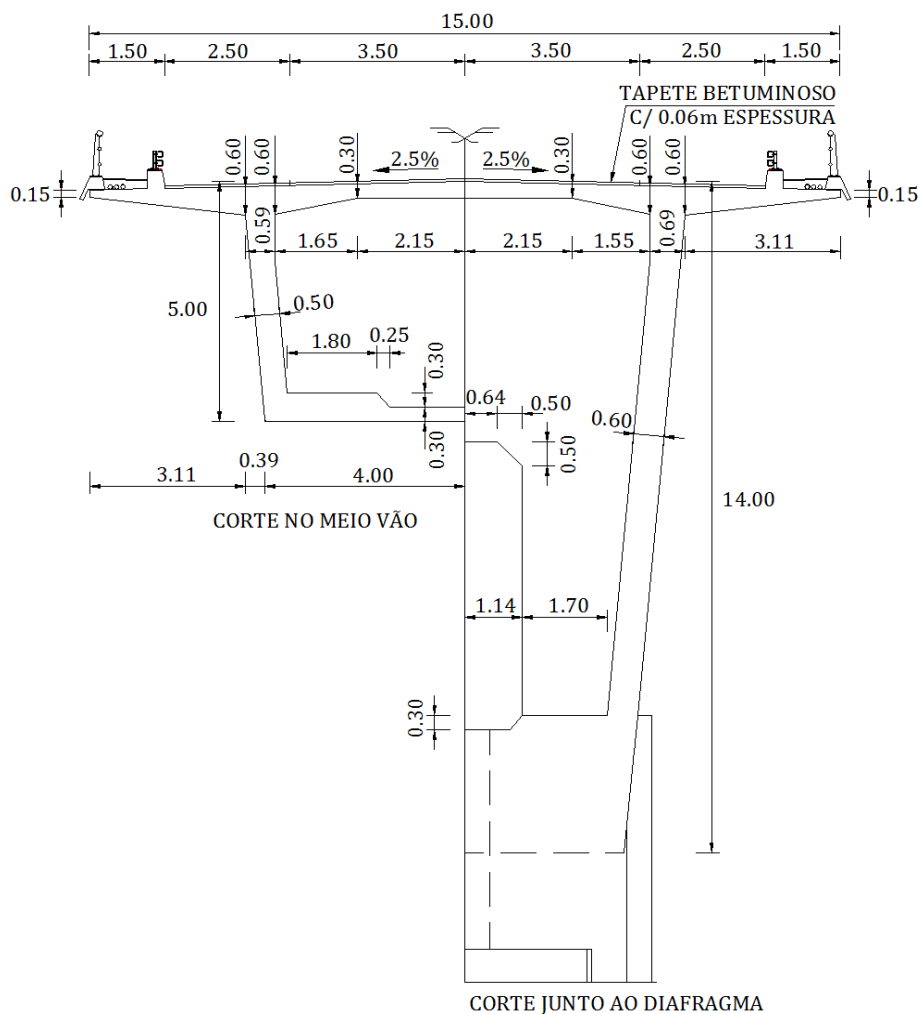


Figura 4-19 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 5)

Este caso de estudo diz respeito também a uma solução estrutural de tabuleiro a construir por avanços sucessivos em consola a partir do coroamento dos pilares. Escolheu-se também uma largura de tabuleiro para servir uma estrada nacional. O vão central de 220,0 m corresponde à ordem de grandeza dos maiores vãos existentes em Portugal. O dimensionamento da obra baseou-se no projeto da ponte sobre o rio Tua, no IC5, construída há poucos anos.

4.6.2 Modelo de elementos finitos de barra

O modelo de cálculo para análise longitudinal representado na figura 4-20 é constituído por elementos de barra que simulam as aduelas do tabuleiro. Os apoios de extremidade restringem a rotação segundo o eixo x e os deslocamentos em y e z . Os pilares, com 100,00 m de altura e encastrados na base, têm secção constante e as propriedades apresentadas na tabela 4-6. Na tabela 4-5 constam os valores das propriedades geométricas das secções do tabuleiro e as respetivas coordenadas.

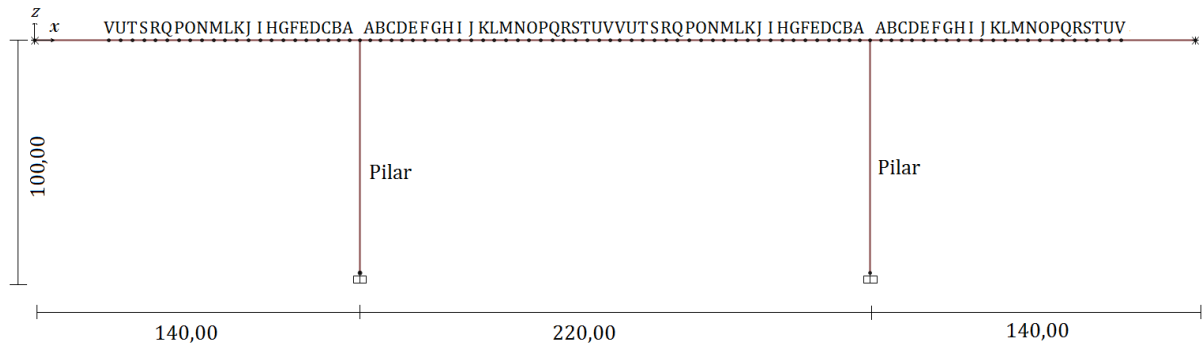


Figura 4-20 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 5

Tabela 4-5 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 5

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m ²]	I_{yG} [m ⁴]	I_{zG} [m ⁴]	J [m ⁴]
A	{135,5; 144,5; 355,5; 364,5}	33,05	778,59	326,33	495,25
B	{131; 149; 351; 369}	31,64	678,97	318,81	464,63
C	{126,5; 153,5; 346,5; 373,5}	30,20	587,21	310,79	433,58
D	{122; 158; 342; 378}	28,73	503,13	302,28	401,85
E	{117; 163; 337; 383}	27,54	432,49	294,45	371,93
F	{112; 168; 332; 388}	26,00	365,89	285,22	341,16
G	{107; 173; 327; 393}	24,44	305,51	275,48	310,09
H	{102; 178; 322; 398}	23,67	264,71	268,86	285,25
I	{97; 183; 317; 403}	22,26	223,02	259,85	259,29
J	{92; 188; 312; 408}	20,80	184,94	250,37	232,95
K	{87; 193; 307; 413}	20,18	161,66	244,59	213,91
L	{82; 198; 302; 418}	19,23	138,25	237,48	194,04
M	{77; 203; 297; 423}	17,90	114,45	228,79	172,44
N	{72; 208; 292; 428}	17,44	102,03	224,28	159,37
O	{67; 213; 287; 433}	17,00	90,55	219,74	146,60
P	{62; 218; 282; 438}	15,02	74,58	203,23	124,21
Q	{57; 223; 277; 443}	14,79	68,88	200,70	117,29
R	{52; 228; 272; 448}	14,49	63,29	197,70	110,13
S	{47; 233; 267; 453}	13,90	56,08	194,04	100,56
T	{42; 238; 262; 458}	13,80	54,47	192,84	98,15
U	{37; 243; 257; 463}	13,71	52,81	192,02	95,99
V	{32; 248; 252; 468}	13,63	51,25	191,16	93,82

Tabela 4-6 : Propriedades da secção dos pilares do caso de estudo 5

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m ²]	I_{xG} [m ⁴]	I_{yG} [m ⁴]	J [m ⁴]
Pilar	{140; 360}	24,53	167,66	225,74	183,23

4.7 Apresentação do caso de estudo 6

4.7.1 Caracterização estrutural

À semelhança do caso de estudo 5, a última obra em análise tem 2 vãos extremos de 140,00 m e um tramo central de 220,00 m. As almas da secção transversal variam conforme indicam as figuras 4-21 e 4-22. Os pilares, com 100,00 m de altura, estão rigidamente ligados ao tabuleiro. A geometria e as dimensões da secção transversal do pilar são apresentadas na figura 4-23.

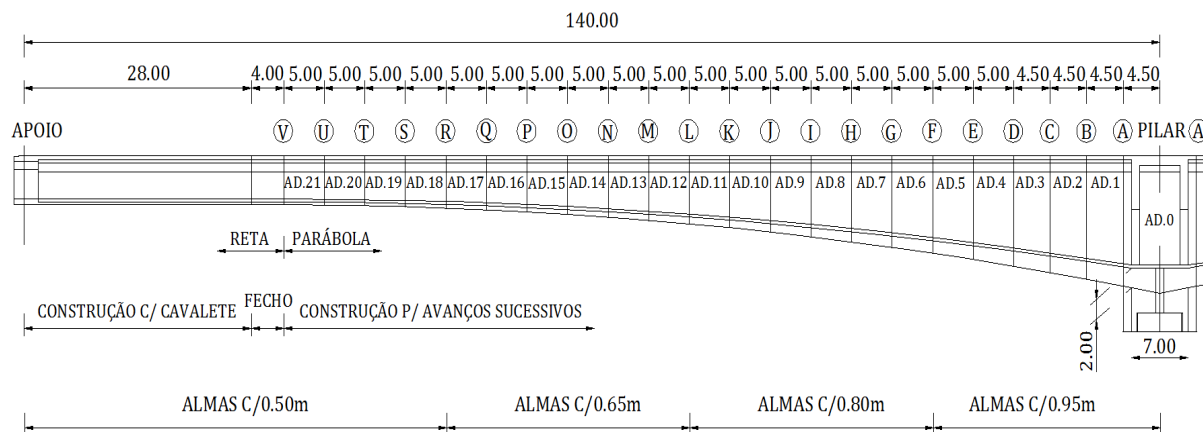


Figura 4-21 : Corte longitudinal pelo eixo - vãos extremos 140,00 m (caso de estudo 6)

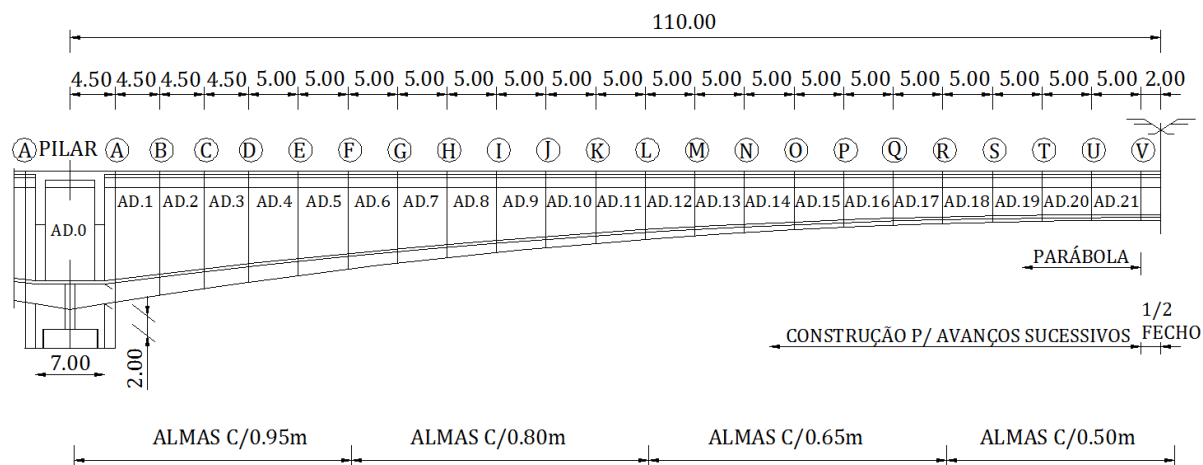


Figura 4-22 : Corte longitudinal pelo eixo - meio tramo central 220,00 m (caso de estudo 6)

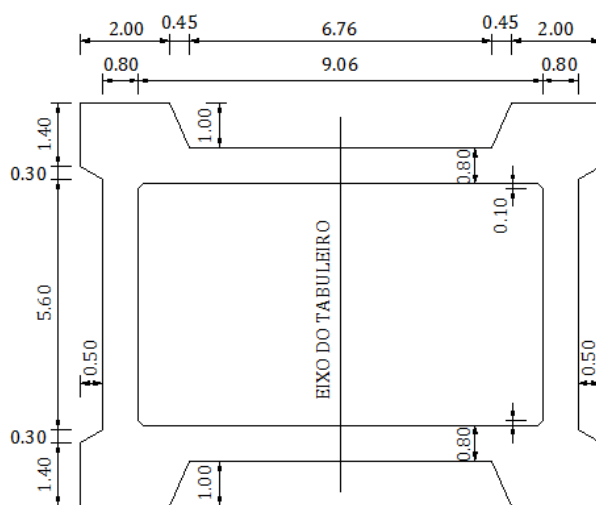


Figura 4-23 : Secção transversal do pilar (caso de estudo 6)

A secção em caixão tem altura variável e uma largura constante de 26,40 m. As duas faixas de rodagem, divididas por uma separador central, são constituídas por duas vias de tráfego com 3,75 m cada e uma berma com 2,90 m (Figura 4-24). O soco de apoio do perfil de segurança, o passeio e a cornija ocupam uma largura de 1,50 m de cada lado.

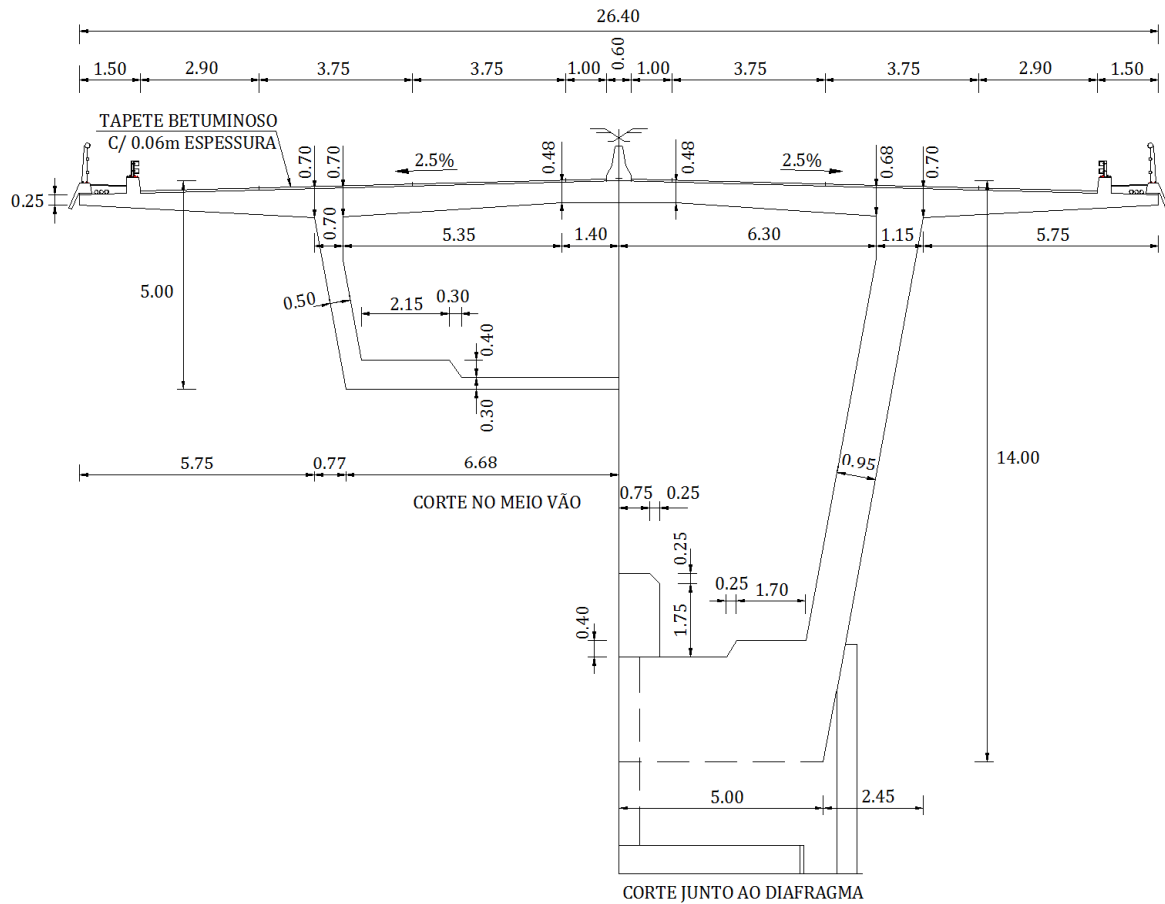


Figura 4-24 : Secção transversal a meio vão e junto ao diafragma (caso de estudo 6)

A solução estrutural deste caso de estudo corresponde à consideração de um tabuleiro muito largo, que comporta um perfil transversal de autoestrada, com vãos idênticos aos do caso de estudo 5. O dimensionamento da obra baseou-se no projeto de ponte sobre o rio Ceira, na autoestrada de Tomar para Coimbra (A13), atualmente em construção.

4.7.2 Modelo de elementos finitos de barra

O modelo apresentado na figura 4-25 corresponde à obra do caso de estudo 6. Cada elemento de barra representa as aduelas com secção variável que constituem o tabuleiro. Os nós de extremidade restringem a rotação em x e os deslocamentos em y e z . Os elementos de barra que simulam os pilares têm as propriedades indicadas na tabela 4-8. As propriedades das restantes secções são apresentadas na tabela 4-7.

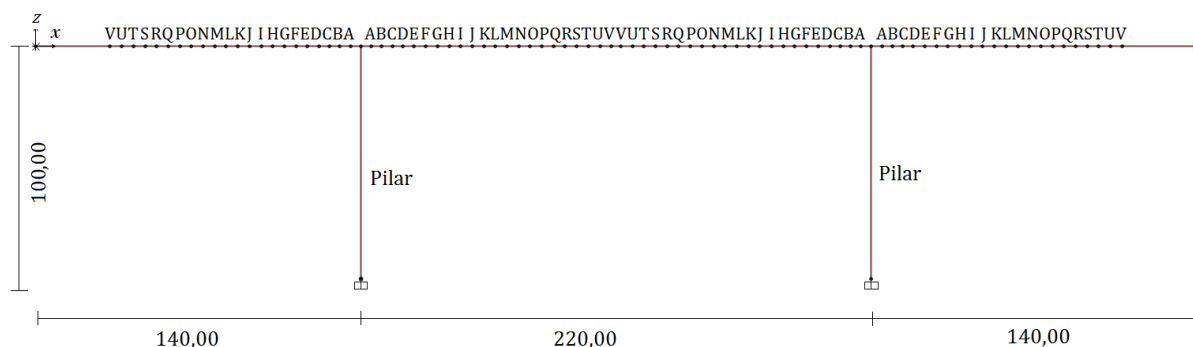


Figura 4-25 : Modelo para análise longitudinal do caso de estudo 6

Tabela 4-7 : Propriedades das secções do tabuleiro do caso de estudo 6

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m ²]	I_{yG} [m ⁴]	I_{zG} [m ⁴]	J [m ⁴]
A	{135,5; 144,5; 355,5; 364,5}	56,89	1431,92	1682,69	1566,51
B	{131; 149; 351; 369}	54,84	1261,27	1655,86	1464,81
C	{126,5; 153,5; 346,5; 373,5}	52,73	1102,69	1626,32	1361,08
D	{122; 158; 342; 378}	50,56	955,45	1594,40	1254,07
E	{117; 163; 337; 383}	48,09	805,72	1556,25	1134,78
F	{112; 168; 332; 388}	45,55	669,74	1514,57	1013,91
G	{107; 173; 327; 393}	41,77	567,04	1412,49	879,95
H	{102; 178; 322; 398}	40,62	493,26	1394,88	803,27
I	{97; 183; 317; 403}	38,60	418,32	1359,12	721,89
J	{92; 188; 312; 408}	36,52	349,62	1320,82	640,61
K	{87; 193; 307; 413}	34,40	286,97	1280,49	559,47
L	{82; 198; 302; 418}	32,94	243,40	1251,72	496,61
M	{77; 203; 297; 423}	30,70	213,08	1180,19	434,88
N	{72; 208; 292; 428}	30,00	187,94	1168,51	394,22
O	{67; 213; 287; 433}	29,29	164,38	1156,57	353,68
P	{62; 218; 282; 438}	27,67	137,18	1121,35	309,32
Q	{57; 223; 277; 443}	26,36	116,06	1092,86	271,98
R	{52; 228; 272; 448}	26,11	109,94	1088,34	258,99
S	{47; 233; 267; 453}	24,71	102,23	1035,10	236,69
T	{42; 238; 262; 458}	24,49	96,58	1031,67	224,70
U	{37; 243; 257; 463}	24,27	91,17	1028,20	212,82
V	{32; 248; 252; 468}	24,06	85,99	1024,97	201,04

Tabela 4-8 : Propriedades da secção dos pilares do caso de estudo 6

Secção	Coordenadas x [m]	Área [m ²]	I_{xG} [m ⁴]	I_{yG} [m ⁴]	J [m ⁴]
Pilar	{140; 360}	35,67	607,46	339,18	445,97

Capítulo 5

Apresentação e discussão de resultados da análise longitudinal

5.1 Considerações gerais

O presente capítulo apresenta e discute os valores dos esforços máximos obtidos da análise longitudinal dos casos de estudo escolhidos. Os efeitos longitudinais foram obtidos carregando os modelos de elementos finitos dos seis casos de estudo, apresentados no capítulo anterior, com os modelos de sobrecarga descritos no segundo capítulo.

Da análise longitudinal consideraram-se os valores máximos dos momentos fletores positivo (M^+) e negativo (M^-), do esforço transversal (V) e do momento torsor (T). Para tal foram consideradas as secções de meio vão do tramo central, para o momento positivo máximo, e de apoio sobre os pilares do tramo central, para os restantes esforços. Nas obras formadas apenas por dois vãos foram analisados os momentos a meio vão do tramo da direita e na secção de apoio central, também no vão da direita. Para determinar os efeitos máximos foi efetuada uma alternância de sobrecargas em todas as situações, tendo em conta as linhas de influência do esforço em apreço.

Os resultados da análise longitudinal apresentam-se em forma de tabelas e gráficos. Para cada caso de estudo são apresentadas duas tabelas e quatro gráficos. Numa primeira tabela apresentam-se os resultados dos esforços produzidos pelos diversos sistemas de sobrecargas. Os esforços condicionantes de cada regulamento são resumidos numa outra tabela, em conjunto com uma ponderação relativa desses valores com os do RSA. Esses mesmos resultados apresentam-se, para cada tipo de esforço, em forma gráfica, representando os valores dos esforços condicionantes dos vários regulamentos ponderados com os do regulamento português.

Após a apresentação dos resultados de cada caso de estudo é realizada uma análise crítica dos valores obtidos e apresentam-se algumas conclusões a respeito da análise dos esforços longitudinais.

Em anexo apresentam-se os esquemas dos carregamentos considerados para a determinação dos esforços (A1 – Esquemas dos carregamentos da análise longitudinal).

5.2 Análise longitudinal do caso de estudo 1

5.2.1 Estrutura do caso de estudo 1

Para facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-1 a estrutura do caso de estudo 1.

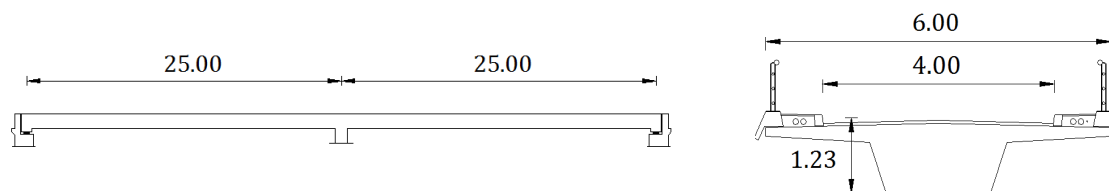


Figura 5-1 : Estrutura do caso de estudo 1

5.2.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 1, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-1. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-1 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 1

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-479	1016	-200	100
	SU	-1248	958	-250	100
	SL + SU	-1727	1974	-450	200
	VT	-1421	2755	-579	478
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-1293	2638	-533	474
	LM1: UDL	-1669	1281	-334	158
	LM1: TS + UDL	-2962	3919	-867	632
	LM2	-862	1829	-360	306
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	2049	-472	384
	<i>Tandem</i>	n.a.	1733	-350	295
	<i>Lane Load</i>	-741	568	-148	155
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	2617	-621	539
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	2301	-498	450
	<i>2 × Truck</i>	-2261	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-2702	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-2464	2155	-494	346
	NA (2)	-345	732	-144	126
	NA (1)+ NA (2)	-2809	2886	-638	472
	NA (3)	-479	1016	-200	175
	NB 24	-2275	3320	-820	479
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-2452	1134	-463	260
	Veículo Classe 45	-1311	2542	-534	390
	<i>p + Veículo</i>	-3763	3675	-997	650

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-2 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-2 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 1

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-1727	2755	-579	478	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-2962	3919	-867	632	1,72	1,42	1,50	1,32
AASHTO	-2702	2617	-621	539	1,56	0,95	1,07	1,13
SATCC	-2809	3320	-820	479	1,63	1,20	1,42	1,00
ABNT	-3763	3675	-997	650	2,18	1,33	1,72	1,36

Os valores da tabela 5-2 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-2 a 5-5).

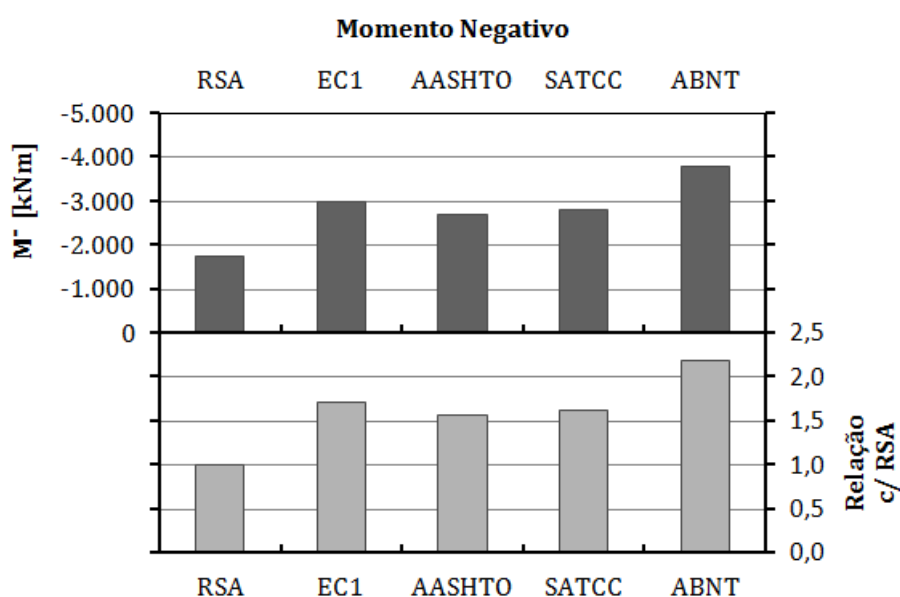


Figura 5-2 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos

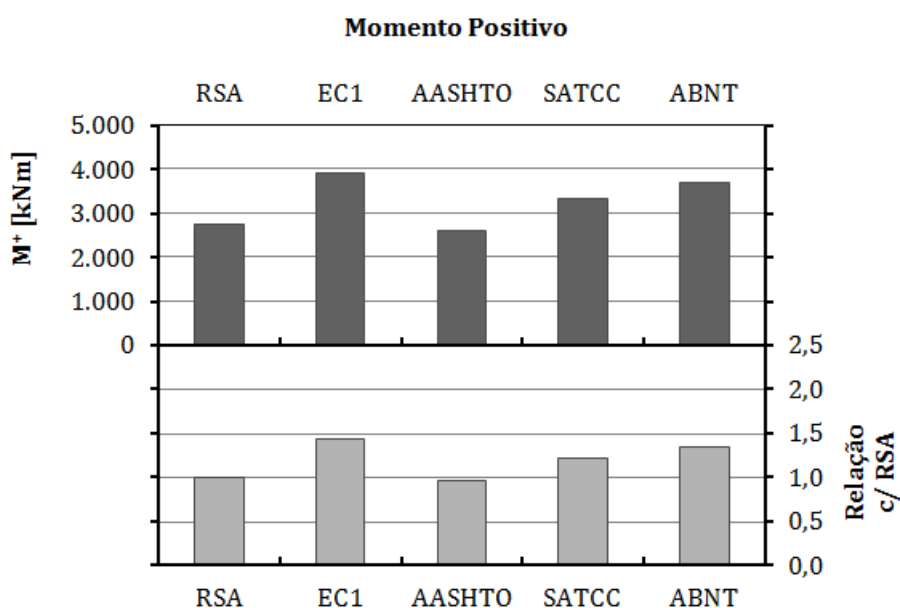


Figura 5-3 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos

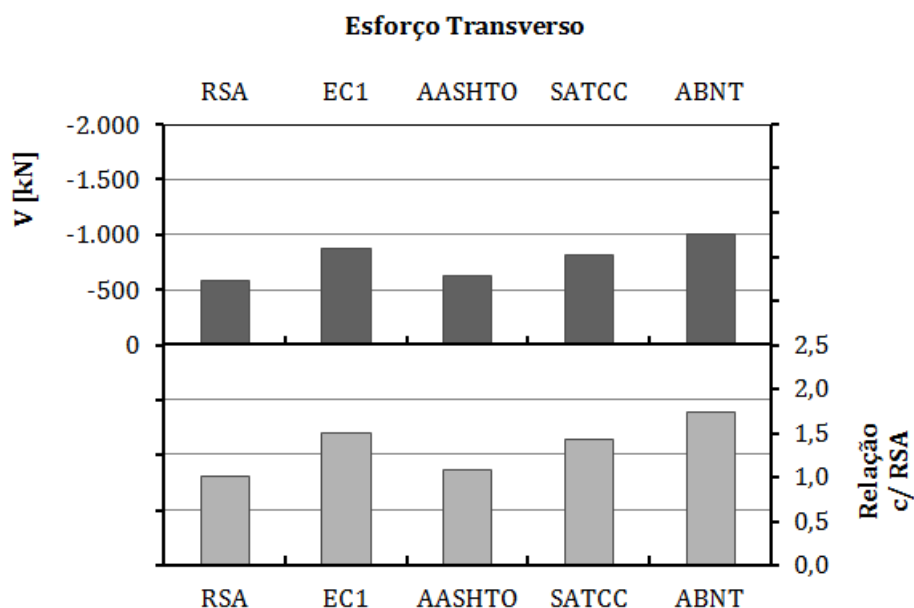


Figura 5-4 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

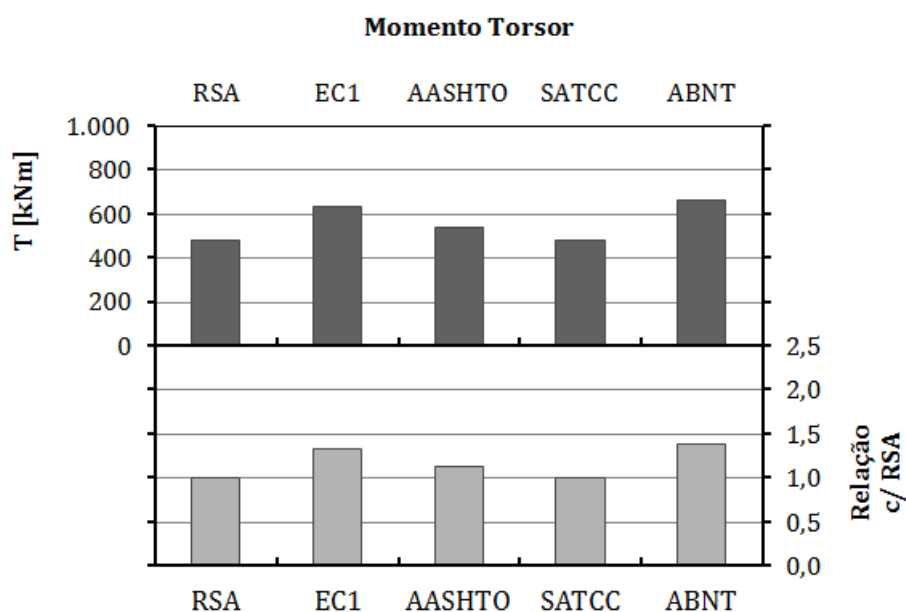


Figura 5-5 : Análise longitudinal do C.E.1 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.2.3 Comparação e discussão de resultados

Os modelos de sobrecarga do regulamento português induzem, em regra, os menores esforços. A par do regulamento da ABNT, o EC1 produz os esforços mais elevados na estrutura. Em situação intermédia encontram-se o regulamento norte-americano e o regulamento sul-africano.

No que se refere aos momentos negativos, o sistema de sobrecarga do modelo brasileiro produz esforços de cerca do dobro relativamente ao RSA. As restantes normas induzem esforços entre 56% a 72% mais elevados.

Relativamente aos momentos fletores positivos, não existe uma diferença tão grande entre as diversas normas, pertencendo o valor mais elevado ao EC1 (+42%).

Os esforços transversos dos modelos de sobrecarga do RSA e da AASHTO são os de menor valor, sendo o esforço transversal mais elevado devido ao modelo da ABNT (+72%).

Os valores do momento torsor voltam a ser mais equilibrados entre as diferentes normas. O regulamento brasileiro continua a apresentar o valor mais elevado, 36% superior ao do RSA, seguido do EC1 (+32%), da norma norte-americana (+13%) e da norma sul-africana (0%).

De uma forma geral, para obras idênticas às do caso de estudo 1, verifica-se que o regulamento português é o menos gravoso quando comparado com as restantes normas consideradas. O modelo de sobrecarga da AASHTO utilizado na obtenção do momento fletor negativo (*2 Truck + Lane Load*) é mais gravoso que os modelos que a mesma norma considerada para o cálculo dos outros esforços. Esses apresentam valores muito mais próximos dos do RSA.

O sistema de sobrecarga condicionante da SATCC produz esforços de valor intermédio quando comparados com os das restantes normas, nunca atingindo valores superiores a 63% dos valores do RSA. Os modelos de sobrecarga mais gravosos para este tipo de obras pertencem ao regulamento brasileiro e ao EC1, chegando a valores do momento negativo 118% e 72% superiores aos do RSA, respetivamente. A diferença de resultados é também muito elevada para o esforço transversal, com valores 72% (ABNT) e 50% (EC1) superiores.

Na tabela 5-1 pode notar-se a importância das cargas concentradas nos esforços de tabuleiros estreitos e com vãos relativamente pequenos. Apesar de em certas situações os modelos com carga distribuída gerarem esforços mais elevados, uma grande parcela dos efeitos é condicionada pelos veículos. O modelo mais condicionante do regulamento português é o veículo tipo. O sistema TS do EC1 produz, na maioria dos esforços, valores superiores aos do sistema de carga distribuída (UDL). Verifica-se também que para o esforço transversal e os momentos fletor positivo e torsor, o veículo da ABNT induz resultados mais elevados que a sobrecarga uniforme desse regulamento, bem como para o *Truck* e o *Tandem* da AASHTO.

Esta influência das cargas concentradas em obras de vão menor e de tabuleiro mais estreito justifica os valores do RSA no caso de estudo 1, inferiores para quase todos os esforços. Sendo o veículo tipo o modelo condicionante da norma portuguesa, constituído apenas por cargas concentradas, quando comparado com os modelos dos restantes regulamentos, constituídos por cargas concentradas e distribuídas em simultâneo, é de esperar que se verifiquem estes resultados. Mesmo em modelos como os da SATCC ou da AASHTO, em que as cargas concentradas são de menor valor que o veículo do RSA, a existência conjunta de uma sobrecarga distribuída compensa essa diferença de cargas, aumentando os valores dos seus esforços relativamente ao RSA.

5.3 Análise longitudinal do caso de estudo 2

5.3.1 Estrutura do caso de estudo 2

Para facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-6 a estrutura do caso de estudo 2.

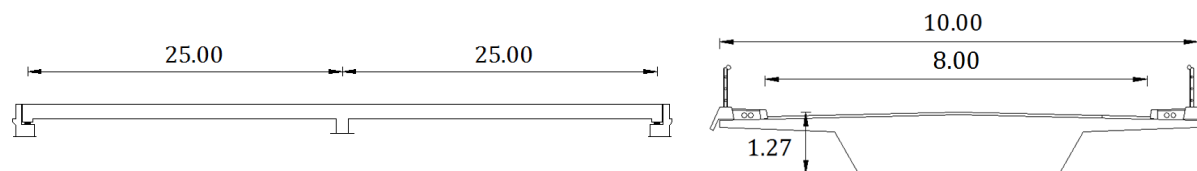


Figura 5-6 : Estrutura do caso de estudo 2

5.3.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 2, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-3. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-3 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 2

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-958	2032	-400	399
	SU	-2495	1915	-500	400
	SL + SU	-3454	3947	-899	799
	VT	-1421	2755	-579	1520
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-2060	4202	-848	1597
	LM1: UDL	-2449	1879	-490	608
	LM1: TS + UDL	-4508	6080	-1338	2205
	LM2	-862	1829	-360	970
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	3416	-787	1048
	<i>Tandem</i>	n.a.	2888	-583	797
	<i>Lane Load</i>	-1475	1132	-295	293
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	4547	-1083	1341
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	4020	-879	1089
	<i>2 × Truck</i>	-3770	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-4720	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-3743	3770	-750	840
	NA (2)	-589	1249	-246	402
	NA (1)+ NA (2)	-4332	5019	-995	1242
	NA (3)	-479	1016	-200	649
	NB 24	-2275	3320	-820	1724
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-4386	2212	-901	836
	Veículo Classe 45	-1311	2541	-534	1299
	<i>p + Veículo</i>	-5697	4754	-1435	2135

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-4 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-4 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 2

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-3454	3947	-899	1520	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-4508	6080	-1338	2205	1,31	1,54	1,49	1,45
AASHTO	-4720	4547	-1083	1341	1,37	1,15	1,20	0,88
SATCC	-4332	5019	-995	1724	1,25	1,27	1,11	1,13
ABNT	-5697	4754	-1435	2135	1,65	1,20	1,60	1,40

Os valores da tabela 5-4 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-7 a 5-10).

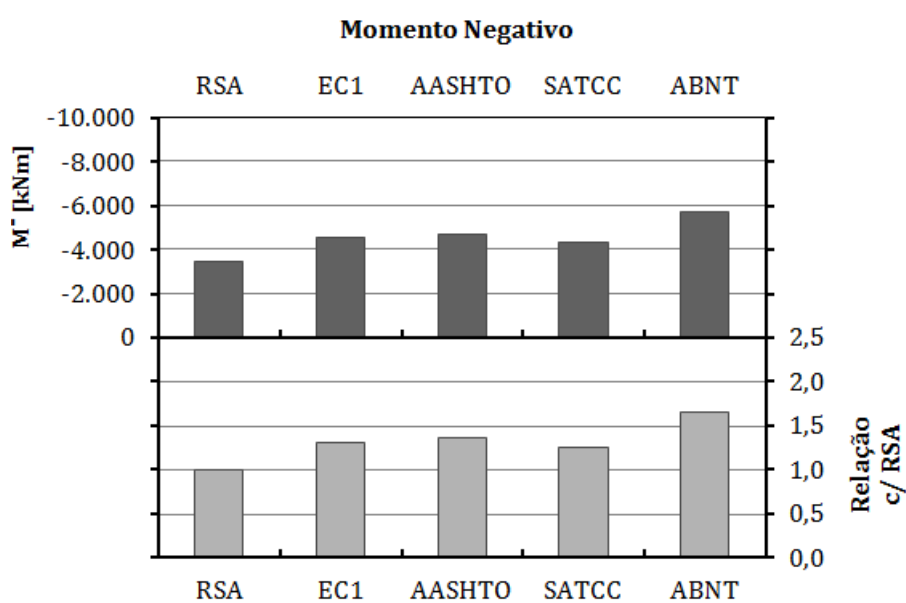


Figura 5-7 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos

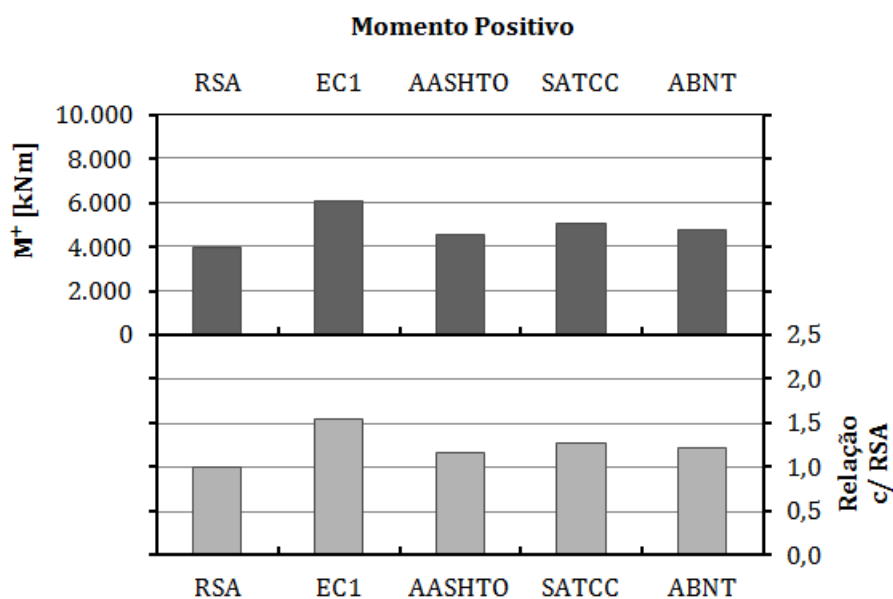


Figura 5-8 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos

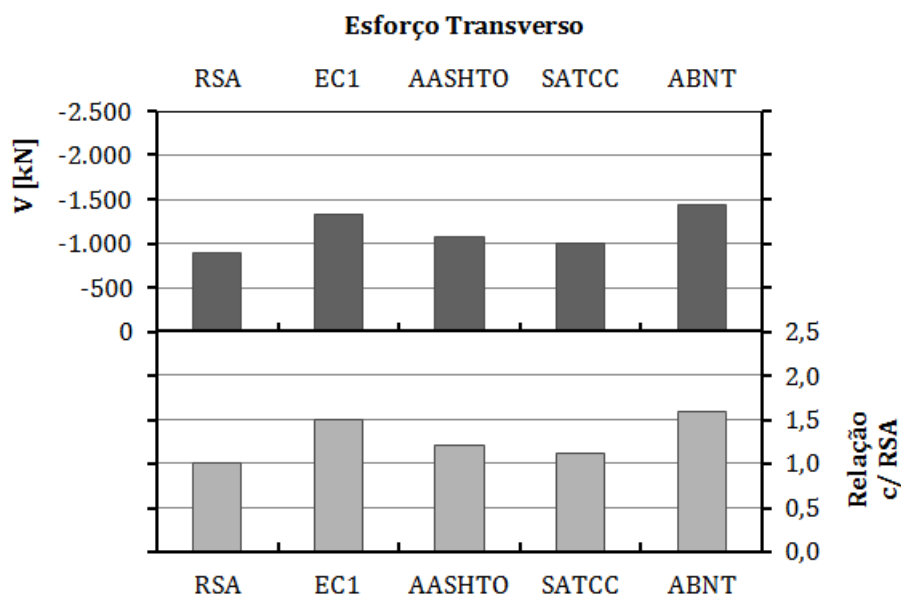


Figura 5-9 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

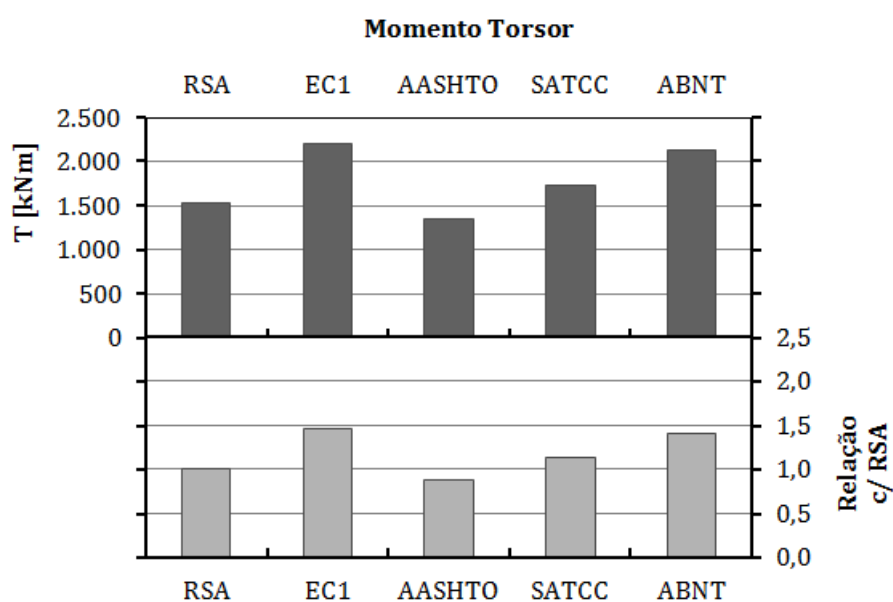


Figura 5-10 : Análise longitudinal do C.E.2 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.3.3 Comparação e discussão de resultados

Tal como no caso de estudo anterior, é o RSA que induz os esforços de menor valor. Contudo, apesar dos modelos dos regulamentos brasileiro e europeu produzirem os esforços mais elevados, a diferença de valores para o RSA já não é tão discrepante. A norma AASHTO apresenta resultados mais próximos do RSA e um pouco inferiores aos modelos de sobrecarga do regulamento sul-africano.

Tomando o RSA como referência, verifica-se que os momentos negativos gerados pelos modelos das restantes normas toma valores 31% a 65% superiores. É de salientar que percentualmente todos os modelos baixaram a sua relação do momento fletor negativo, relativamente ao caso de estudo 1.

O momento fletor positivo é o esforço que apresenta valores mais próximos entre as cinco normas. Apesar do EC1 produzir efeitos 54% superiores aos do RSA, os modelos dos restantes regulamentos geram esforços pouco mais elevados, na ordem de 20%.

O esforço transversal causado pela ABNT é o mais elevado (60% superior ao RSA), seguido do EC1 (+49%), do modelo da SATCC (+37%) e da AASHTO (+20%).

O momento torsor produzido pelo veículo do RSA é superior ao momento torsor induzido pelo modelo norte-americano. O resultado mais gravoso é o do EC1, 45% superior ao momento torsor do RSA.

As duas obras abordadas até ao momento diferenciam-se essencialmente pela largura do tabuleiro, apresentando o mesmo número e comprimento de vãos. Por esta razão é possível retirar algumas conclusões da influência do alargamento do tabuleiro através da comparação dos valores dos dois casos de estudo.

Os esforços mais elevados, em ambos os casos de estudo, devem-se, predominantemente, aos modelos do EC1 e da ABNT. Os valores referentes à SATCC são intermédios, situando-se na maioria das situações entre os valores do RSA e os do EC1 e da ABNT. Os esforços mais próximos do regulamento português são os da AASHTO, sendo, por duas vezes, um pouco inferiores.

Com o alargamento do tabuleiro, o modelo do RSA constituído pela sobrecarga uniforme e sobrecarga linear tornou-se condicionante para os momentos fletores e esforço transversal. O mesmo se verifica para o modelo NA(1)+NA(2), que se tornou o modelo condicionante do regulamento sul-africano para o esforço transversal e os momentos fletores, face ao NB 24 (sistema de cargas concentradas).

Nota-se, como referido, uma diminuição da diferença de valores entre as várias normas e o RSA. Enquanto que para a primeira obra, o momento fletor negativo produzido pela ABNT foi 118% superior ao causado pelo modelo do RSA, no segundo caso de estudo a maior diferença foi de 65%, também para o momento negativo causado pela ABNT. Da mesma maneira, o EC1, que apresentava no primeiro caso de estudo um momento negativo 72% superior, no segundo caso o valor mais gravoso foi 54% mais elevado que o do RSA. Esta diminuição está relacionada com o alargamento da secção do tabuleiro que dá primazia às cargas distribuídas nos valores dos esforços finais.

O aumento da largura do tabuleiro permite que sejam consideradas mais vias fictícias no caso dos regulamentos europeu, norte-americano e sul-africano. Contudo as sobrecargas uniformes desses regulamentos têm valor inferior à sobrecarga uniforme do RSA (4,0 kN/m²). A resultante transversal desta sobrecarga, apesar de não ter um valor superior aos das outras normas, sofreu um acréscimo maior que as dos restantes regulamentos, relativamente ao primeiro caso de estudo. Do primeiro caso de estudo para o segundo, a referida resultante da sobrecarga uniforme do RSA aumentou para o dobro, de 16,0 kN/m para 32,0 kN/m, enquanto que nos modelos das restantes normas não se verificou o mesmo. De facto, passou-se de 21,4 kN/m para 31,4 kN/m, de 11,3 kN/m para 18,9 kN/m e de 36,0 kN/m para 63,0 kN/m no EC1, AASHTO e SATCC, respetivamente.

Relativamente ao regulamento brasileiro, apesar da sobrecarga uniforme aumentar mais do que o dobro, continua a considerar apenas um veículo, produzindo este o mesmo esforço que no primeiro caso de estudo. Os restantes regulamentos consideram mais um veículo por cada via fictícia, exceto o RSA, que apesar de não considerar mais um veículo, a sobrecarga linear aumenta de valor com o alargamento da faixa de rodagem e bermas. Por estas razões é plausível que se verifique uma aproximação de resultados entre o regulamento português e as restantes normas.

5.4 Análise longitudinal do caso de estudo 3

5.4.1 Estrutura do caso de estudo 3

De modo a facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-11 a estrutura do caso de estudo 3.

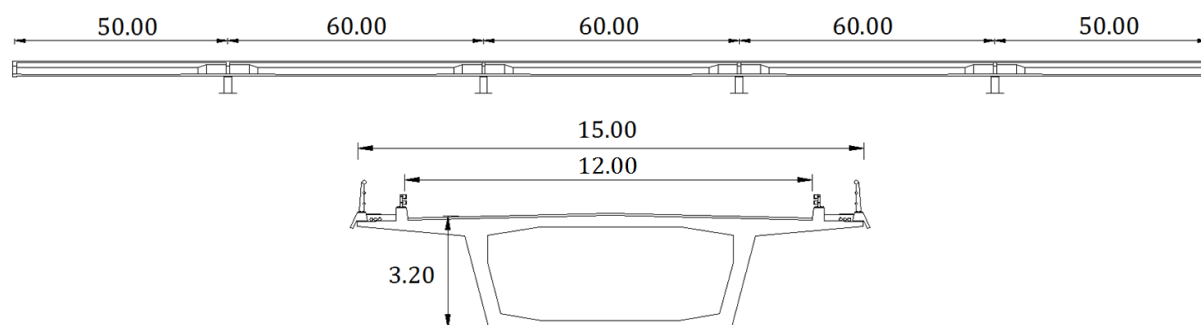


Figura 5-11 : Estrutura do caso de estudo 3

5.4.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 3, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-5. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-5 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 3

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M- [kNm]	M+ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-3198	6007	-600	899
	SU	-19545	13626	-1686	2160
	SL + SU	-22743	19633	-2286	3059
	VT	-3191	5712	-589	2754
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-5441	9910	-1013	3137
	LM1: UDL	-16857	11752	-1454	2889
	LM1: TS + UDL	-22298	21663	-2467	6026
	LM2	-1919	3604	-360	1691
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	9646	-1047	1952
	<i>Tandem</i>	n.a.	7324	-749	1403
	<i>Lane Load</i>	-11564	8062	-998	1455
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	17708	-2045	3407
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	15386	-1746	2858
	<i>2 × Truck</i>	-8842	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-18365	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-23169	20013	-1999	2922
	NA (2)	-2137	4014	-401	899
	NA (1)+ NA (2)	-25306	24027	-2400	3821
	NA (3)	-1066	2002	-200	1049
	NB 36	-5883	11676	-1346	5652
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-30540	20780	-2620	3873
	Veículo Classe 45	-2441	4370	-451	2690
	<i>p + Veículo</i>	-32981	25149	-3071	6563

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-6 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-6 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 3

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-22743	19633	-2286	3059	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-22298	21663	-2467	6026	0,98	1,10	1,08	1,97
AASHTO	-18365	17708	-2045	3407	0,81	0,90	0,89	1,11
SATCC	-25306	24027	-2400	5652	1,11	1,22	1,05	1,85
ABNT	-32981	25149	-3071	6563	1,45	1,28	1,34	2,15

Os valores da tabela 5-6 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-12 a 5-15).

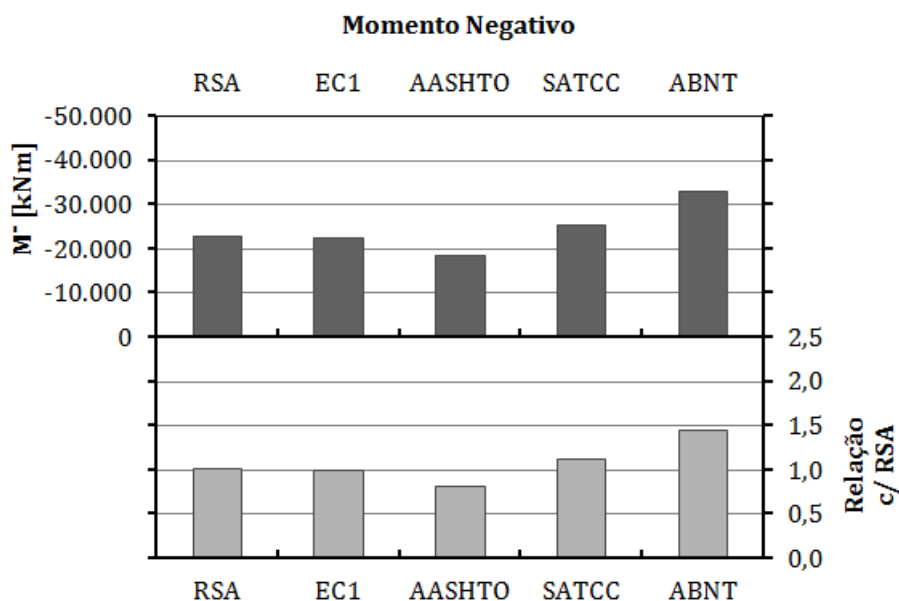


Figura 5-12 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos

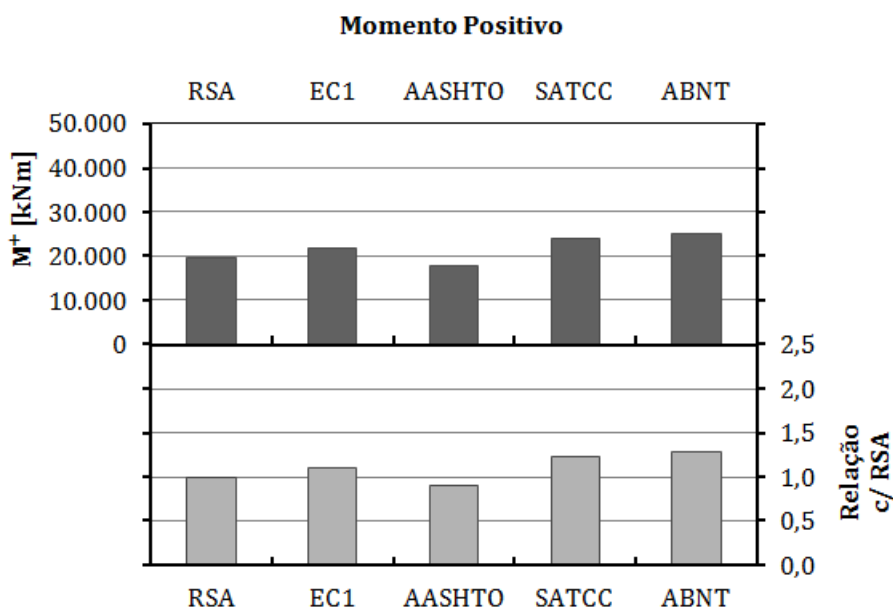


Figura 5-13 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos

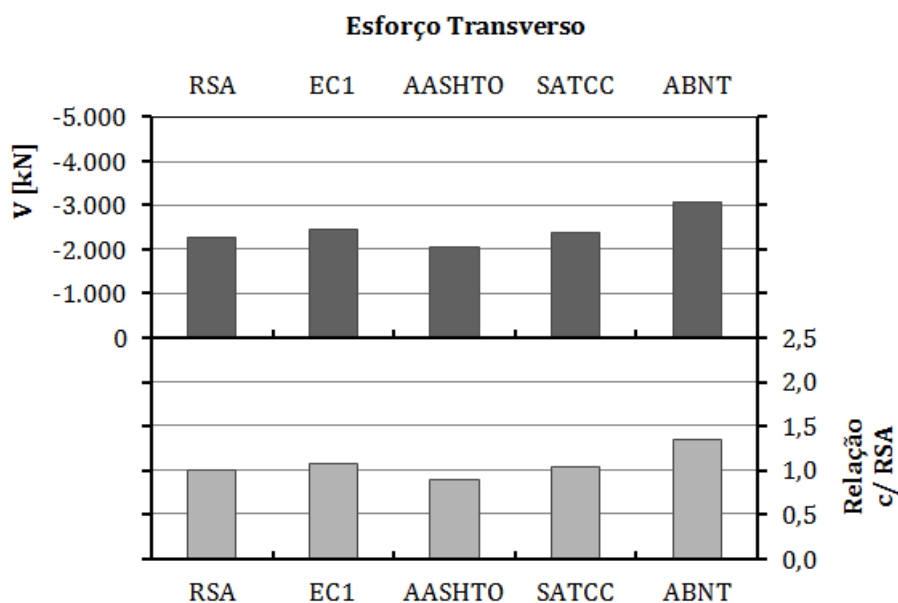


Figura 5-14 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

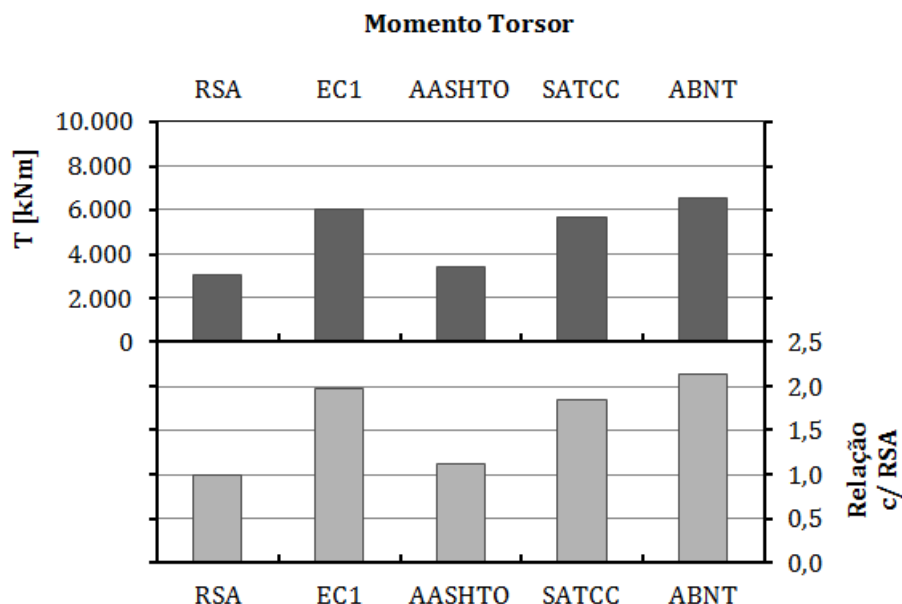


Figura 5-15 : Análise longitudinal do C.E.3 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.4.3 Comparação e discussão de resultados

Os esforços obtidos pelo regulamento português deixam de ser os de menor valor, exceto no momento torsor. A AASHTO produz esforços mais baixos para os momentos fletores e esforço transverso, em média 13% inferiores aos do RSA. Para esses mesmos esforços, o EC1 e a SATCC apresentam resultados mais próximos da norma portuguesa. Os efeitos mais graves são novamente produzidos pelo modelo de sobrecarga da ABNT.

Relativamente aos momentos fletores negativos, os resultados do RSA, do EC1 e da SATCC são muito idênticos. Em posições extremas encontram-se os regulamentos da AASHTO e da ABNT, com valores relativos ao RSA 19% inferior e 45% superior, respetivamente.

O modelo de sobrecarga da norma brasileira apresenta um valor mais próximo do RSA para o momento fletor positivo. A AASHTO é a norma menos gravosa (-10%), seguida do regulamento português, do EC1 (+10%), da SATCC (+22%) e da ABNT (+28%).

Também os esforços transversos induzidos pelo RSA, EC1 e SATCC apresentam valores muito idênticos, com uma diferença entre si nunca superior a 8%. Novamente o valor mais baixo deve-se ao modelo norte-americano e o mais elevado é inerente ao sistema da ABNT.

Os momentos torsões apresentam uma relação entre resultados diferente do que se verificou para os outros esforços. O RSA constitui o regulamento que produz os efeitos de menor valor, seguido do norte-americano (+11%). Os modelos dos restantes regulamentos produzem momentos torsões muito superiores, entre 85% a 115% mais elevados.

O terceiro caso de estudo caracteriza-se por ter um maior número de vãos e um tabuleiro mais largo que os tabuleiros anteriormente analisados. Por os vãos serem mais compridos, a secção do tabuleiro é em caixão. Estas diferenças de características levaram a uma alteração da relação de resultados. Tornou-se evidente que o regulamento norte-americano passou a ser o menos desfavorável para quase todos os esforços analisados.

O regulamento europeu apresenta valores muito mais próximos dos do RSA. Enquanto que nos casos de estudo 1 e 2, o EC1 era uma das normas mais gravosas, para vãos com 60 m o modelo de sobrecarga condicionante (*Load Model 1*) produz esforços de valores muito mais próximos do sistema SU+SL do RSA (modelo condicionante). Porém o momento torsor atinge quase o dobro do correspondente valor obtido pelo RSA.

Como foi constatado anteriormente, o aumento da largura do tabuleiro aumenta a influência das cargas distribuídas nos esforços finais, reduzindo por consequência a influência das cargas concentradas. Também o aumento do comprimento do vão dá predominância aos carregamentos distribuídos, visto que os esforços variam quadraticamente com o vão. Esta é a principal razão para que o RSA se aproxime do EC1 em termos de resultados dos momentos flectores e também do esforço transversal. Nos 12 m de faixa de rodagem e bermas, o modelo português considera uma carga distribuída de 4,0 kN/m² e uma sobrecarga linear de 50,0 kN/m, enquanto que o LM1 do EC1 considera 6,3 kN/m² apenas numa via fictícia de 3,00 m e 2,5 kN/m² nas restantes três vias, para além dos três veículos TS. Na secção transversal a sobrecarga uniforme do RSA assume um valor de 48,0 kN/m e a UDL do EC1 tem um valor de 41,4 kN/m.

No entanto os momentos torsões do EC1 são 97% superiores aos do RSA. Como no carregamento para determinar o momento torsor máximo apenas se consideram as cargas em metade da secção, a largura onde são aplicadas torna-se menor (6,00 m). Por essa razão o EC1 induz maiores cargas excêntricas distribuídas (96,3 kNm/m) que o RSA (72 kNm/m), além de que considera mais momentos concentrados estabelecidos pelos veículos TS.

Os valores da AASHTO são os mais baixos para a maioria dos esforços, pois a carga uniformemente distribuída (*Lane Load*), além de ser das que tem menor valor entre os cinco regulamentos, apenas se distribui até 3,05 m por cada via. Na secção transversal este carregamento resulta em 24,1 kN/m.

O regulamento brasileiro é o mais gravoso por duas razões, não só o valor da sobrecarga uniforme (p) é a mais elevada (5,0 kN/m²) como também esta é aplicada nas zonas dos passeios. Esses 3,00 m adicionais referentes aos passeios onde a sobrecarga é aplicada, provoca num agravamento dos esforços.

A norma sul-africana é a única que não considera cargas distribuídas em superfície, apenas cargas de faca ou concentradas. Estas cargas de faca, que variam de valor conforme o vão carregado e ocorrem em cada via fictícia, resultam em cargas distribuídas na secção transversal com valor superior à SU do RSA, provocando por essa razão esforços mais elevados.

5.5 Análise longitudinal do caso de estudo 4

5.5.1 Estrutura do caso de estudo 4

Para facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-16 a estrutura do caso de estudo 4.

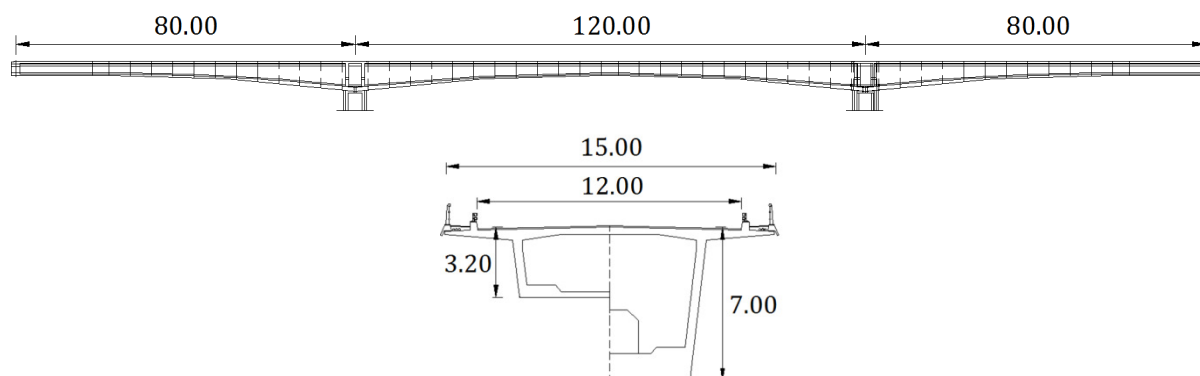


Figura 5-16 : Estrutura do caso de estudo 4

5.5.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 4, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-7. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-7 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 4

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-9783	8831	-600	900
	SU	-79865	31627	-3185	4320
	SL + SU	-89647	40458	-3785	5220
	VT	-9775	8536	-595	2805
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-16620	14711	-1017	3161
	LM1: UDL	-68883	27278	-2747	5778
	LM1: TS + UDL	-85503	41989	-3764	8939
	LM2	-5870	5296	-360	1692
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	14762	-1069	2021
	<i>Tandem</i>	n.a.	10873	-752	1414
	<i>Lane Load</i>	-47253	18713	-1885	2910
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	33474	-2953	4931
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	29586	-2636	4324
	<i>2 × Truck</i>	-11563	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-52935	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-82361	37425	-3285	5094
	NA (2)	-6536	5900	-401	900
	NA (1)+ NA (2)	-88897	43326	-3686	5994
	NA (3)	-3261	2944	-200	1050
	NB 36	-7624	18464	-1399	6009
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-123324	48159	-4910	8034
	Veículo Classe 45	-7331	6402	-446	2686
	<i>p + Veículo</i>	-130655	54561	-5356	10720

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-8 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-8 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 4

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-89647	40458	-3785	5220	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-85503	41989	-3764	8939	0,95	1,04	0,99	1,71
AASHTO	-52935	33474	-2953	4931	0,59	0,83	0,78	0,94
SATCC	-88897	43326	-3686	6009	0,99	1,07	0,97	1,15
ABNT	-130655	54561	-5356	10720	1,46	1,35	1,42	2,05

Os valores da tabela 5-8 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-17 a 5-20).

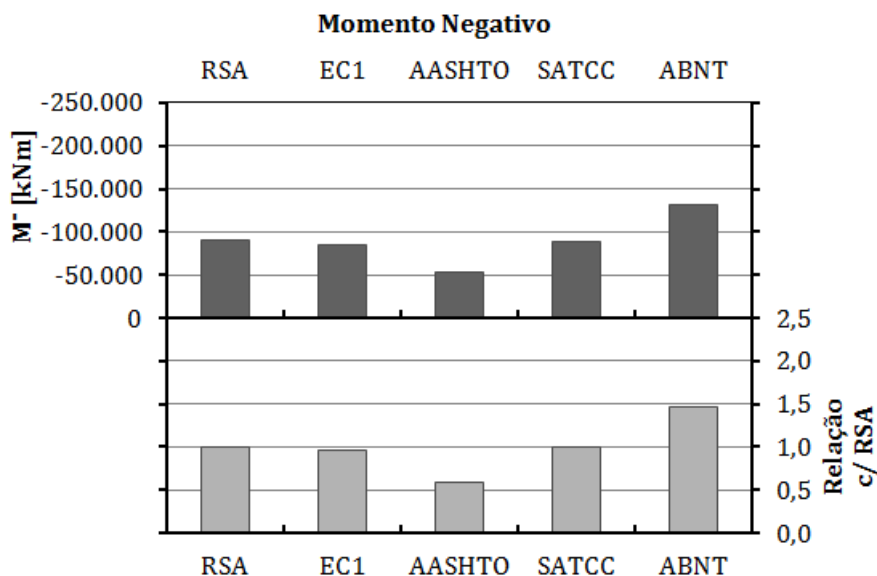


Figura 5-17 : Análise longitudinal do C.E.4 - Representação gráfica dos momentos negativos máximos

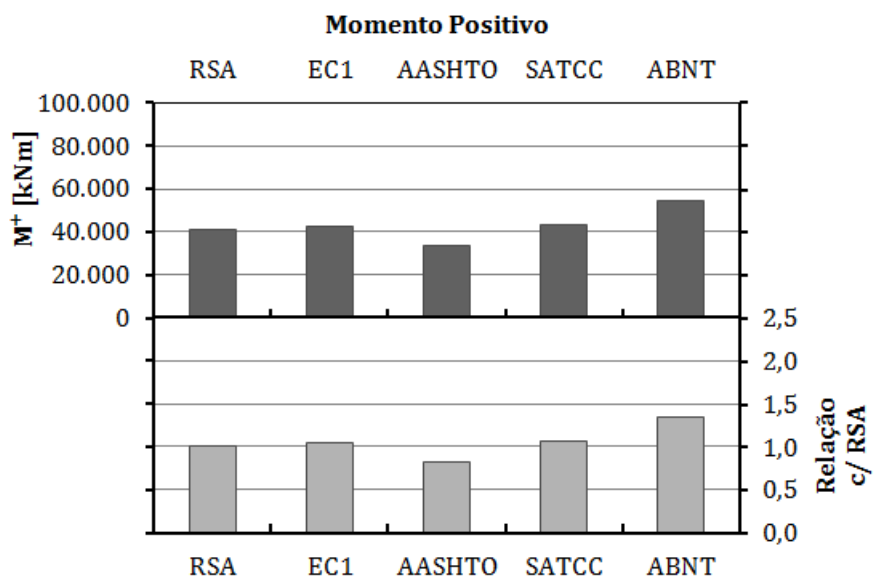


Figura 5-18 : Análise longitudinal do C.E.4 - Representação gráfica dos momentos positivos máximos

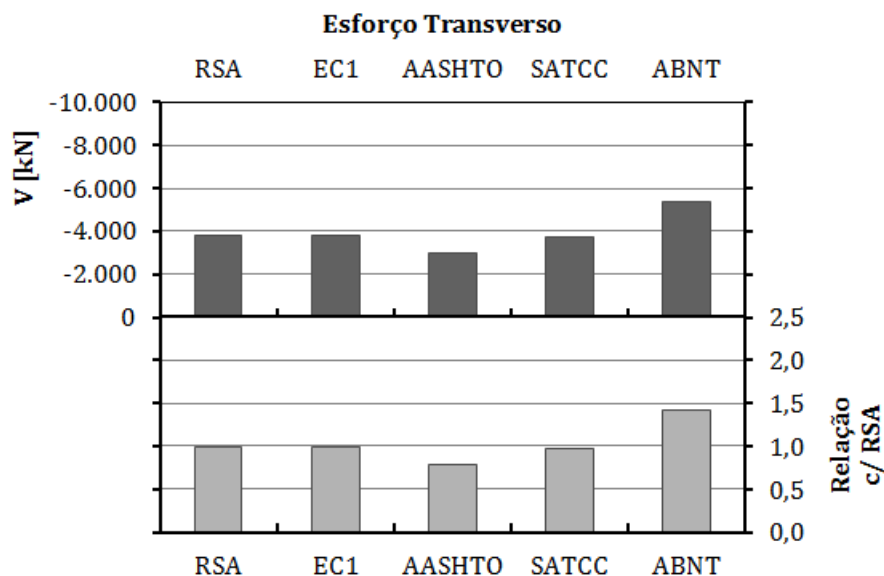


Figura 5-19 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

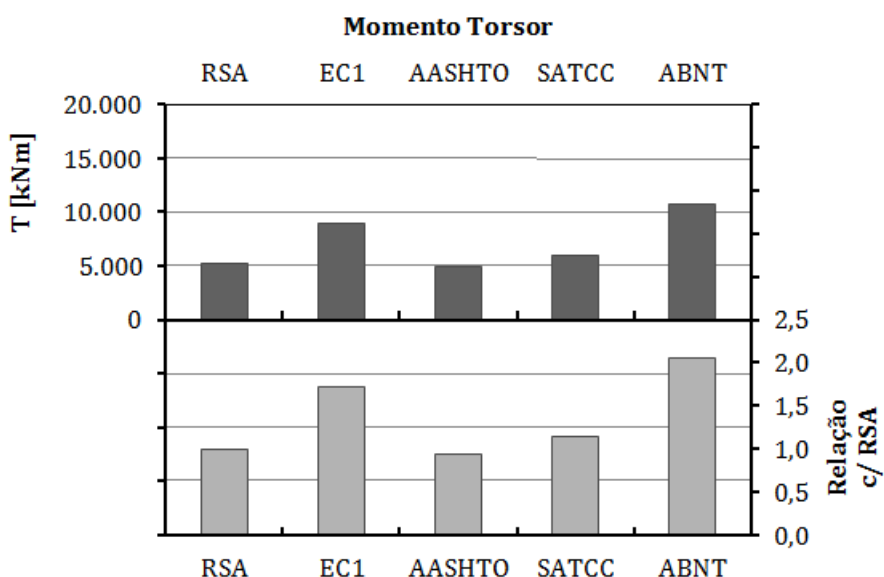


Figura 5-20 : Análise longitudinal do C.E.4 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.5.3 Comparação e discussão de resultados

A quarta obra diferencia-se do terceiro caso de estudo pela diminuição do número de vãos e o aumento dos seus comprimentos. A largura do tabuleiro mantém-se constante, 15,00 m, mas a secção em caixão tem altura variável.

O modelo condicionante do RSA (SU+SL) induz os maiores esforços, quando comparados com os restantes regulamentos. O veículo e a sobrecarga uniforme da norma brasileira volta a ser o modelo que produz os efeitos mais gravosos. O EC1 e a SATCC conduzem a resultados muito próximos enquanto que a norma norte-americana conduz aos esforços mais baixos.

No que concerne aos momentos fletores negativos, os regulamentos português, europeu e sul-africano apresentam esforços muito próximos, com uma diferença máxima de 5%. O regulamento brasileiro produz um momento fletor negativo 46% superior ao do RSA e a norma norte-americana 41% inferior.

Mais uma vez, o momento fletor positivo e o esforço transversal exibem resultados muito próximos entre o RSA, o EC1 e a SATCC (diferença máxima de 7%). O regulamento norte-americano, relativamente a esses mesmos esforços, apresenta valores cerca de 20% inferiores. O esforço transversal e o momento fletor positivo produzidos pela ABNT são mais gravosos que o RSA em 42 % e 35 %, respetivamente.

A sequência de regulamentos mais gravosos, que se tem vindo a verificar para os esforços já discutidos, não se constata para o momento torsor. O regulamento mais gravoso continua a ser o brasileiro, mas o RSA é o menos gravoso, apesar de originar momentos torsores idênticos aos da SATCC e da AASHTO. O EC1 continua a produzir momentos torsores muito maiores que os do RSA (+71%).

Pelos resultados obtidos e comparando com as conclusões referidas no caso de estudo 3, apesar dos valores dos esforços aumentarem, a relação entre os modelos condicionantes das cinco normas mantém-se. Com os resultados mais gravosos surge a ABNT, que apesar do momento torsor ser 105% mais elevado que o do RSA, os restantes esforços são, em média, superiores em 40%. A AASHTO é novamente o regulamento que produz os efeitos menos desfavoráveis na estrutura, atingindo para o momento positivo um valor 48% menor que o do RSA. Tal como no terceiro caso de estudo, também os regulamentos europeu e sul-africano se aproximam do português em termos de resultados.

Contudo o RSA ganhou ênfase na sua relação de valores com o EC1 e a SATCC, comparativamente ao anterior caso de estudo, originando mais vezes esforços superiores aos desses regulamentos. Tal é explicado pela relação quadrática que as sobrecargas uniformes têm nos momentos fletores com o comprimento do vão. O RSA tem inerente uma sobrecarga uniforme superior à do EC1, visto que este distribui 2,5 kN/m² em 9,00 m do tabuleiro e 6,3 kN/m² em apenas 3,00 m, ao passo que o RSA considera 4,0 kN/m² nos 12,00 m de largura de faixa rodagem e bermas.

No caso da SATCC, as cargas de faixa distribuídas longitudinalmente em cada via diminuem de valor com o aumento do vão carregado (através da expressão indicada na tabela 2-11). Resulta então um carregamento linear total de 49,5 kN/m (para o M⁻ e o V) e 56,9 kN/m (para o M⁺), que apesar de serem superiores ao do RSA (48,0 kN/m), apresentam um menor valor nas cargas concentradas (SATCC: 400,9 kN; RSA: 600,0 kN) levando a valores semelhantes dos esforços finais.

5.6 Análise longitudinal do caso de estudo 5

5.6.1 Estrutura do caso de estudo 5

De modo a facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-21 a estrutura do caso de estudo 5.

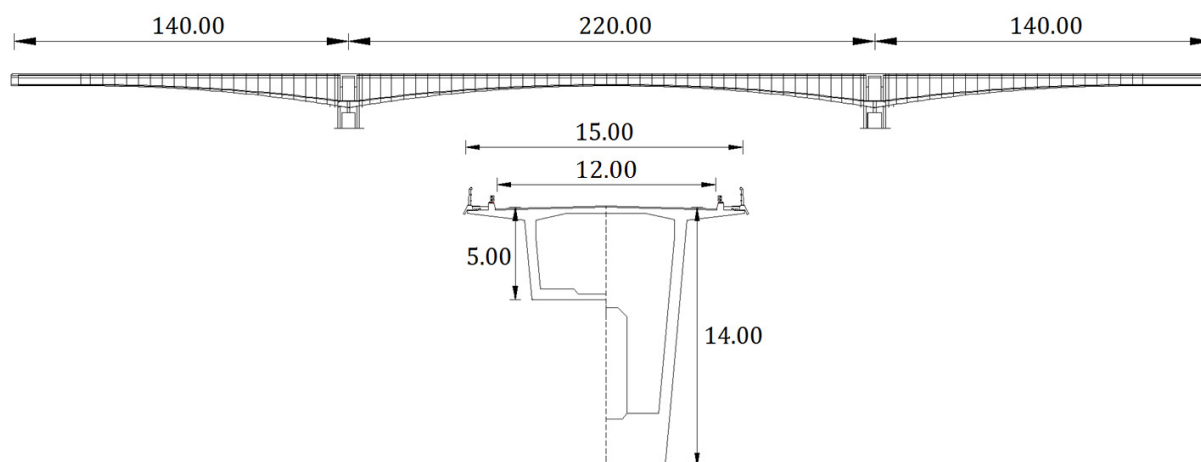


Figura 5-21 : Estrutura do caso de estudo 5

5.6.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 5, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-9. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-9 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 5

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-22893	11747	-599	839
	SU	-291924	62294	-5779	7485
	SL + SU	-314817	74041	-6379	8325
	VT	-22887	11451	-597	2624
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-38904	19667	-1017	2952
	LM1: UDL	-251784	53729	-4985	10012
	LM1: TS + UDL	-290688	73396	-6002	12963
	LM2	-13736	7048	-360	1578
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	20024	-1077	1895
	<i>Tandem</i>	n.a.	14539	-752	1320
	<i>Lane Load</i>	-172722	36858	-3419	5042
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	56882	-4496	6937
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	51396	-4172	6362
	<i>2 × Truck</i>	-11720	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-165998	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-261515	62684	-5177	7652
	NA (2)	-15296	7849	-401	839
	NA (1)+ NA (2)	-276811	70533	-5578	8491
	NA (3)	-7631	3916	-200	979
	NB 36	-7876	25429	-1420	5663
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-452699	95639	-8963	14250
	Veículo Classe 45	-17165	8588	-448	2512
	<i>p + Veículo</i>	-469864	104228	-9411	16762

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-10 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-10 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 5

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M- [kNm]	M+ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M- [kNm]	M+ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-314817	74041	-6379	8325	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-290688	73396	-6002	12963	0,92	0,99	0,94	1,56
AASHTO	-165998	56882	-4496	6937	0,53	0,77	0,70	0,83
SATCC	-276811	70533	-5578	8491	0,88	0,95	0,87	1,02
ABNT	-469864	104228	-9411	16762	1,49	1,41	1,48	2,01

Os valores da tabela 5-10 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-22 a 5-25).

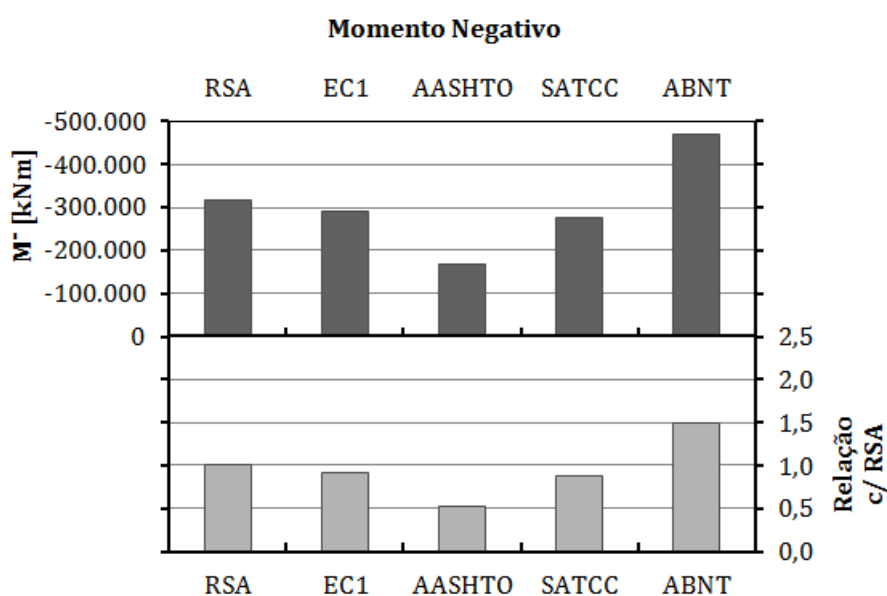


Figura 5-22 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos

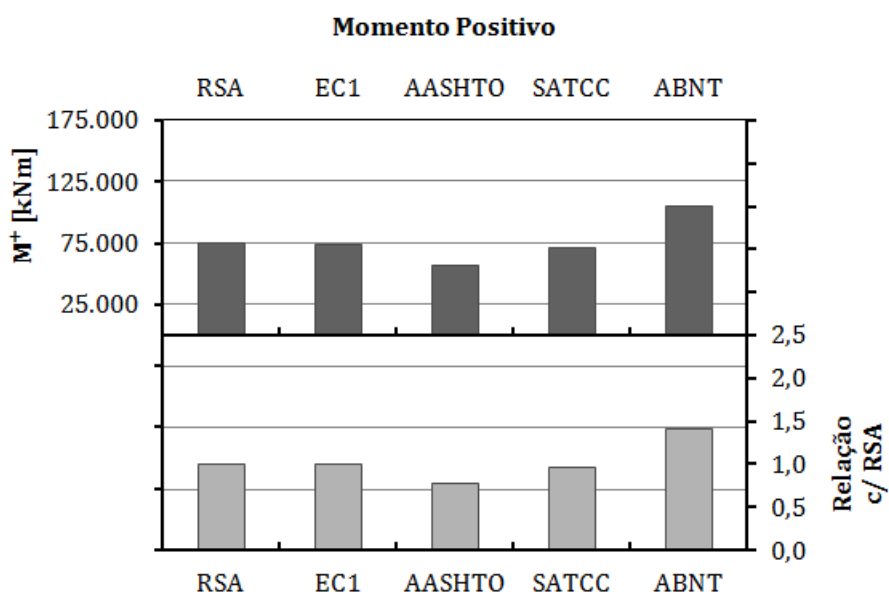


Figura 5-23 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos

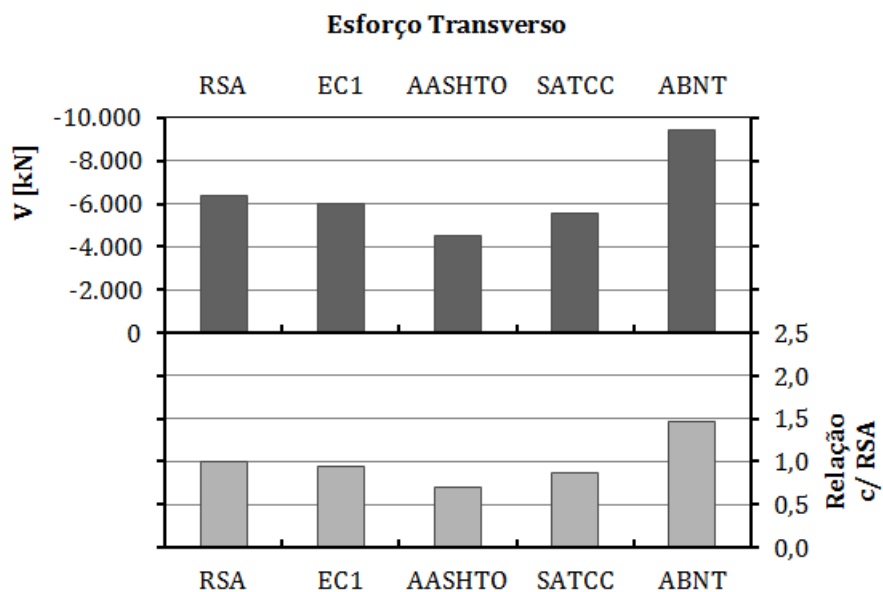


Figura 5-24 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

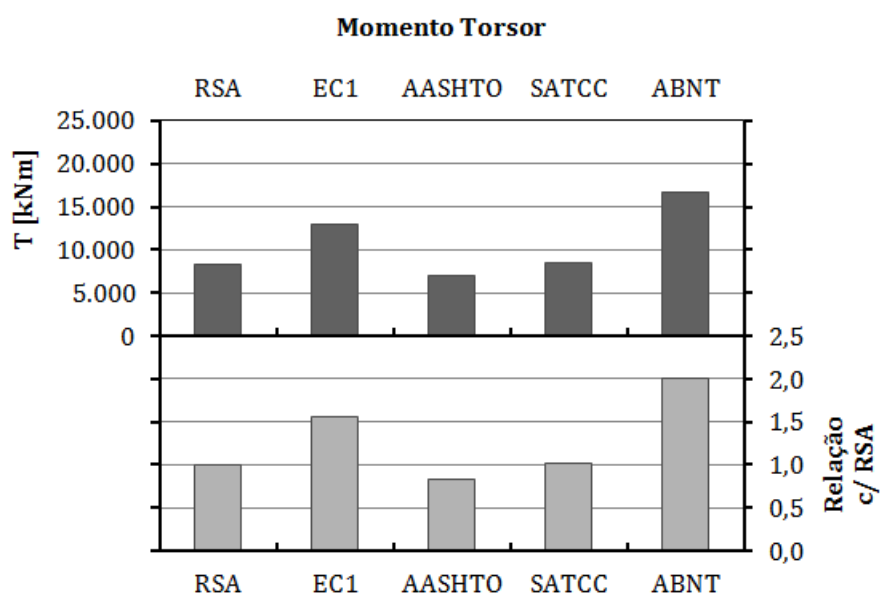


Figura 5-25 : Análise longitudinal do C.E.5 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.6.4 Comparação e discussão de resultados

O quinto caso de estudo corresponde a uma alteração na sequência dos regulamentos que provocam os efeitos mais gravosos. Enquanto que a ABNT continua a provocar os esforços mais elevados e a AASHTO ser a menos condicionante, o RSA toma sempre valores superiores aos da SATCC e do EC1 para os momentos fletores e esforço transverso. A SATCC é sempre menos gravosa que o EC1.

O momento fletor negativo da AASHTO é novamente o mais baixo, percentualmente, quando comparado com os outros esforços produzidos por este regulamento. Na ordem de 10% inferiores ao RSA encontram-se os momentos fletores negativos gerados pelos regulamentos europeu e sul-africano. O modelo de sobrecarga brasileiro origina quase o triplo do momento fletor negativo gerado pela AASHTO e 49% mais elevado que o do RSA.

Apesar do RSA conduzir a valores mais elevados nos momentos fletores e esforço transversal, continuam a estar dentro da gama dos esforços produzidos pelo EC1 e pela SATCC, onde a diferença máxima é de 13% e ocorre entre o transversal do RSA e da SATCC. O momento positivo da AASHTO é 23% inferior ao do RSA, contrastando com a hegemonia da norma brasileira, que assume um resultado 41% superior ao do regulamento português. Também os esforços transversos produzidos pela AASHTO e pela ABNT assumem percentagens idênticas às do momento positivo, 30% inferior e 48% superior, respetivamente.

Os momentos torsões distinguem-se mais uma vez da sequência que se tem verificado nos restantes esforços. O momento torsão do regulamento português é dos mais baixos, sendo superior apenas ao momento torsão da AASHTO. O modelo de sobrecarga do regulamento sul-africano origina também valores muito próximos do RSA, apenas 2% superiores. O EC1 produz um esforço 56% mais elevado enquanto que a ABNT continua a causar o dobro de momentos torsões, tomando o RSA como referência.

O presente caso de estudo apenas varia no comprimento dos seus 3 vãos relativamente ao caso de estudo anterior, mantendo uma largura de tabuleiro igual a 15,00 m. O aumento do comprimento dos vãos levou a um destacamento do RSA nos momentos fletores e nos esforços transversos, face ao EC1 e à SATCC. Esta observação é justificada novamente pela influência que as sobrecargas distribuídas têm em tabuleiros largos e em vãos mais extensos. Como já constatado nos subcapítulos anteriores, a sobrecarga uniforme do RSA é superior à da AASHTO e à do EC1, e o facto de aumentar o comprimento do vão, amplificou mais os esforços produzidos pelo regulamento português relativamente às outras duas normas.

Salienta-se também uma redução percentual dos esforços causados pela SATCC, tornando-se sempre inferiores aos efeitos produzidos pelo EC1. Apesar de não ocorrer nenhum alargamento do tabuleiro entre os casos de estudo 3, 4 e 5, as sobrecargas de face do regulamento sul-africano diminuíram de valor visto que o vão carregado foi aumentando e as cargas diminuíam de valor com o comprimento do vão.

Observa-se ainda que o momento fletor negativo devido à AASHTO reduz-se mais, percentualmente, que os restantes esforços produzidos por este regulamento. Tal deve-se ao modelo de sobrecarga utilizado especificamente na análise deste esforço, pois apesar de aplicar dois subsistemas *Truck* em conjunto com o subsistema *Lane Load*, apenas se consideram 90% dos efeitos por eles causados. Para o momento fletor positivo, o momento torsão e o esforço transversal consideram-se a totalidade dos esforços causados pela *Lane Load* em conjunto com um subsistema *Truck* ou *Tandem*. Tendo em conta a influência das sobrecargas distribuídas nos esforços totais, por esta razão o momento fletor negativo é muito menor que o do RSA (55% inferior), face aos outros tipos de esforços (na ordem de 30% inferiores).

5.7 Análise longitudinal do caso de estudo 6

5.7.1 Estrutura do caso de estudo 6

Para facilitar a análise de resultados, apresenta-se na figura 5-26 a estrutura do caso de estudo 6.

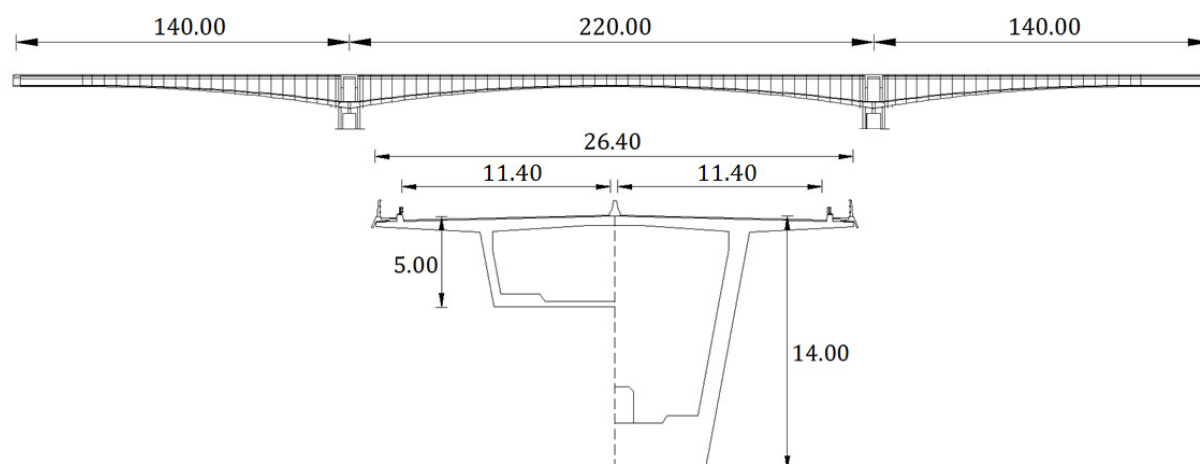


Figura 5-26 : Estrutura do caso de estudo 6

5.7.2 Apresentação de resultados

Os valores máximos dos esforços longitudinais do caso de estudo 6, devidos a todos os sistemas de sobrecargas considerados no presente trabalho, apresentam-se na tabela 5-11. Para cada sistema de sobrecargas são apresentados os efeitos devidos aos submodelos e aos modelos (destacados a cinzento).

Tabela 5-11 : Esforços máximos longitudinais do caso de estudo 6

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	M- [kNm]	M+ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA (Português)	SL	-44141	21750	-1139	3238
	SU	-558423	113715	-10980	28743
	SL + SU	-602564	135464	-12119	31981
	VT	-46452	22304	-776	5893
EC1 (Europeu)	LM1: TS	-78959	38316	-1326	8310
	LM1: UDL	-488620	99500	-9608	30160
	LM1: TS + UDL	-567579	137816	-11642	38470
	LM2	-13939	6868	-360	3542
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck</i>	n.a.	29801	-1647	5237
	<i>Tandem</i>	n.a.	21662	-1150	3645
	<i>Lane Load</i>	-347177	70698	-6827	18980
	<i>Truck + Lane Load</i>	n.a.	100499	-8473	24218
	<i>Tandem + Lane Load</i>	n.a.	92359	-7977	22625
	<i>2 × Truck</i>	-17819	n.a.	n.a.	n.a.
	<i>90% 2 × Truck + Lane Load</i>	-328497	n.a.	n.a.	n.a.
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)	-458005	102742	-9006	25205
	NA (2)	-31046	15297	-801	2739
	NA (1)+ NA (2)	-489051	118040	-9807	27944
	NA (3)	-7744	3816	-200	2072
	NB 36	-7840	24717	-1420	13473
ABNT (Brasileiro)	<i>p</i>	-786391	159195	-15464	35265
	Veículo Classe 45	-17419	8364	-448	4228
	<i>p + Veículo</i>	-803811	167559	-15912	39493

n.a. : não aplicável

Na tabela 5-12 indicam-se os resultados dos esforços condicionantes de cada regulamento, bem como a razão com os valores condicionantes do regulamento português (RSA).

Tabela 5-12 : Esforços longitudinais condicionantes de cada regulamento e sua relação com os esforços do RSA - Caso de estudo 6

Regulamentos	Valores máximos				Relação com o RSA			
	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]	M ⁻ [kNm]	M ⁺ [kNm]	V [kN]	T [kNm]
RSA	-602564	135464	-12119	31981	1,00	1,00	1,00	1,00
EC1	-567579	137816	-11642	38470	0,94	1,02	0,96	1,20
AASHTO	-328497	100499	-8473	24218	0,55	0,74	0,70	0,76
SATCC	-489051	118040	-9807	27944	0,81	0,87	0,81	0,87
ABNT	-803811	167559	-15912	39493	1,33	1,24	1,31	1,23

Os valores da tabela 5-12 são apresentados, de seguida, em forma gráfica (Figuras 5-27 a 5-30).

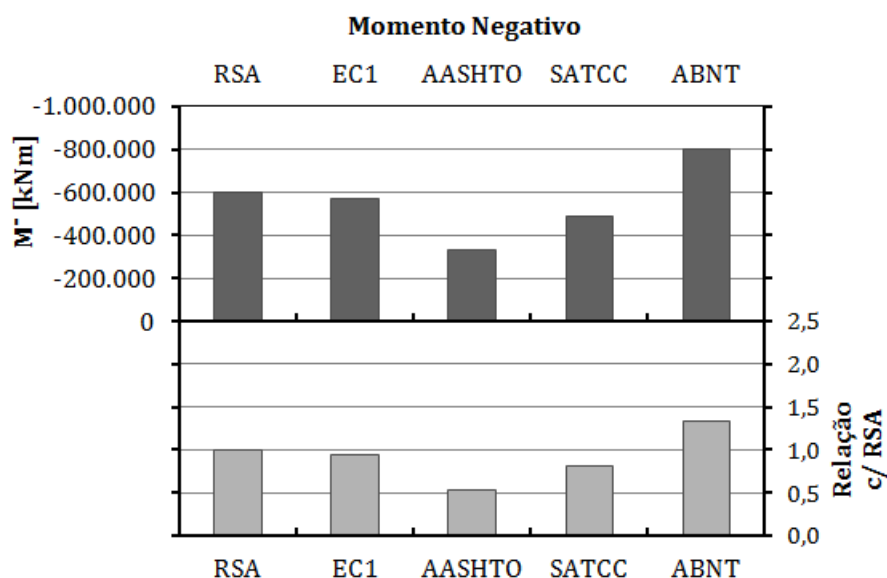


Figura 5-27 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos negativos máximos

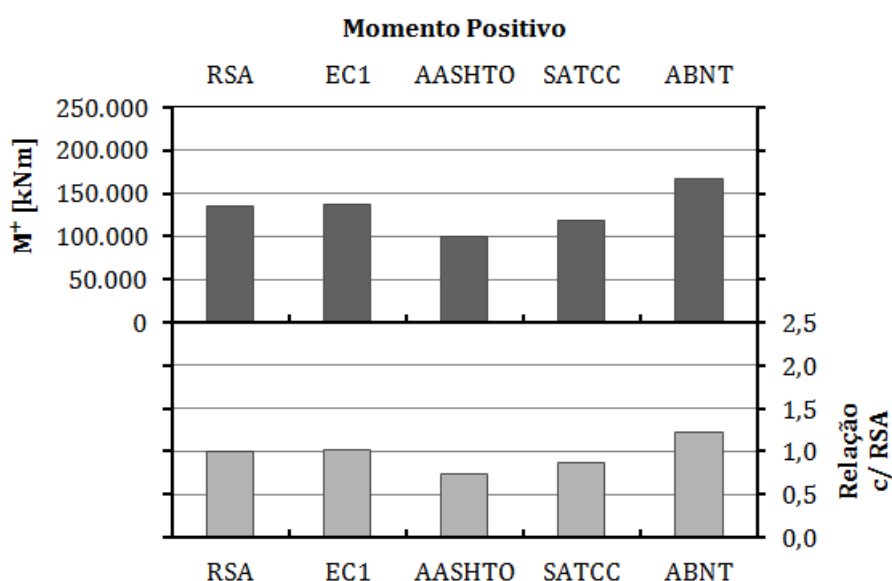


Figura 5-28 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos positivos máximos

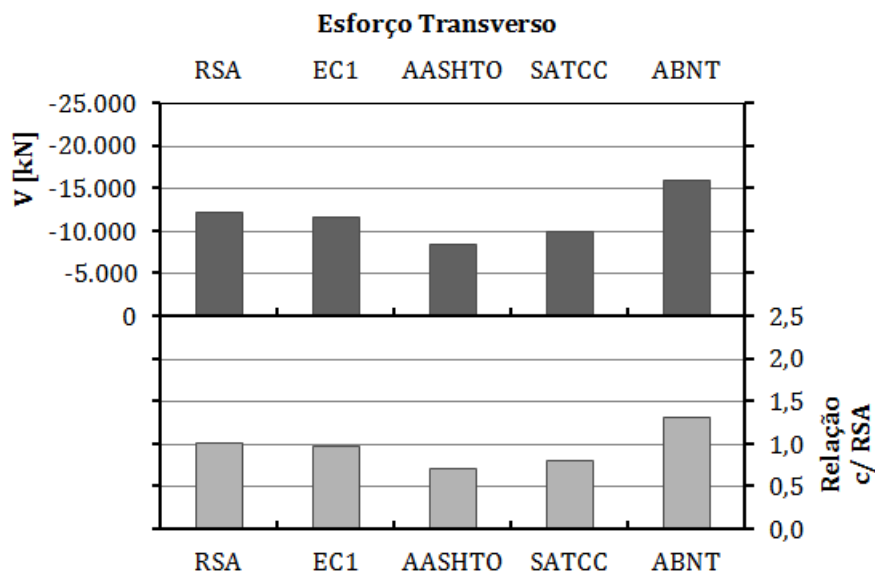


Figura 5-29 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos esforços transversos máximos

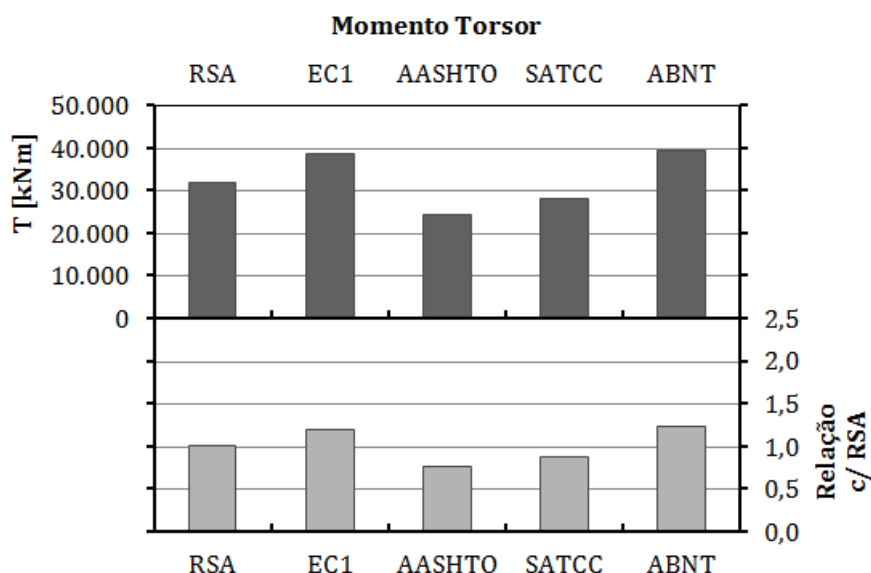


Figura 5-30 : Análise longitudinal do C.E.6 – Representação gráfica dos momentos torsores máximos

5.7.3 Comparação e discussão de resultados

Para a última obra analisada verifica-se uma aproximação dos valores dos esforços entre o RSA e o EC1, que logo após o regulamento brasileiro, são as normas mais desfavoráveis. A SATCC produz efeitos mais condicionantes que a AASHTO, que continua a ser a norma menos gravosa.

O momento negativo da ABNT é aproximadamente quatro vezes superior ao momento negativo gerado pelo regulamento norte-americano. Para esse mesmo esforço, o valor do EC1 é 6% inferior ao do RSA. A SATCC e a AASHTO geram momentos fletores negativos 19% e 45% menores que o do RSA, respetivamente.

Para os momentos fletores positivos, o EC1 induz efeitos muito semelhantes ao RSA, enquanto que a SATCC e a AASHTO apresentam uma diferença de 13%. O momento positivo do regulamento brasileiro origina um esforço 24% mais elevado que o RSA.

A sequência das normas que produzem os efeitos mais gravosos no esforço transversal é igual às dos momentos negativos. Mais uma vez a ABNT origina o maior esforço transversal (+31%), seguida do RSA, do EC1 (-4%), da SATCC (-19%), e da AASHTO (-30%). A única alteração que se verifica nessa sequência, em relação aos momentos torsões, refere-se ao valor gerado pelo EC1, que é 20% superior ao do RSA e muito próximo do momento torsor que a ABNT produz.

Do quinto para o sexto caso de estudo verifica-se o alargamento do tabuleiro, passando de 15,00 m para 26,40 m, mantendo-se o número e comprimento dos vãos, o que permite realizar uma comparação mais direta dos resultados entre as duas obras.

Como tem vindo a ser referido, o alargamento das secções do tabuleiro dá ênfase à influência das sobrecargas distribuídas nos valores dos esforços finais. Esse alargamento induziu, por parte do EC1, da SATCC e da AASHTO, o aumento do número de vias fictícias. Porém, apesar do regulamento sul-africano passar a considerar um maior número de cargas de faixa, o valor de cada uma é menor, resultando numa carga distribuída total de 74,8 kN/m (para o M⁻ e para o V) e 82,4 kN/m (para o M⁺), de valor inferior à carga distribuída do RSA (91,2 kN/m). De valor ainda mais baixo é a *Lane Load* da AASHTO, 36,9 kN/m. Em contraste surge a sobrecarga distribuída da ABNT, que é quase quatro vezes superior à da AASHTO, tomando um valor de 129,0 kN/m.

O tabuleiro deste caso de estudo apresenta uma particularidade, dado que a existência de um separador central entre as faixas de rodagem implica que, no caso do EC1, sejam consideradas duas sobrecargas uniformes (UDL) com valor de 6,3 kN/m², uma por faixa. Visto que nos anteriores casos de estudo não existia nenhuma barreira física a separar as faixas de rodagem, o EC1 considerou o carregamento de uma das vias com o valor de 6,3 kN/m² e as restantes com 2,5 kN/m², resultando, nos casos de estudo 3, 4 e 5, numa sobrecarga distribuída menor que a do RSA. No caso de estudo 6, a sobrecarga distribuída do EC1 é de 79,8 kN/m. Apesar de ser inferior à do RSA, a diferença não é significativa visto que os resultados dos momentos fletores positivo e negativo e esforço transversal são, para este caso de estudo, muito semelhantes.

Conclui-se assim que, em tabuleiros muito largos e vãos extensos, o RSA induz esforços mais desfavoráveis nas estruturas que a SATCC e a AASHTO. O regulamento brasileiro produz os efeitos mais gravosos, dada a intensidade da sobrecarga uniforme e por ser a única norma que considera a ação dessa carga nas zonas dos passeios. Em tabuleiros muito largos, com a existência de um separador central, o EC1 gera momentos fletores e esforços transversos muito idênticos aos do RSA. Porém, antevê-se que, caso o tabuleiro não contenha nenhuma barreira física entre faixas de rodagem, esses esforços induzidos pelo regulamento europeu sejam significativamente menores que os do RSA.

Capítulo 6

Apresentação e discussão de resultados da análise transversal

6.1 Considerações gerais

Após uma comparação de esforços da análise na direção longitudinal, procede-se neste capítulo ao estudo comparativo dos efeitos produzidos pelos diferentes sistemas de sobrecarga na direção transversal, no que respeita aos momentos fletores máximos na laje da plataforma.

Dos seis casos de estudo abordados no presente trabalho, os tabuleiros das pontes dos casos de estudo 3, 4 e 5 são de largura igual (15,00 m). Essa característica comum entre os três tabuleiros não justifica a necessidade de se realizar uma comparação de efeitos transversais entre eles. Por outro lado, o sexto tabuleiro, com largura de 26,40 m, é muito mais largo que os restantes, tornando-se conveniente averiguar se esse alargamento tem alguma influência nos efeitos produzidos pelos modelos de sobrecarga condicionantes de cada regulamento. Optou-se então por se realizar uma análise transversal dos esforços para os casos de estudo 3 e 6, não só por terem secções com diferentes larguras, mas também por serem os tabuleiros em caixão que maior diferença apresentam na direção longitudinal.

As duas pontes foram modeladas tridimensionalmente com recurso ao programa de elementos finitos SAP2000®, considerando elementos de casca para a definição de toda a geometria. Esses elementos contemplam as diferentes espessuras nas várias zonas das secções, com o intuito de simular a variação das espessuras dos banzos e das almas que ocorrem ao longo da extensão dos tabuleiros. Os modelos de elementos finitos foram carregados com os diferentes sistemas de sobrecarga definidos nos capítulo 2, com o objetivo de estudar os momentos fletores negativos na secção de apoio sobre as almas e o momento fletor positivo máximo na laje intermédia. Essa três secções foram analisadas em duas secções longitudinais diferentes, na secção de apoio sobre os pilares e na secção de meio vão dos tabuleiros. Os resultados são fornecidos em forma de tabelas e de gráficos para cada caso de estudo.

A elaboração dos modelos numéricos é morosa e exige um esforço de cálculo computacional considerável. Por essa razão interessa verificar se os resultados numéricos diferem muito dos esforços obtidos pelo carregamento de superfícies de influência, um método aproximado mas mais expedito. Essa comparação permite também detetar possíveis erros na elaboração dos modelos de elementos finitos ou na aplicação das sobrecargas, pelo que foi realizado um estudo dos esforços obtidos por estas duas abordagens.

Os esquemas de carregamento dos modelos de sobrecarga nas superfícies de influência, considerados na análise dos terceiro e sexto casos de estudo, são apresentados em anexo (A2 – Esquemas dos carregamentos da análise transversal).

6.2 Análise transversal do caso de estudo 3

6.2.1 Características do modelo de elementos finitos

O tabuleiro do caso de estudo 3, apresentado anteriormente no capítulo 4, foi modelado tridimensionalmente com elementos de casca, com recurso ao programa de elementos finitos SAP2000®, em regime elástico linear. Os elementos são de 4 nós e na sua maioria têm dimensões aproximadamente de 1,00 m por 1,00 m. Nas secções onde foram aplicadas as cargas houve necessidade de distorcer a malha para compatibilizar os elementos, procurando-se manter os elementos quadrangulares, uniformes e em malhas simétricas, de maneira a garantir a qualidade dos resultados. As variações das espessuras da consola, dos banzos e das almas foram consideradas através da atribuição de diferentes espessuras aos elementos que os constituem.

As figuras 6-1 a 6-3 apresentam várias vistas globais do modelo de elementos finitos desenvolvido para a análise transversal do tabuleiro do terceiro caso de estudo.

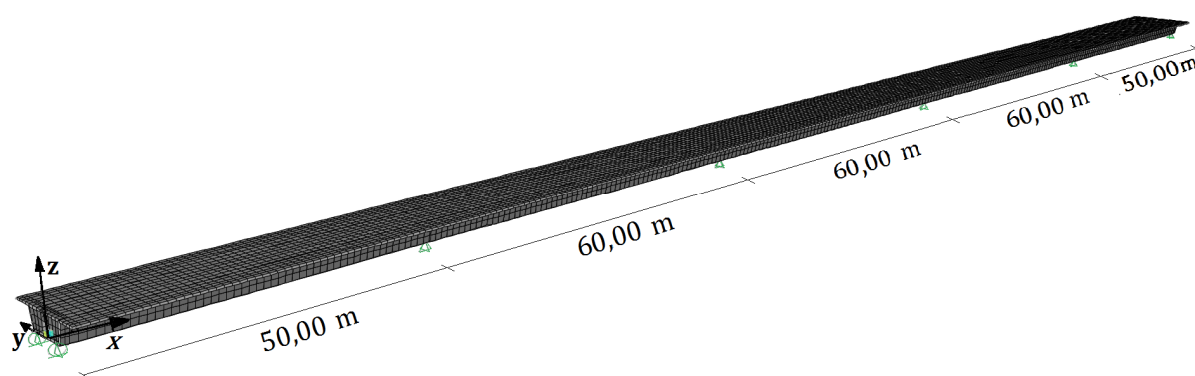


Figura 6-1 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva global

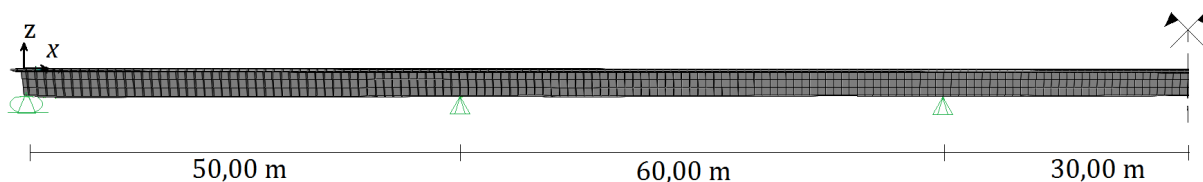


Figura 6-2 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Vista lateral

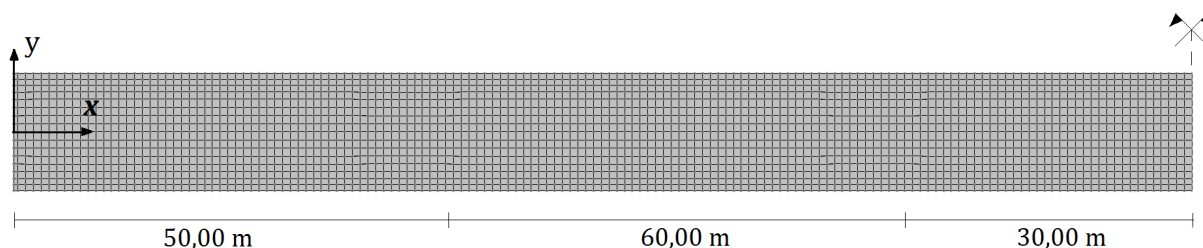


Figura 6-3 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Vista em planta da laje de plataforma

Os nós de apoio nos encontros e nos pilares coincidem com as posições do eixo dos aparelhos de apoio da secção representada anteriormente na figura 4-10. Os apoios nos pilares restringem todos os deslocamentos e permitem todas as rotações. Nos encontros, os nós de apoio restringem apenas os deslocamentos em y e z .

Na figura 6-4 representa-se um dos vãos extremos, incluindo os apoios na secção do encontro, à esquerda, e os apoios no pilar, à direita.

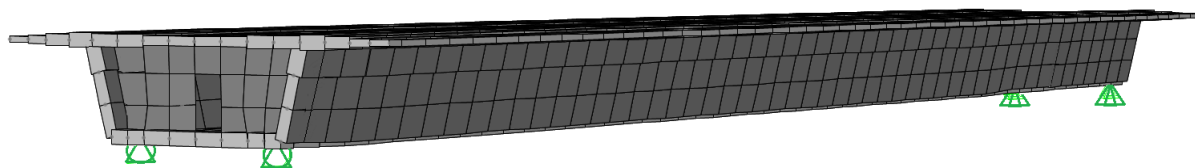


Figura 6-4 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva dos vãos extremos

Os vãos centrais, situados entre pilares, apoiam através de dois apoios fixos, conforme indica a figura 6-5.

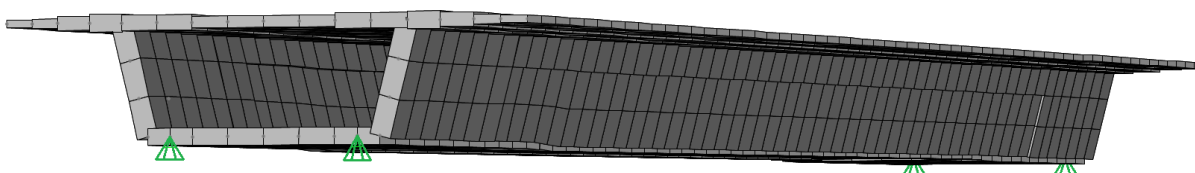


Figura 6-5 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Perspetiva dos vãos intermédios (diafragmas não representados)

Os elementos de casca têm espessura variável, para simular a variação das espessuras na secção transversal. A consola foi discretizada em 4 elementos com espessuras diferentes, como se pode visualizar nas figuras 6-6 e 6-7. As variações que ocorrem na alma e no banzo inferior também foram consideradas.

Foram analisados os momentos máximos negativos da consola (S1) e da laje (S2) e o momento máximo positivo da laje (S3), nas secções junto ao apoio nos pilares e a meio vão do tramo central. Nas figuras 6-6 e 6-7 estão indicadas as secções transversais do tabuleiro analisadas.

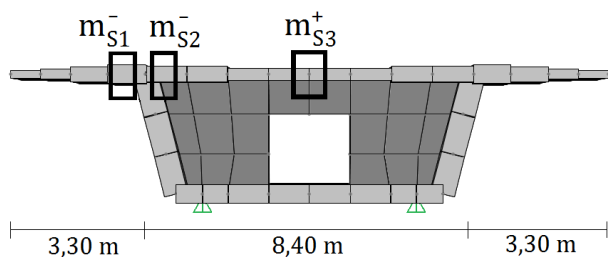


Figura 6-6 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção de apoio com diafragma

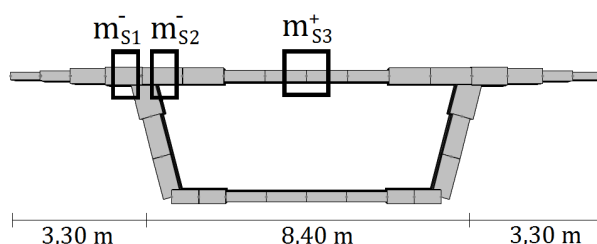


Figura 6-7 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção corrente dos vãos

Os diafragmas, localizados nas secções de apoio foram igualmente simulados com elementos de casca, como se pode observar nas figuras 6-6 e 6-8. Os elementos que constituem o diafragma no encontro têm uma espessura de 1,00 m, enquanto que os diafragmas nas secções junto aos pilares têm uma espessura de 0,80 m.

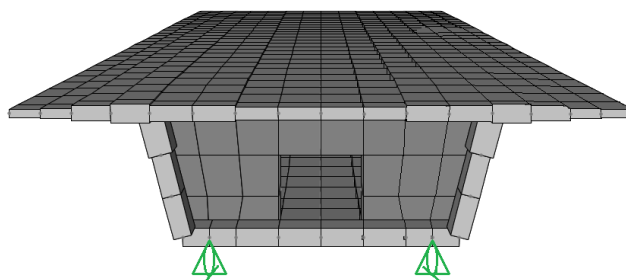


Figura 6-8 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 3. Secção de apoio nos encontros

Devido à existência do diafragma na secção de apoio dos pilares, os momentos flectores na laje na direcção transversal são quase nulos, mas a uma distância de cerca de meia largura do caixão, o momento negativo

na secção de apoio nas almas deverá ser elevado. Contudo, optou-se por desligar, no modelo de elementos finitos, os elementos do diafragma e os elementos da laje, mantendo o diafragma ligado apenas às almas. Desta forma pretende-se obter uma envolvente de esforços transversais para a situação de máximo encastramento da laje nas almas.

6.2.2 Resultados do modelo de elementos finitos

Do modelo de elementos finitos extrairam-se os valores máximos dos momentos fletores negativos, na consola e na laje, e os valores do momento máximo positivo na laje intermédia, na secção de apoio nos pilares e de meio vão do tramo central.

Por se tratar de uma análise transversal, a distribuição dos esforços varia consoante o tipo de carga aplicada, podendo os efeitos máximos correspondentes a cada subsistema de sobrecarga situarem-se em pontos diferentes do tabuleiro. Por essa razão não interessa determinar o efeito máximo de cada subsistema de sobrecarga, mas sim o efeito máximo produzido pela totalidade do modelo. Os valores resultantes da análise transversal constam na tabela 6-1.

Tabela 6-1 : Momentos fletores máximos transversais do caso de estudo 3

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	Secção de ½ vão			Secção de apoio		
		m_{s1}^- [kNm/m]	m_{s2}^- [kNm/m]	m_{s3}^+ [kNm/m]	m_{s1}^- [kNm/m]	m_{s2}^- [kNm/m]	m_{s3}^+ [kNm/m]
RSA (Português)	SL + SU	-38,0	-81,5	33,0	-46,4	-108,5	31,3
	VT	-78,2	-103,0	57,6	-94,8	-130,5	55,9
EC1 (Europeu)	LM1: TS + UDL	-103,6	-186,8	98,2	-114,6	-244,6	93,6
	LM2	-75,2	-89,8	63,0	-77,6	-110,9	61,5
AASHTO (Norte- -Americano)	<i>Truck + L.L.</i>	-37,6	-84,1	39,4	-44,8	-109,8	38,3
	<i>Tandem + L.L.</i>	-46,4	-98,1	38,2	-53,0	-121,6	37,2
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-54,8	-102,2	53,4	-60,8	-129,4	50,6
	NA (3)	-71,1	-52,0	35,3	-82,2	-63,4	34,4
	NB 36	-64,0	-115,9	59,5	-77,6	-164,0	56,9
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-72,0	-95,8	50,7	-91,3	-126,1	50,1

Nas tabelas 6-2 e 6-3 apresentam-se os esforços condicionantes de cada regulamento e as suas relações com os esforços do RSA.

Tabela 6-2 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de ½ vão, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 3

SECÇÃO DE ½ vão						
Regulamentos	Valores máximos			Relação com RSA		
	m_{s1}^- [kNm/m]	m_{s2}^- [kNm/m]	m_{s3}^+ [kNm/m]	m_{s1}^- [kNm/m]	m_{s2}^- [kNm/m]	m_{s3}^+ [kNm/m]
RSA	-78,2	-103,0	57,6	1,00	1,00	1,00
EC1	-103,6	-186,8	98,2	1,32	1,81	1,70
AASHTO	-46,4	-98,1	39,4	0,59	0,95	0,68
SATCC	-71,1	-115,9	59,5	0,91	1,13	1,03
ABNT	-72,0	-95,8	50,7	0,92	0,93	0,88

Tabela 6-3 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de apoio, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 3

SECÇÃO DE APOIO						
Regulamentos	Valores máximos			Relação com RSA		
	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]
RSA	-94,8	-130,5	55,9	1,00	1,00	1,00
EC1	-114,6	-244,6	93,6	1,21	1,87	1,67
AASHTO	-53,0	-121,6	38,3	0,56	0,93	0,68
SATCC	-82,2	-164,0	56,9	0,87	1,26	1,02
ABNT	-91,3	-126,1	50,1	0,96	0,97	0,90

A informação das tabelas 6-2 e 6-3 ilustra-se de seguida em forma gráfica (Figuras 6-9 a 6-11).

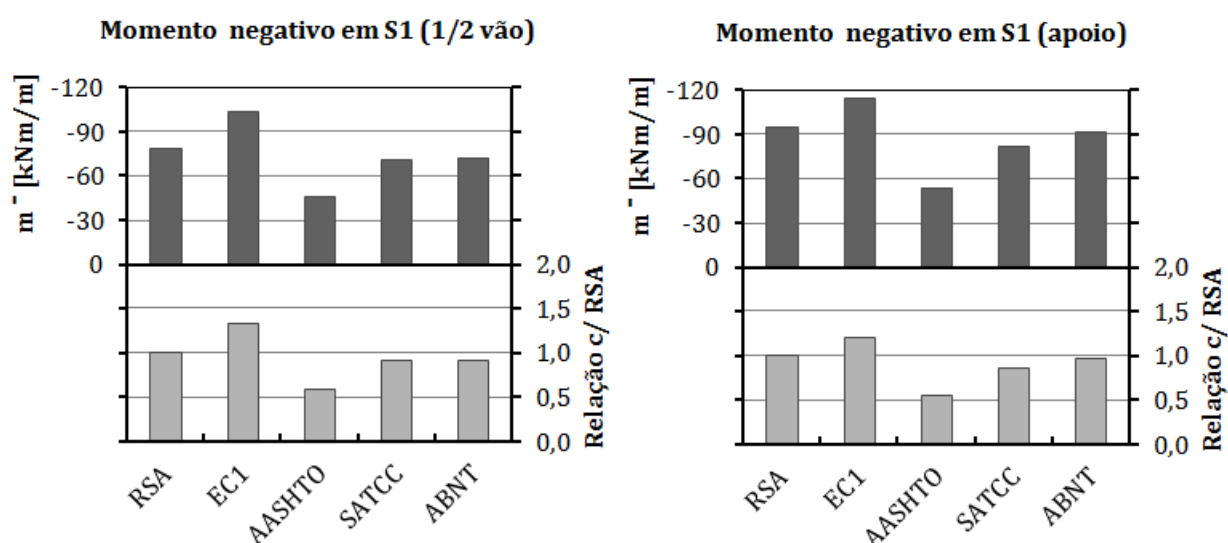


Figura 6-9 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S1 nas secções de 1/2 vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3

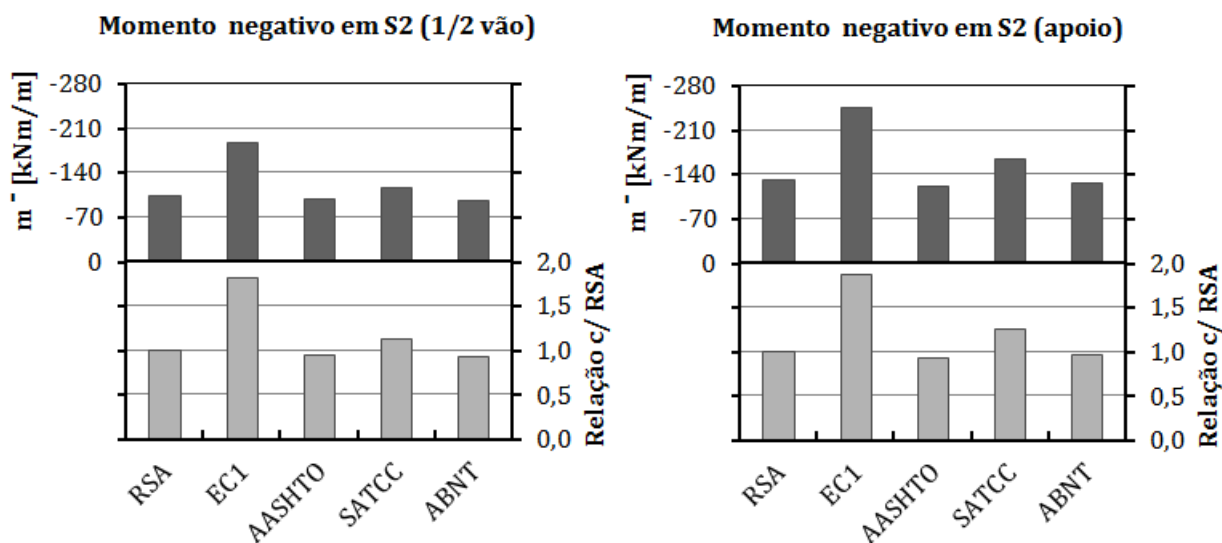


Figura 6-10 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S2 nas secções de 1/2 vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3

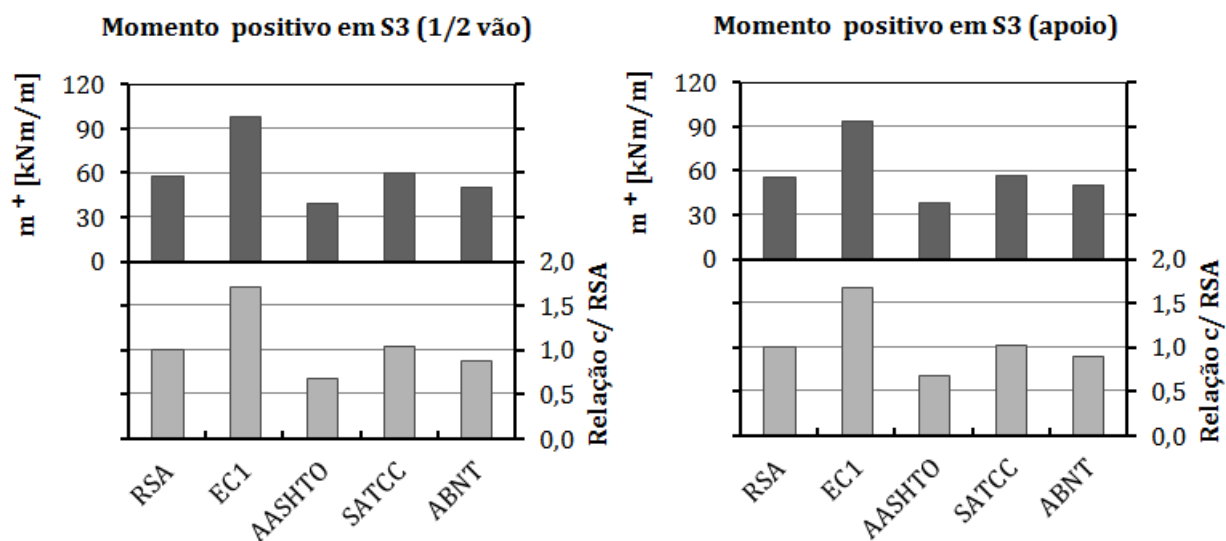


Figura 6-11 : Representação gráfica dos momentos fletores positivos em S3 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 3

6.2.3 Discussão de resultados obtidos com o modelo de elementos finitos

Para o terceiro caso de estudo verifica-se que o LM1 do EC1 produz os efeitos transversais mais desfavoráveis em todas as secções analisadas do tabuleiro. O regulamento norte-americano e o regulamento brasileiro apresentam, em todas as situações, momentos fletores inferiores ao RSA, enquanto que a norma sul-africana produz esforços da ordem de grandeza dos do RSA.

Os momentos fletores máximos negativos, nas secções de apoio sobre as almas, são maiores na secção de apoio nos pilares, em resultado da existência do diafragma que, por estar ligado às almas do caixão, confere maior encastramento à laje. Também se verifica que em todos os casos, à exceção do NA (3) na secção S1, os momentos fletores negativos são sempre maiores na laje intermédia do que na consola.

Na tabela 6-1 observa-se que o VT é o modelo do RSA que induz os valores maiores. Sendo um modelo composto por cargas concentradas, pode-se concluir que, em tabuleiros de largura média, as cargas pontuais apresentam maior influência nos efeitos transversais que as cargas distribuídas. Efetivamente, tendo em conta que o veículo da norma brasileira e o veículo da norma portuguesa são sistemas de cargas concentradas de geometria igual mas de intensidades diferentes (RSA: 100,0 kN/roda; ABNT: 75,0 kN/roda), observa-se que o veículo do RSA produz momentos fletores mais elevados que a ABNT, cujo modelo é composto pelo veículo em conjunto com a carga distribuída, comprovando que as cargas concentradas têm mais influência nos efeitos transversais do tabuleiro.

O NA (3) é o modelo de menor intensidade da norma sul-africana, com duas rodas de 100 kN afastadas 1,00 m, mas situa-se nos limites da consola e intersesta as ordenadas mais influentes na superfície de influência. Os restantes modelos desse regulamento, apesar de serem de intensidade superior ao NA (3), têm os eixos mais afastados, comportando algumas das suas rodas fora dos limites da consola e produzindo momentos fletores negativos de menor intensidade. Por essa razão, o NA (3) é o modelo de sobrecarga mais gravoso para o momento fletor negativo na consola.

Este facto também se verifica nos modelos de sobrecargas da AASHTO. Entre os dois sistemas de sobrecarga norte-americanos, a única característica em comum é a carga uniforme *Lane Load*, diferenciando-se apenas no tipo de cargas concentradas. Enquanto que o *Truck* é mais pesado e o *Tandem* é um veículo mais ligeiro, o segundo apresenta uma maior proximidade entre eixos, produzindo efeitos locais mais desfavoráveis no encastramento da consola. Contudo, verifica-se que na laje intermédia, que por sua vez tem um vão maior que a consola cerca de duas vezes e meia, o subsistema *Truck* é mais

gravoso que o *Tandem*, o que comprova que a forma e a geometria dos sistemas de sobrecarga tendem a perder influência nos valores dos esforços locais à medida que a secção do tabuleiro se torna mais larga.

Assim, pode-se concluir que em tabuleiros de caixão de largura média, os modelos de cargas concentradas têm mais influência nos valores dos esforços. Porém, em elementos do tabuleiro mais curtos, como é o caso das consolas, é relevante o espaçamento entre as cargas, sendo mais desfavorável aplicar cargas concentradas de maior valor e mais próximas entre si.

6.2.4 Resultados obtidos utilizando superfícies de influência

Na estimativa dos momentos fletores das secções de apoio e de vão da laje entre almas utilizam-se, frequentemente, superfícies de influência de faixas de laje encastradas lateralmente.

Com este método expedito, obtêm-se resultados aproximados. Pelo facto de se considerarem condições de encastramento perfeito, os momentos fletores negativos serão superiores aos que efetivamente ocorrem no tabuleiro e os momentos positivos serão inferiores. Contudo, espera-se que os esforços obtidos com as superfícies de influência não sejam muito diferentes dos valores numéricos obtidos pelo método dos elementos finitos.

Devem ser utilizadas superfícies de influência que tenham em conta as variações de espessura das consolas e das lajes intermédias do tabuleiro. O caso de estudo 3, constituído por um tabuleiro em caixão, apresenta duas consolas e uma laje intermédia de espessuras não uniformes. Considerando as relações de espessuras e o tipo o esforço a analisar, utilizaram-se as superfícies de influência mais apropriadas [HOMBERG, 1972].

Às superfícies de influência foram aplicados apenas os modelos de sobrecargas constituídos por cargas concentradas e lineares. Os esforços produzidos pelas sobrecargas distribuídas foram calculados manualmente, no caso dos momentos negativos no encastramento da consola (secção S1), e com recurso ao programa de pórticos planos, Ftool®, no caso dos momentos máximos na laje entre almas (secções S2 e S3), considerando elementos de barra encastrados nas extremidades e com as propriedades da laje.

Nos casos dos modelos constituídos por dois subsistemas de sobrecarga, somaram-se os efeitos produzidos por cada um, de maneira a obter o esforço total. Os valores dos momentos máximos nas três secções S1, S2 e S3 (Figuras 6-6 e 6-7), obtidos por superfícies de influência, apresentam-se nas tabelas 6-4, 6-5 e 6-6, respetivamente. São indicadas também as diferenças percentuais entre os resultados das superfícies de influência e os resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos, tomando como referência os esforços do modelo numérico.

Tabela 6-4 : Momentos fletores negativos em S1, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3

Momento negativo em S1				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S1} [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	-42,2	+11,2%	-8,9%
	VT	-85,3	+9,1%	-10,1%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	-108,1	+4,4%	-5,6%
	LM2	-81,0	+7,7%	+4,4%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	-42,9	+14,0%	-4,2%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	-48,6	+4,8%	-8,3%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-60,6	+10,6%	-0,4%
	NA (3)	-83,2	+16,9%	+1,2%
	NB 36	-74,4	+16,4%	-4,1%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-77,5	+7,7%	-15,6%

Tabela 6-5 : Momentos fletores negativos em S2, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3

Momento negativo em S2				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S2}^- [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	-105,94	+30,0%	-2,3%
	VT	-113,80	+10,5%	-12,8%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	-224,84	+20,4%	-8,1%
	LM2	-116,64	+29,8%	+5,2%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	-97,55	+16,0%	-11,1%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	-111,07	+13,2%	-8,7%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-121,87	+19,2%	-5,8%
	NA (3)	-66,60	+28,0%	+5,0%
	NB 36	-156,96	+35,4%	-4,3%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-115,58	+20,7%	-8,3%

Tabela 6-6 : Momentos fletores positivos em S3, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 3

Momento positivo em S3				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S3}^+ [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	26,46	-19,8%	-15,5%
	VT	54,00	-6,3%	-3,5%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	86,40	-12,0%	-7,7%
	LM2	57,24	-9,1%	-6,9%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	37,59	-4,6%	-1,8%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	36,78	-3,6%	-1,2%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	47,85	-10,4%	-5,5%
	NA (3)	35,60	+0,8%	+3,5%
	NB 36	49,10	-17,5%	-13,8%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	44,50	-12,3%	-11,2%

A comparação entre os esforços condicionantes do método numérico e os correspondentes esforços obtidos através das superfícies de influência é apresentada, graficamente, nas figuras 6-12 a 6-14.

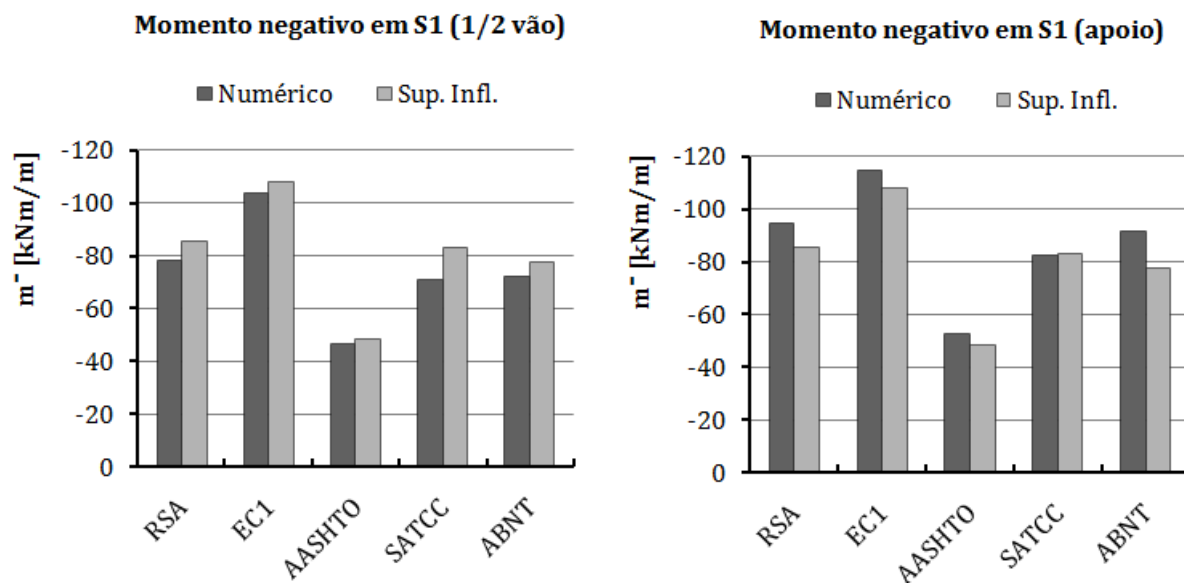


Figura 6-12 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S1, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3

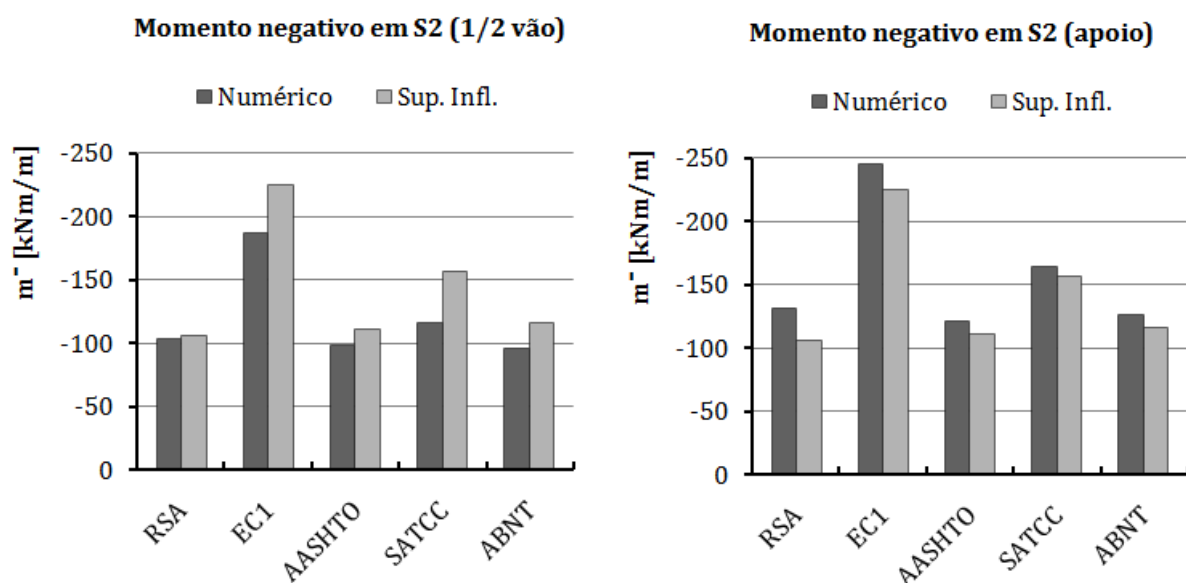


Figura 6-13 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S2, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3

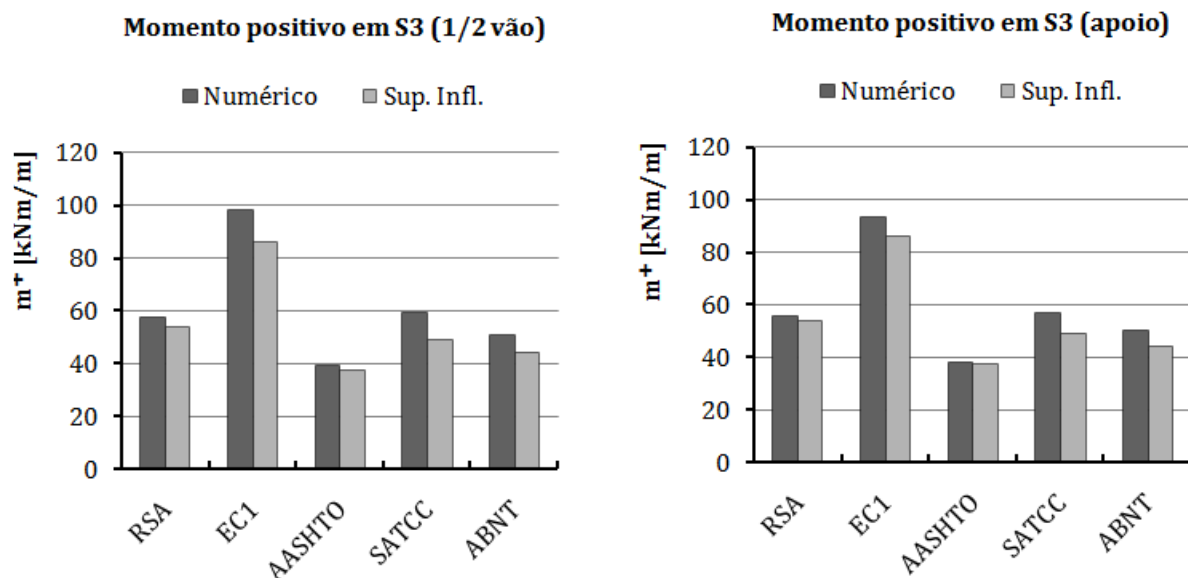


Figura 6-14 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S3, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3

6.2.4 Discussão de resultados obtidos utilizando superfícies de influência

Os resultados obtidos usando superfícies de influência apresentam uma relação lógica com os resultados numéricos. Enquanto que a meio vão, os momentos negativos, em S1 e S2, obtidos com superfícies de influência são maiores, junto ao apoio verifica-se uma maior proximidade de valores entre os dois métodos. Esta aproximação de valores é justificada pela rigidez da ligação entre o diafragma e as almas junto ao apoio, que conferem um grau de encastramento muito elevado. Visto que as condições de apoio adotadas pelas superfícies de influência são encastramentos perfeitos, os resultados dos dois métodos tornam-se semelhantes. Contudo apresentam algumas diferenças, explicadas pela limitação que está inerente ao método das superfícies de influência, nomeadamente a consideração de relações de espessuras aproximada das lajes.

Constata-se que a meio vão os momentos negativos na laje, em S2, apresentam diferenças percentuais, entre os dois métodos, na ordem de 20% a 30%. O método das superfícies de influência não tem em consideração as rotações que ocorrem na ligação entre as almas e a laje, visto que considera essa ligação encastrada. Contudo, tendo em conta a ordem de grandeza dessas percentagens, verifica-se que o grau de encastramento da laje é considerável.

Para o momento positivo na laje, em S3, verifica-se que os resultados numéricos são, à exceção do NA(3), sempre superiores aos resultados obtidos com as superfícies de influência. Esta diferença é novamente justificada pelas condições de apoio que ambos os métodos consideram. Os valores dos momentos positivos apresentam melhor concordância na secção de apoio nos pilares, devido ao aumento de encastramento conferido pelo diafragma.

O cálculo dos momentos fletores na secção de vão da laje intermédia é problemático porque o valor de ordenada na superfície de influência, no ponto central da laje, é indeterminado. Assim não é possível calcular com rigor os esforços que as cargas localizadas nesse ponto produzem. Para contornar essa situação foi admitida uma ordenada de 0,3 no ponto central da laje, o que permitiu obter resultados plausíveis. Ainda assim ocorrem diferenças percentuais maiores entre os diversos modelos de sobrecarga, nomeadamente no caso do modelo SL+SU do RSA.

As diferenças percentuais verificadas nos esforços da laje intermédia levam a concluir que a utilização de superfícies de influência conduz a resultados de pior qualidade neste tipo de painéis de laje.

6.3 Análise transversal do caso de estudo 6

6.3.1 Características do modelo de elementos finitos

A ponte do sexto caso de estudo também foi modelada com elementos finitos de 4 nós, com dimensões aproximadamente de 1,00 m por 1,00 m, apresentando dimensões ligeiramente diferentes em zonas onde tenha surgido a necessidade de distorcer a malha. Comparativamente ao terceiro caso de estudo, o tabuleiro é mais largo e varia de altura ao longo de cada vão. Essa variação foi considerada linear em cada aduela do tabuleiro, estabelecendo aproximadamente um andamento parabólico no banzo inferior da secção em toda a sua extensão. A justeza do modelo foi comprovada pela deformada do peso próprio e pela direção e valor das reações de apoio.

O modelo tridimensional de elementos finitos é representado nas figuras 6-15 a 6-17.

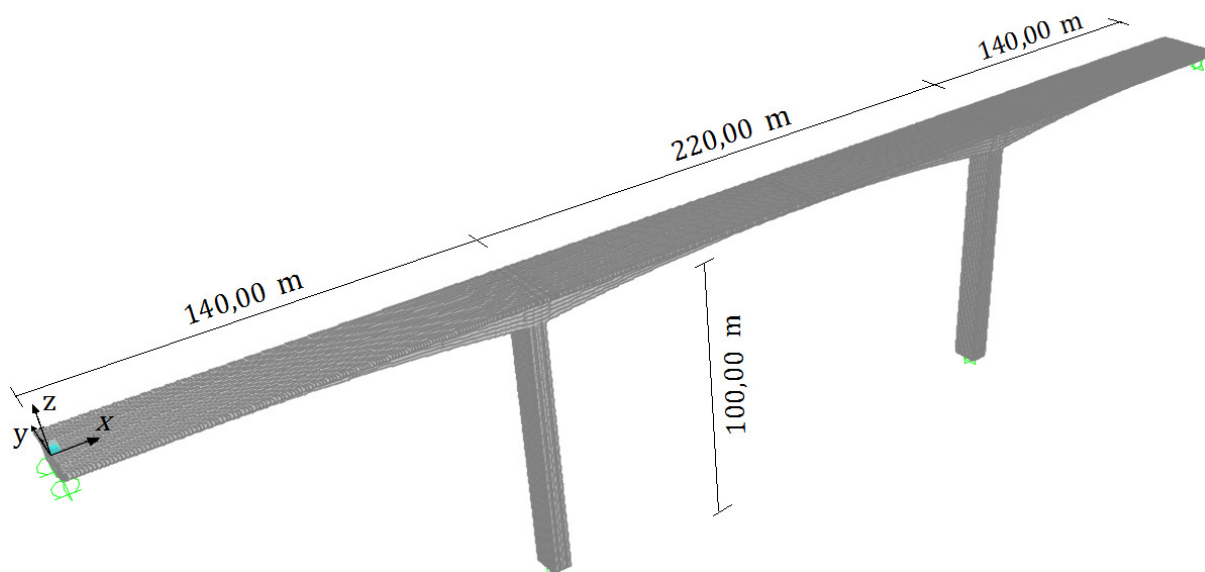


Figura 6-15 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Perspetiva global

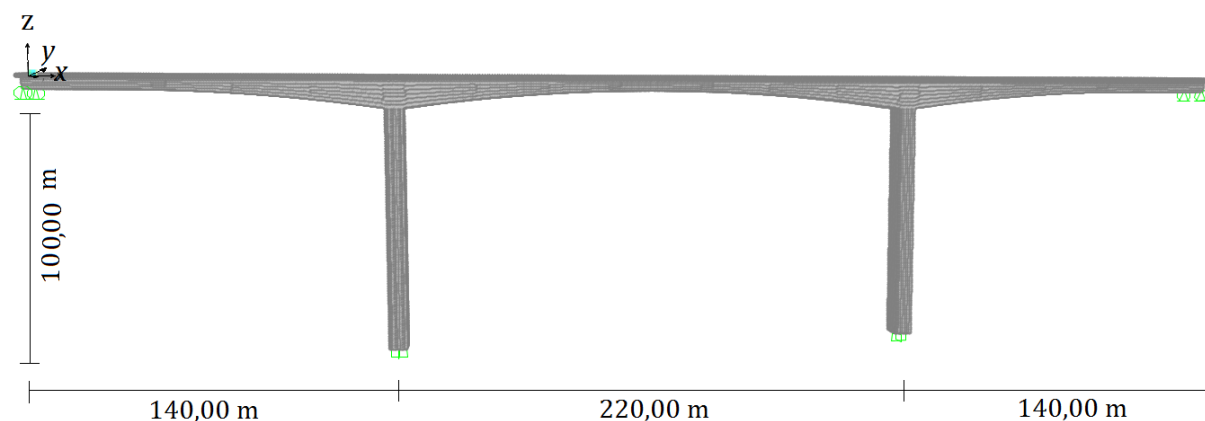


Figura 6-16 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Vista lateral

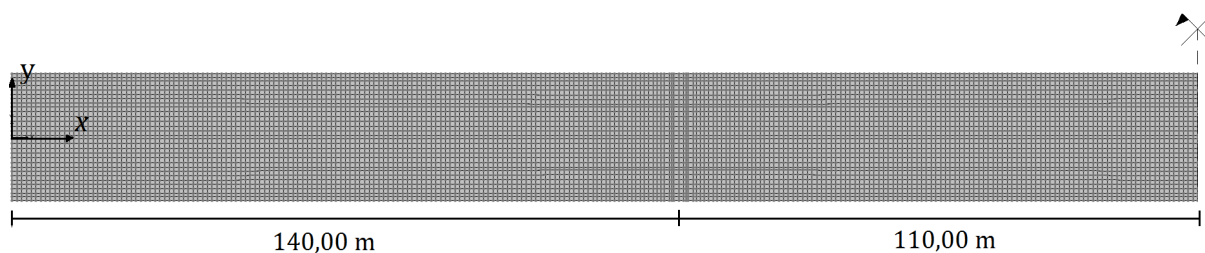


Figura 6-17 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Vista em planta da laje de plataforma

A variação da altura da secção implica que a dimensão dos elementos da alma também varie, não apresentando uniformidade. Também o estreitamento do diafragma leva à necessidade de considerar elementos de três nós de modo a garantir a continuidade da malha entre o pilar e a laje do tabuleiro. Para contornar essa situação, de maneira a manter os elementos com dimensões mais uniformes entre si, foi usada uma nova ferramenta de cálculo disponível na 15ª versão do SAP2000®, denominada por *Edge Constraints* (ec). É adequada para compatibilizar malhas descontínuas, assumindo a continuidade dos elementos de casca. Apesar de ser uma ferramenta extremamente útil, os resultados locais dos esforços poderão não ser os melhores, mas garantem a continuidade dos deslocamentos. Por essa razão foi considerado o *Edge Constraints* apenas nos diafragmas e nas zonas de variação da espessura das almas, locais onde não foram extraídos os valores dos esforços. Assim foi discretizada uma malha mais uniforme, com elementos aproximadamente quadrangulares e sem elementos triangulares.

Nas figuras 6-18 e 6-19 representam-se algumas das secções onde foram considerados os *Edge Constraints*, no tramo central e junto aos pilares, respetivamente.

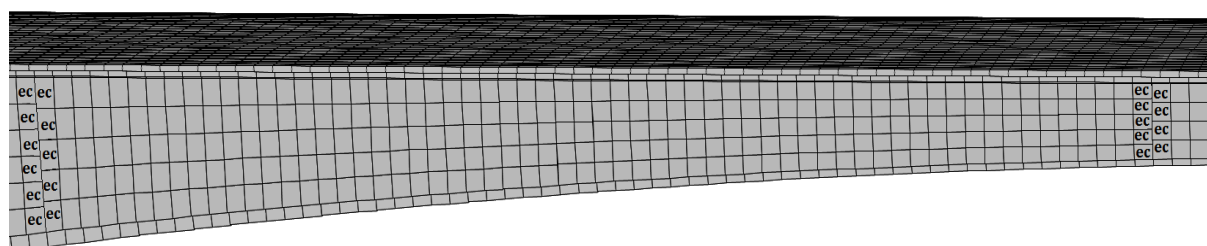


Figura 6-18 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. *Edge Constraints* nas secções de alargamento das almas

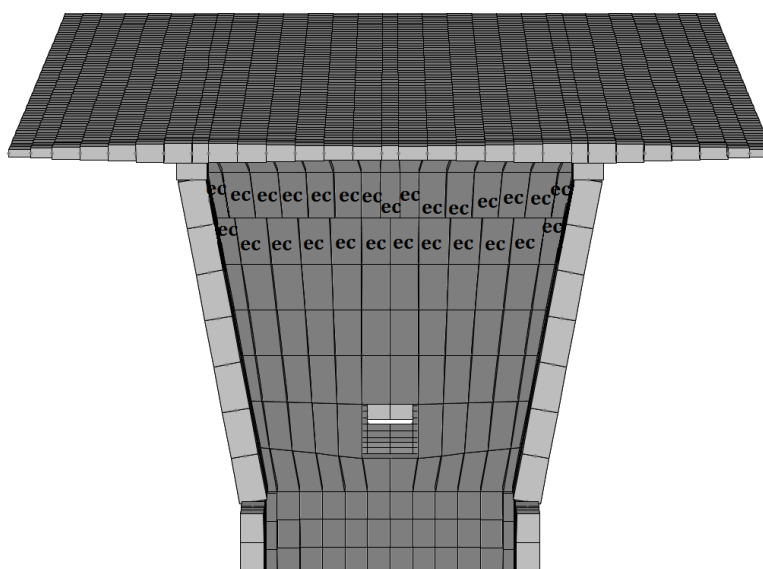


Figura 6-19 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. *Edge Constraints* nos diafragmas

Os pilares foram igualmente modelados com elementos de casca, dado que as suas ligações ao tabuleiro são contínuas. A secção de cada pilar é constituída por vários elementos com espessuras diferentes de maneira a garantir as suas propriedades reais. Na base, os nós de cada elemento estão ligados a um nó central por ligações do tipo *body*, que se encontra encastrado (figura 6-21). Esses elementos estendem-se até à face superior do tabuleiro, materializando o diafragma (figura 6-20). Nas secções de apoio dos pilares o diafragma tem uma espessura de 1,00 m, enquanto que nas secções dos encontros tem 3,00 m de espessura. Os apoios nos encontros são do tipo *pot-bearing*, deslizante na direção longitudinal, pelo que foi considerado um apoio deslizante na direção *x* por cada aparelho de apoio, como indica a figura 6-22.

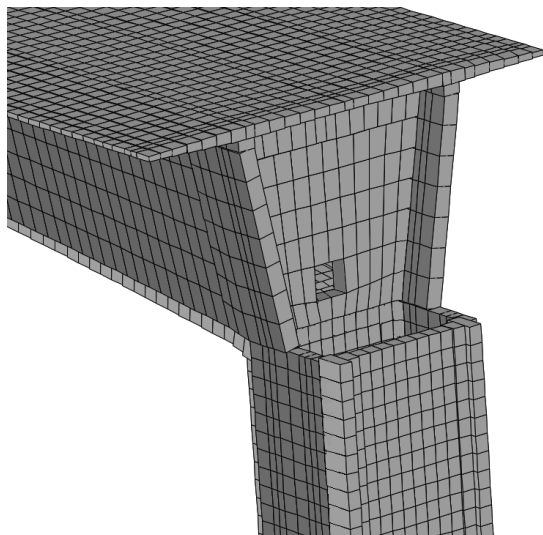


Figura 6-20 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Pormenor da ligação tabuleiro/pilar

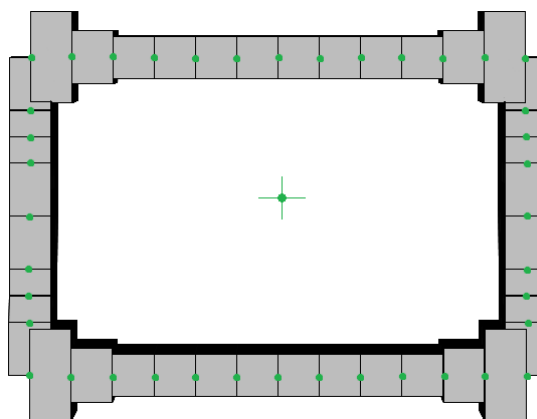


Figura 6-21 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Discretização da secção do pilar

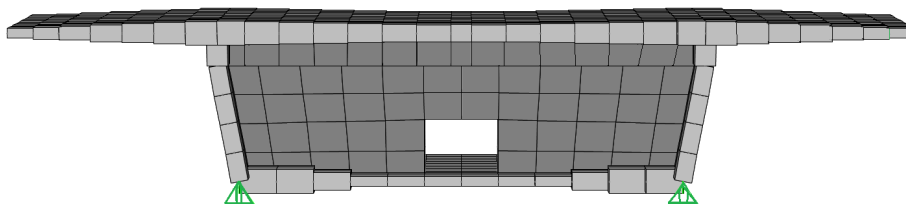


Figura 6-22 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção na extremidade sobre o encontro

A variação da espessura das consolas foi simulada através da atribuição de diferentes alturas aos elementos. A consola é composta por sete elementos, dois dos quais, com 0,75 m cada, correspondem à faixa do passeio. Também os elementos que formam a laje entre almas apresentam diferentes espessuras.

Tal como no caso de estudo 3, foram analisados o momento máximo negativo da consola (S_1) e os momentos máximos negativo e positivo na laje (S_2 e S_3 , respetivamente). Os esforços foram analisados nas secções junto ao apoio nos pilares e a meio vão. Essas secções indicam-se nas figuras 6-23 e 6-24.

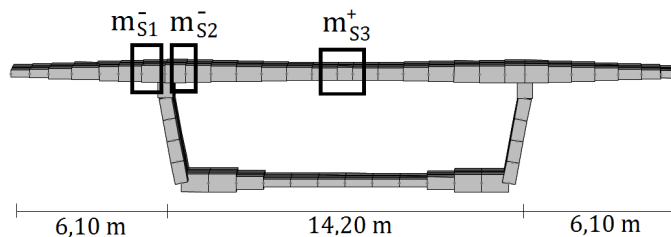


Figura 6-23 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção de $\frac{1}{2}$ vão do tramo central

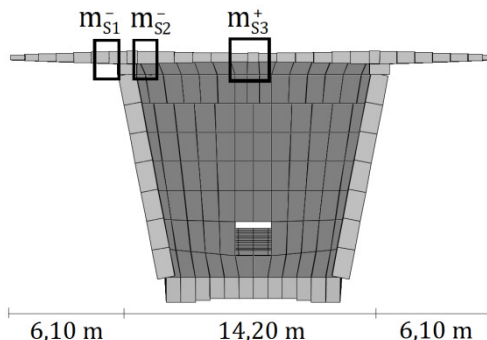


Figura 6-24 : Modelo de casca do tabuleiro do caso de estudo 6. Secção de apoio no pilar

Tal como se considerou, ficticiamente, na análise transversal do caso de estudo 3, os elementos superiores do diafragma e da laje de plataforma não se encontram unidos, com o fim de obter uma envolvente dos efeitos transversais no tabuleiro, para condições de encastramento elevadas.

6.3.2 Resultados do modelo de elementos finitos

Na tabela 6-7 constam os resultados numéricos dos momentos fletores no tabuleiro do sexto caso de estudo, produzidos pelos sistemas de sobrecarga definidos nas cinco normas. Nas tabelas 6-8 e 6-9 resumem-se os valores dos esforços condicionantes de cada norma e a sua relação com os efeitos gerados pelo modelo condicionante do RSA, na secção de meio vão e de apoio, respetivamente.

Tabela 6-7 : Momentos fletores máximos transversais do caso de estudo 6

Regulamentos	Modelos de sobrecargas	Secção de ½ vão			Secção de apoio		
		m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]
RSA (Português)	SL + SU	-124,8	-132,1	68,2	-148,2	-216,5	56,2
	VT	-217,8	-164,4	131,0	-250,5	-238,7	113,7
EC1 (Europeu)	LM1: TS + UDL	-301,1	-257,0	182,7	-349,1	-384,9	151,6
	LM2	-140,6	-62,1	82,0	-161,6	-111,9	74,9
AASHTO (Norte- Americano)	<i>Truck + L.L.</i>	-114,1	-133,5	82,2	-130,4	-190,3	61,3
	<i>Tandem + L.L.</i>	-116,3	-130,4	76,3	-133,9	-189,3	58,9
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-135,0	-131,6	92,2	-151,2	-205,9	75,6
	NA (3)	-86,9	-33,7	48,9	-97,9	-63,1	45,8
	NB 36	-226,7	-119,4	111,7	-267,3	-210,9	86,1
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-211,9	-117,9	100,8	-243,4	-191,0	84,6

Tabela 6-8 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de ½ vão, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 6

SECÇÃO DE ½ vão						
Regulamentos	Valores máximos			Relação com RSA		
	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]
RSA	-217,8	-164,4	131,0	1,00	1,00	1,00
EC1	-301,1	-257,0	182,7	1,38	1,56	1,39
AASHTO	-116,3	-133,5	82,2	0,53	0,81	0,63
SATCC	-226,7	-131,6	111,7	1,04	0,80	0,85
ABNT	-211,9	-117,9	100,8	0,97	0,72	0,77

Tabela 6-9 : Momentos fletores transversais condicionantes de cada regulamento, na secção de apoio, e sua relação com os valores do RSA, para o caso de estudo 6

SECÇÃO DE APOIO						
Regulamentos	Valores máximos			Relação com RSA		
	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]	m_{S1}^- [kNm/m]	m_{S2}^- [kNm/m]	m_{S3}^+ [kNm/m]
RSA	-250,5	-238,7	113,7	1,00	1,00	1,00
EC1	-349,1	-384,9	151,6	1,39	1,61	1,33
AASHTO	-133,9	-190,3	61,3	0,53	0,80	0,54
SATCC	-267,3	-210,9	86,1	1,07	0,88	0,76
ABNT	-243,4	-191,0	84,6	0,97	0,80	0,74

A informação das tabelas 6-8 e 6-9 ilustra-se de seguida em forma gráfica (Figuras 6-25 a 6-27).

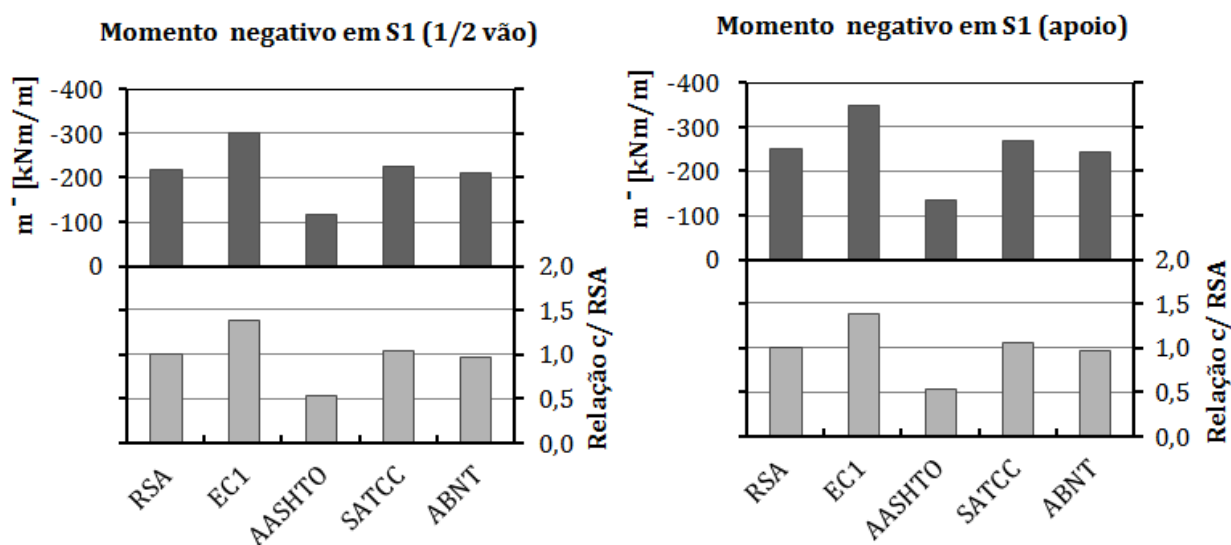


Figura 6-25 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S1 nas secções de 1/2 vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6

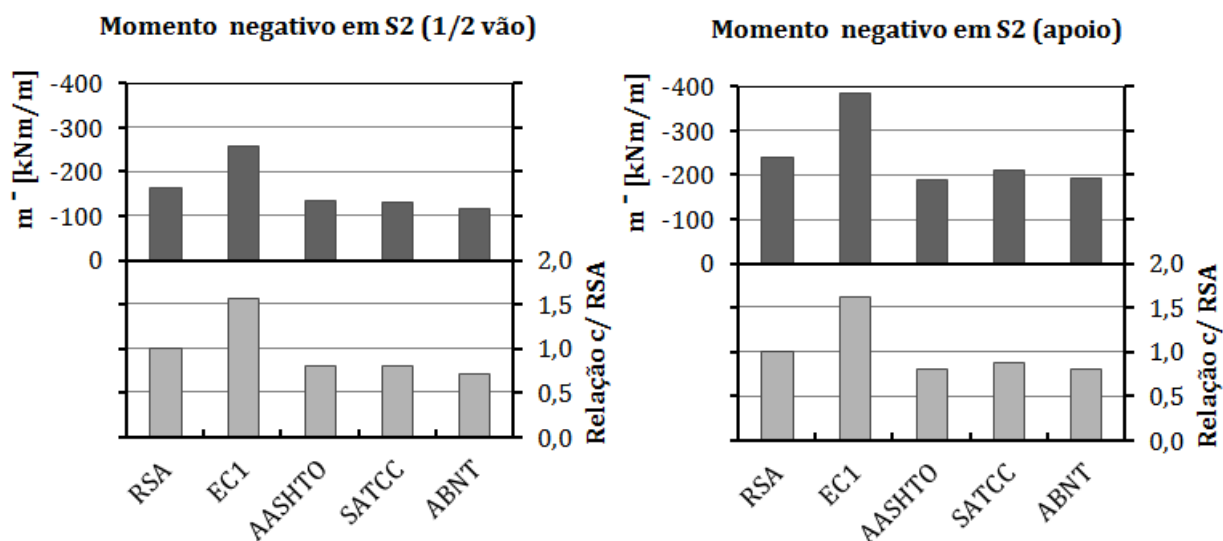


Figura 6-26 : Representação gráfica dos momentos fletores negativos em S2 nas secções de 1/2 vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6

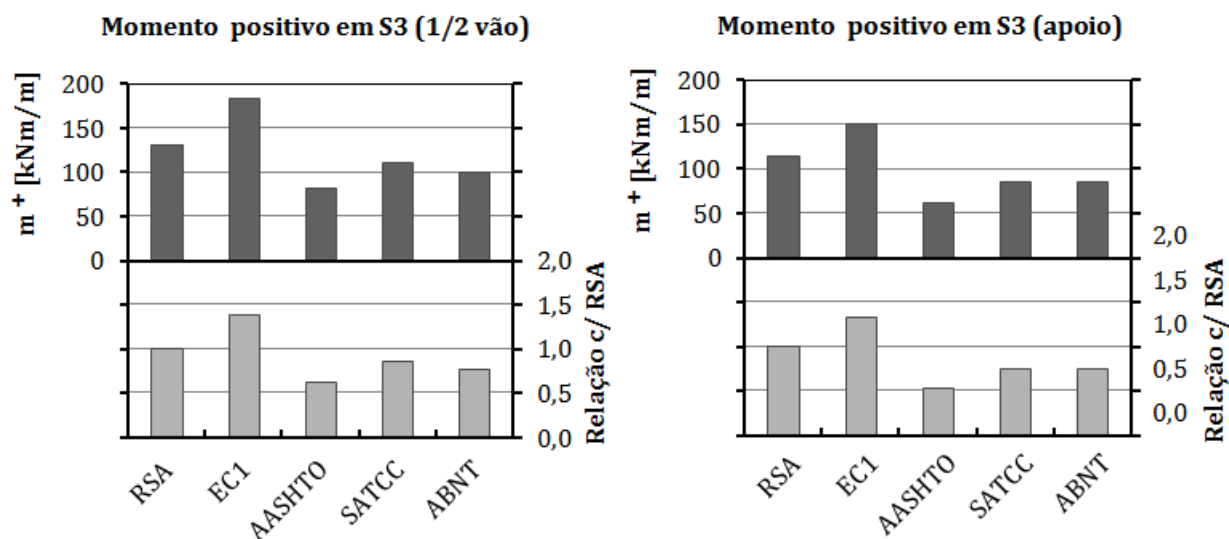


Figura 6-27 : Representação gráfica dos momentos fletores positivos em S3 nas secções de $\frac{1}{2}$ vão e de apoio, obtidos na análise transversal do caso de estudo 6

6.3.3 Discussão de resultados obtidos com o modelo de elementos finitos

O tabuleiro do sexto caso de estudo é muito mais largo que o caso de estudo 3. A largura da consola aumenta quase para o dobro (3,30 m para 6,10 m). A laje intermédia também aumenta o seu vão significativamente (8,40 m para 14,20 m). Tratando-se de uma análise transversal, a largura da secção é a característica do tabuleiro que mais influência tem nos valores dos esforços, razão pela qual aumentaram significativamente.

Contudo, não se verificaram muitas alterações relativamente às normas mais condicionantes, quando comparado com o caso de estudo anterior. O LM1 do EC1 continua a produzir os esforços mais elevados e o RSA constitui a segunda norma mais gravosa, seguida da SATCC, da ABNT e por último da AASHTO.

O VT permanece como o modelo mais desfavorável do regulamento português, confirmando que as cargas concentradas têm maior influência nos efeitos transversais que as cargas distribuídas. Por essa razão o RSA é um dos regulamentos mais gravosos visto que o veículo tipo é dos modelos com cargas concentradas mais pesadas (100,0 kN/roda) e mais próximas entre si.

À exceção da ABNT e do RSA, os restantes regulamentos estipulam que se proceda à divisão do tabuleiro em diversas vias. Essa divisão implica que se considerem mais modelos de sobrecarga distribuídos no tabuleiro. Para esta situação em específico, o EC1 considera dois veículos de 135,0 kN/roda nas vias mais centrais do tabuleiro, dois veículos de 80,0 kN/roda em outras duas vias e metade de um veículo de 40,0 kN/roda nas vias mais extremas da laje. Por essa razão o EC1 é o regulamento mais desfavorável. Por outro lado, os veículos da AASHTO, mesmo após a atribuição do fator de amplificação dinâmica, continuam a ser os mais ligeiros (*Truck* com 61,5 kN/roda e 15,1 kN/roda dianteira; *Tandem* com 48,1 kN/roda), justificando a ocorrência dos esforços mais baixos de entre todos os regulamentos.

O regulamento português prevê que sejam aplicados dois VT, um por faixa de rodagem, no caso de existir um separador físico, como é o caso desta obra. Por essa razão, e tendo em conta o peso do VT e a distância dos seus eixos, os valores dos momentos positivos produzidos pelos modelos das restantes normas, comparativamente ao RSA, diminuiriam.

Nas representações gráficas dos momentos negativos em S1 e S2 (figuras 6-25 e 6-26), nota-se que os valores aumentam da secção de meio vão para a secção de apoio devido à presença do diafragma.

Contudo, comparativamente ao caso de estudo 3, esse aumento é significativamente maior, pelo que se induz que, em tabuleiros muito largos, os momentos negativos na secção de apoio são muito maiores do que a meio vão. Concluiu-se assim que o caixão de grandes dimensões confere um encastramento menor nas zonas de vão. No caso dos momentos positivos na laje, as diferenças de valores entre a secção de meio vão e o apoio não são tão significativas.

6.3.4 Resultados obtidos utilizando superfícies de influência

Tal como no caso de estudo 3, os modelos de sobrecarga constituídos por cargas concentradas e distribuídas foram aplicados às superfícies de influência de HOMBERG, que admitem um encastramento perfeito nas ligações da laje de plataforma às almas. Foram utilizadas as mesmas superfícies de influência do caso de estudo 3, com as mesmas relações de espessura, mas escaladas com as dimensões do tabuleiro do sexto caso de estudo.

Os esforços produzidos pelos carregamentos distribuídos foram obtidos manualmente, no caso do momento fletor na consola, e com auxílio de um programa de pórticos planos, Ftool®, para os momentos positivo e negativo na laje. Nesses modelos, constituídos apenas por elementos de barra com as propriedades da laje intermédia, foi também admitido um encastramento perfeito nas extremidades da laje. Os momentos fletores calculados são apresentados nas tabelas 6-10 a 6-12.

Tabela 6-10 : Momentos fletores negativos em S1, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6

Momento negativo em S1				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S1} [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	-140,90	+12,9%	-5,0%
	VT	-244,40	+12,2%	-2,4%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	-337,97	+12,2%	-3,2%
	LM2	-172,08	+22,4%	+6,5%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	-131,10	+14,9%	+0,5%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	-133,24	+14,5%	-0,5%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-155,93	+15,5%	+3,1%
	NA (3)	-101,40	+16,7%	+3,6%
	NB 36	-261,99	+15,6%	-2,0%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-224,73	+6,1%	-7,7%

Tabela 6-11 : Momentos fletores negativos em S2, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6

Momento negativo em S2				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S2}^- [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	-180,20	+36,4%	-16,8%
	VT	-246,30	+49,8%	+3,2%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	-419,12	+63,1%	+8,9%
	LM2	-119,34	+92,1%	+6,7%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	-209,60	+57,0%	+10,1%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	-221,24	+69,7%	+16,8%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	-186,63	+41,8%	-9,3%
	NA (3)	-67,80	+101,0%	+7,5%
	NB 36	-215,19	+80,2%	+2,0%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	-171,83	+45,7%	-10,0%

Tabela 6-12 : Momentos fletores positivos em S3, calculados usando superfícies de influência, e diferença percentual entre os resultados dos dois métodos de cálculo, para o caso de estudo 6

Momento positivo em S3				
Regulamentos	Modelos de sobrecargas	m_{S3}^+ [kNm/m]	Diferença [%] ½ Vão	Diferença [%] Apoio
RSA (Português)	SL + SU	57,80	-15,2%	+2,8%
	VT	118,80	-9,3%	+4,5%
EC1 (Europeu)	LM1: TS+UDL	158,81	-13,1%	+4,8%
	LM2	79,74	-2,8%	+6,5%
AASHTO (Norte-Americano)	<i>Truck + Lane Load</i>	64,43	-21,6%	+5,1%
	<i>Tandem + Lane Load</i>	58,54	-23,3%	-0,7%
SATCC (Sul-Africano)	NA (1)+(2)	82,34	-10,7%	+8,9%
	NA (3)	50,00	+2,3%	+9,2%
	NB 36	89,60	-19,8%	+4,0%
ABNT (Brasileiro)	<i>p + Veículo</i>	79,33	-21,3%	-6,3%

A comparação entre os esforços condicionantes do método numérico e os respectivos esforços do método das superfícies de influência é apresentada, graficamente, nas figuras 6-28 a 6-30.

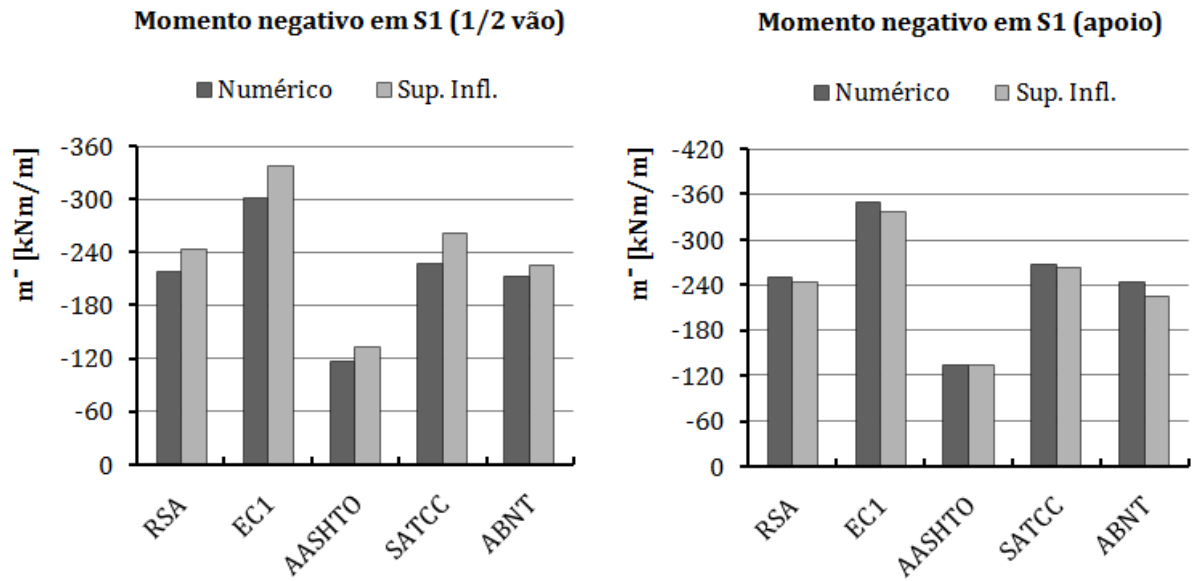


Figura 6-28 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S1, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6

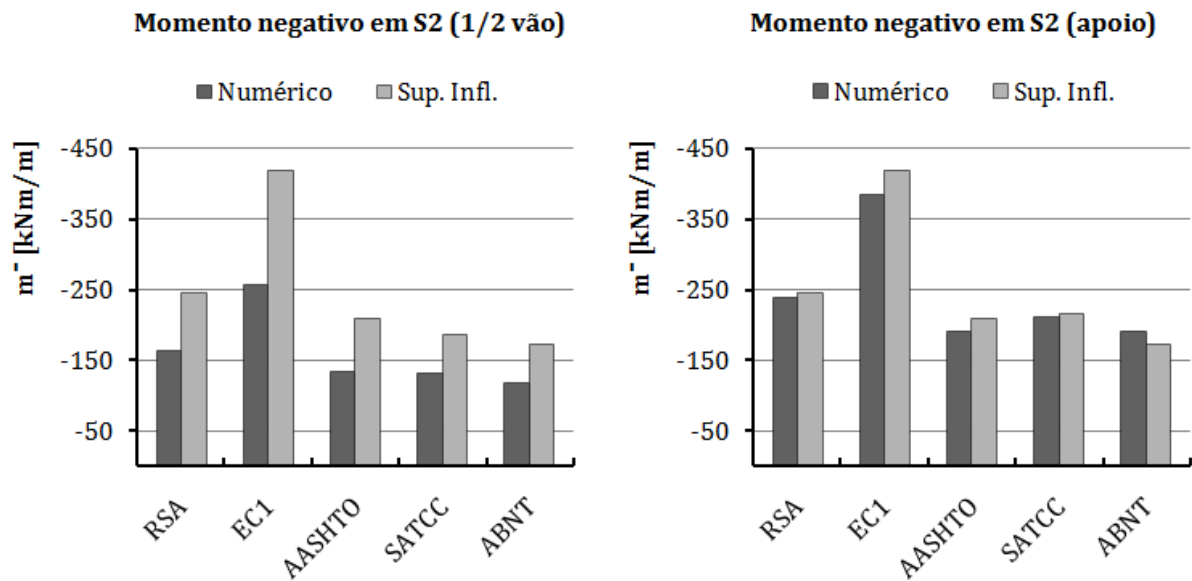


Figura 6-29 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S2, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6

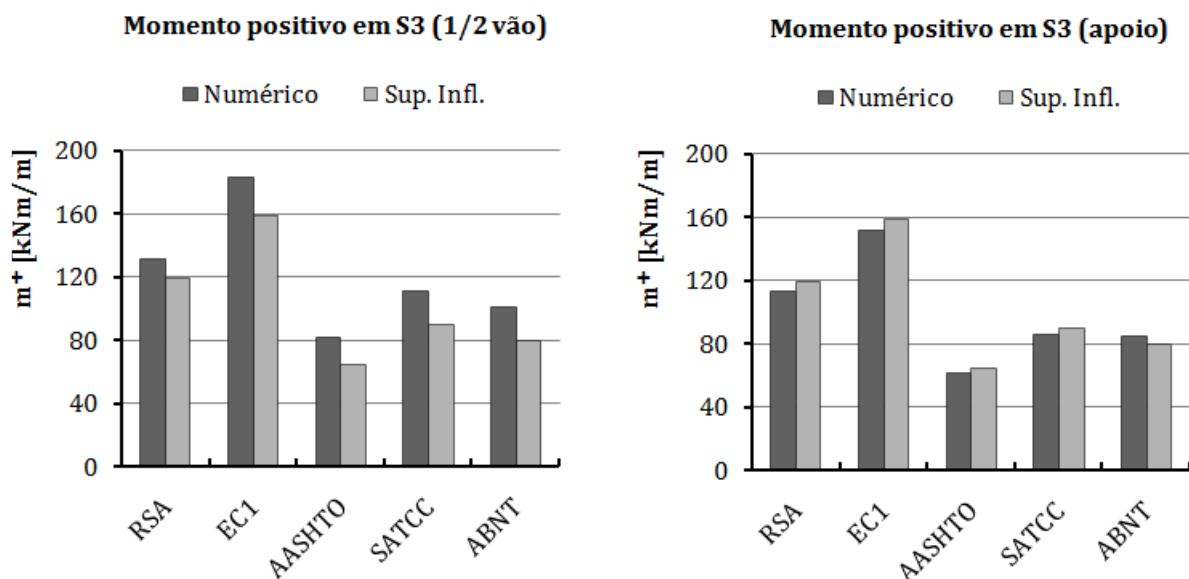


Figura 6-30 : Representação gráfica dos momentos fletores transversais condicionantes em S3, calculados pelo método de elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 6

6.3.5 Discussão de resultados obtidos utilizando superfícies de influência

Na tabela 6-10 observa-se, relativamente aos momentos máximos na consola (S1), que os momentos fletores a meio vão são maiores no método das superfícies de influência, em cerca de 15%, enquanto que no apoio os valores são muito mais próximos, apresentando uma diferença máxima de 7,7%.

Contudo, os momentos máximos negativos na laje (S2) apresentam diferenças muito elevadas a meio vão. Enquanto que na secção de apoio a máxima diferença é de 16,8 %, os momentos fletores do método numérico chegam a apresentar valores cerca de duas vezes inferiores aos do método das superfícies de influência, a meio vão. Dada a largura do tabuleiro, pode-se concluir que em tabuleiros muito largos, com secção em caixão, o encastramento da laje a meio vão é pequeno, permitindo maiores rotações nessas zonas. Como referido, os momentos fletores negativos são muito superiores na secção de apoio, apesar de apresentarem valores, na maioria das situações, inferiores aos das superfícies de influência.

Em consequência do menor encastramento da laje, a meio vão o momento positivo do método numérico é superior. Na secção de apoio obteve-se uma boa concordância de efeitos nos dois métodos, resultado do encastramento conferido pelo diafragma, que faz diminuir o momento positivo e aumentar o momento negativo.

Relativamente ao momento positivo na laje, o problema constatado no caso de estudo 3 volta a verificar-se. O ponto central da laje corresponde a uma indeterminação, que nas superfícies de influência é representada por um valor a tender para infinito. Contudo, a laje do presente caso de estudo é mais larga, o que faz com que as rodas tenham maior superfície de contacto nesse local. Por essa razão, enquanto que no tabuleiro do caso anterior admitiu-se um valor de 0,3, neste caso considerou-se um valor da ordenada de 0,4.

Para tabuleiros muito largos, o método das superfícies de influência apresenta algumas limitações em termos de aproximação de resultados, nomeadamente para os momentos fletores na laje intermédia nas secções de vão, devido à indeterminação da ordenada da superfície de influência no ponto central da laje e devido às condições de apoio consideradas.

Capítulo 7

Considerações finais

7.1 Enquadramento geral do trabalho

A perspetiva de alteração das normas vigentes em Portugal e a necessidade da engenharia de pontes portuguesa se voltar para mercados internacionais, motivou a realização deste estudo comparativo, onde foram abordados diversos sistemas de sobrecarga definidos pelos regulamentos mais utilizados, no período atual, pelo meio técnico nacional.

Foram considerados os modelos de sobrecargas verticais definidos pelas normas portuguesa, europeia, norte-americana, sul-africana e brasileira. Foram também sintetizadas as informações necessárias para a definição de todos os modelos de sobrecargas considerados por estas normas, mesmo que nem todos esses sistemas tivessem sido aplicados na realização do estudo comparativo, pelas razões já referidas.

As normas, apesar de definirem sistemas de carregamento diferentes, apresentam algumas semelhanças, nomeadamente o EC1, a SATCC e a AASHTO, que consideram a divisão dos tabuleiros em diversas vias fictícias, onde se aplicam os submodelos de sobrecarga. Os regulamentos brasileiro e português, por serem mais antigos, não consideram essa metodologia, adotando apenas sistemas de cargas concentradas e distribuídas em todo o tabuleiro. Outro aspeto comum entre os regulamentos é a abordagem perante os efeitos dinâmicos que as sobrecargas rodoviárias verticais produzem na estrutura. Uns regulamentos consideram esses efeitos através do aumento dos valores característicos das sobrecargas, como são os casos do RSA e da SATCC, e outros estabelecem um fator de amplificação dinâmica que é aplicado aos submodelos, como são os casos da AASHTO e da ABNT. O EC1 adota uma metodologia intermédia, definindo um modelo global (LM1) que considera, implicitamente, os efeitos dinâmicos, e um modelo próprio para a simulação dos efeitos dinâmicos (LM2), ao qual se aplica um fator de amplificação dinâmica.

Alguns dos regulamentos abordados no presente trabalho foram objeto de estudo de outras dissertações recentes, cujo conteúdo foi apresentado, de forma resumida, no terceiro capítulo. As três teses de mestrado apresentadas tiveram como objetivo comum comparar os efeitos produzidos pelos modelos de sobrecargas do RSA e do EC1. Duas delas consideraram casos de estudo idênticos, constituídos por pontes bi-apoiadas de vão variável até 50/60 m. Os esforços foram analisados apenas para a direção longitudinal. A terceira dissertação complementou o estudo realizado pelas outras duas, abordando pontes com tabuleiros vigados e nervurados com vários vãos, o que permitiu estudar também a influência nos momentos fletores negativos. Este último trabalho incluiu também uma análise transversal dos esforços, estudando os momentos fletores no encastramento da consola e na laje intermédia.

Nas três dissertações conclui-se que o EC1 produz sempre esforços mais elevados que o RSA, em todas as situações. Foram estudadas obras com vãos máximos de 60,00 m, não tendo sido abordadas estruturas com vãos mais extensos. É de referir ainda que nenhum dos estudos considerou, por não estar ainda disponível, o Anexo Nacional do EC1 que, devido aos fatores de correção, induzem uma diminuição dos valores das sobrecargas.

No terceiro capítulo foi também abordado um estudo comparativo entre diferentes normas realizado no LNEC. Apesar de se tratar de um trabalho da década de 70, em que os regulamentos considerados se encontram agora desatualizados, obtiveram-se conclusões importantes. Os resultados obtidos permitiram constatar que o comprimento dos vãos e a largura dos tabuleiros são características que têm muita influência nos esforços, caso os modelos de sobrecarga considerem cargas distribuídas. À medida que o vão aumenta e o tabuleiro alarga, as cargas distribuídas tornam-se preponderantes nos valores dos esforços longitudinais produzidos na estrutura. Em obras com vãos mais curtos e tabuleiros mais estreitos, são as cargas concentradas que originam os efeitos mais gravosos.

7.2 Escolha de casos de estudo para comparação de resultados

Escolheram-se 6 casos de estudo para comparação de resultados, nomeadamente esforços de flexão, transversos e de torção na direção longitudinal, em tabuleiros de nervura única e em caixão, e momentos fletores máximos na laje de plataforma de caixões unicelulares.

Os casos de estudo 1 e 2 dizem respeito a tabuleiros de nervura única. Com esses casos pretendeu-se avaliar os efeitos, produzidos pelos regulamentos abordados, em tabuleiros estreitos e de médio vão. Os casos de estudo 3, 4 e 5 são constituídos por tabuleiros em caixão com larguras correspondentes a estradas nacionais. O terceiro caso inclui-se na família de tabuleiros em caixão, de menor vão, construídos tramo a tramo, e os casos de estudo 4 e 5 correspondem a soluções construídas por avanços sucessivos em consola com vãos mais extensos. Para analisar os efeitos induzidos em tabuleiros em caixão muito largos e vãos extensos foi escolhido um tabuleiro com as características do caso de estudo 6. Os vãos são idênticos aos do caso de estudo 5, mas a secção do tabuleiro comporta um perfil transversal de autoestrada.

A escolha de tabuleiros com estas características permitiu estudar os efeitos das sobrecargas numa gama grande de vãos. Os efeitos na direção transversal foram analisados nos tabuleiros dos casos de estudo 3 e 6, dada a diferença de larguras e de vãos que as respetivas estruturas apresentam.

7.3 Resultados relevantes das análises na direção longitudinal

O facto das cargas distribuídas terem mais preponderância no valor dos esforços com o aumento dos vãos e da largura do tabuleiro e as cargas concentradas influenciarem mais os efeitos em tabuleiros mais estreitos e de menor vão, foi confirmado pelos resultados obtidos na análise longitudinal. Os esforços induzidos pelos sistemas de cargas concentradas do RSA e da SATCC, o veículo tipo e o NB 24 respetivamente, foram os modelos condicionantes desses regulamentos no primeiro caso de estudo, um tabuleiro de 6,00 m de largura constituído por dois vãos de 25,00 m. Dos restantes regulamentos, só o EC1 apresenta também um sistema composto apenas por cargas concentradas (LM2), apesar de nunca ter sido o modelo condicionante.

O alargamento do tabuleiro, do primeiro para o segundo caso de estudo, induziu uma alteração nos modelos condicionantes de cada norma, passando os sistemas de cargas concentradas a serem menos desfavoráveis para alguns tipos de esforços. O aumento do comprimento dos vãos e da largura do tabuleiro, nos casos de estudo seguintes, comprovaram esta conclusão. Os modelos de sobrecargas que englobam cargas distribuídas passaram a ser os sistemas condicionantes.

Comparando os resultados longitudinais dos momentos fletores positivo e negativo e do esforço transversal, de caso de estudo para caso de estudo, verifica-se que a sequência dos regulamentos mais

condicionantes foi-se alterando. Para obras de médio vão e tabuleiros com largura até 10,00 m, o RSA produz os menores esforços nas estruturas. A AASHTO apresenta os resultados, em termos de esforços, mais próximos do regulamento português, salvo para o momento negativo. As normas que conduzem aos efeitos mais gravosos neste tipo de estruturas são o EC1 e a ABNT. Em termos relativos, chegam a gerar esforços, em média, 40% a 60% superiores, ocorrendo um caso em que a ABNT produz um momento fletor negativo 118% superior ao do RSA. A SATCC, em pontes de médio vão e tabuleiros até 10,00 m, apresenta resultados intermédios, produzindo esforços 20% superiores aos do RSA, de uma forma geral.

À medida que o comprimento dos vãos aumenta, sensivelmente até 120,00 m, os esforços resultantes dos modelos do RSA tornam-se mais gravosos que os do regulamento norte-americano e aproximam-se dos valores dos esforços do EC1 e da SATCC. A ABNT foi sempre a norma que produziu os maiores efeitos. As diferenças percentuais máximas para o RSA deixam de ser tão elevadas, pertencendo a diferença máxima à ABNT (46% para o momento negativo).

Os casos de estudo 5 e 6 apresentam um vão central com 220,00 m, diferenciando-se na largura do tabuleiro. Para esses casos, o RSA e o EC1 apresentam resultados idêntidos, sendo mais desfavoráveis que a SATCC e a AASHTO. A norma brasileira induz os esforços mais gravosos.

Relativamente aos momentos torsores, as mesmas conclusões não são verificadas. Apesar da ABNT produzir os torsores mais elevados em quase todos os casos, o RSA em nenhuma situação apresentou resultados mais elevados que os da ABNT e do EC1, apesar de se aproximar dos valores do regulamento europeu no último caso de estudo. O RSA só deixou de ser o menos desfavorável, ao nível dos momentos torsores, nas obras com o vão central de 220,00 m.

Em tabuleiros estreitos e de médio vão, o RSA produz os efeitos de menor valor de entre os cinco regulamentos abordados. Para estruturas dentro desta gama de dimensões, o EC1 e a ABNT induzem os esforços mais desfavoráveis. No caso de tabuleiros com larguras correspondentes ao de estradas nacionais e com vãos na gama dos 60,00m, o regulamento português produz esforços superiores à AASHTO e menos gravosos que o EC1, a SATCC e a ABNT. O aumento do comprimento do vão levou a concluir que o RSA gera momentos fletores e esforços transversos muito semelhantes aos dos regulamentos europeu e sul-africano, tornando-se significativamente mais gravoso que a AASHTO. Em tabuleiros de obras que servem autoestradas, verifica-se que o RSA e o EC1 geram momentos fletores e esforços transversos muito idênticos e mais desfavoráveis que os da SATCC e da AASHTO. A ABNT é a norma mais desfavorável para todo o tipo de obras com características semelhantes às analisadas.

7.4 Resultados relevantes das análises na direção transversal

Na direção transversal foram estudados os máximos momentos fletores negativos, nas secções de apoio nas almas, e o máximo momento fletor positivo na laje intermédia, em tabuleiros com secção em caixa com 15,00 m e 26,40 m de largura (casos de estudo 3 e 6, respetivamente). Os resultados foram obtidos para as secções de meio vão e de apoio nos pilares.

Apesar do valor dos esforços aumentarem de um caso para o outro, não ocorre nenhuma alteração na sequência das normas mais desfavoráveis. Em ambas as estruturas foi o LM1 do EC1 que produziu os esforços mais gravosos. Por outro lado, o regulamento norte-americano gera os esforços de menor valor. O RSA, a par da SATCC, são as normas mais desfavoráveis logo após o EC1, enquanto que o regulamento brasileiro origina esforços ligeiramente maiores que os da AASHTO.

O modelo de sobrecarga condicionante do RSA, para todas as situações analisadas na direção transversal, é o veículo tipo, o que justifica a preponderância que as cargas concentradas têm na análise dos esforços transversais. Também o modelo NA(3) da SATCC, apesar de ser o mais ligeiro da norma, é o sistema condicionante na consola no caso de estudo 3, isto porque o afastamento entre cargas concentradas é menor do que nos restantes modelos.

Por estas razões, enquanto que na análise longitudinal os esforços de flexão e de corte são mais influenciados pelas cargas distribuídas, na análise transversal são os sistemas de cargas concentradas que maior preponderância têm nos momentos fletores. Nas consolas dos tabuleiros é mais desfavorável aplicar cargas concentradas menos afastadas e de maior intensidade e, para o momento positivo nas lajes intermédias, é mais desfavorável considerar carregamentos pontuais no centro da laje. Para o momento máximo negativo na laje é mais gravoso aplicar sobrecargas pontuais e mais próximas, a uma distância intermédia entre o eixo do tabuleiro e a secção de apoio nas almas.

Os resultados da análise transversal obtidos pelo método de elementos finitos (numérico) foram comparados com os efeitos calculados através de superfícies de influência. Esta técnica apresenta como principal vantagem ser menos morosa face ao método numérico. Escolhendo a superfície que mais se adequa às características do tabuleiro e ao tipo de esforço, os efeitos transversais são calculados de forma expedita. Contudo, trata-se de um método aproximado porque não considera todas as características de rigidez dos tabuleiros, nomeadamente a geometria e as ligações de encastramento elástico nas almas.

Em ambos os casos de estudo verificou-se uma maior proximidade dos momentos fletores negativos na secção de apoio nos pilares. Dado que as superfícies de influência consideram como condições de apoio o encastramento, e que na secção de apoio nos pilares a laje está mais encastrada nas almas devido à existência do diafragma, fica justificada a maior proximidade entre os resultados dos dois métodos nessa secção. Na secção de meio vão apenas os momentos fletores negativos na consola são idênticos nos dois métodos. Os momentos fletores negativos na laje, a meio vão, apresentam diferenças percentuais muito maiores devido às rotações que podem ocorrer na ligação da laje de plataforma às almas. Essa diferença é muito maior no caso de estudo 6, o que leva a concluir que os tabuleiros em caixão de grandes dimensões conferem um pequeno grau de encastramento à laje intermédia na zona dos vãos.

Relativamente ao momento positivo na laje, os momentos fletores do método numérico são maiores que os obtidos com as superfícies de influência. Enquanto que o método dos elementos finitos, por considerar as propriedades reais da estrutura, permite determinar com maior aproximação os momentos máximos na laje, o método das superfícies de influência é mais limitado, apresentando dificuldades no cálculo dos momentos fletores produzidos pelas cargas concentradas situadas no ponto central da laje. Por essa razão a qualidade de resultados é pior para a determinação dos momentos fletores positivos.

As diferenças de efeitos entre os dois métodos, verificadas essencialmente nos esforços na laje intermédia, levam a concluir que as superfícies de influência apresentam pior qualidade de resultados nas lajes. Na secção de meio vão longitudinal, nomeadamente em tabuleiros em caixão muito largos, a qualidade de resultados dos momentos negativos na laje não é boa, não sendo adequada a sua utilização para a determinação desses esforços. Contudo, nas secções de apoio em pilares, o método das superfícies de influência permitiu o cálculo de valores muito próximos dos valores numéricos.

7.5 Desenvolvimentos futuros

O estudo comparativo realizado tem muita utilidade no que se refere à perceção da influência das sobrecargas rodoviárias, definidas nos regulamentos abordados, em tabuleiros de médio e grande vão, com secção de nervura única e em caixão unicelular. O estudo apenas compara os efeitos das ações verticais rodoviárias. Seria interessante avaliar as consequências que os efeitos das sobrecargas teriam na quantidade de pré-esforço, que se prevê que seja, em geral, dimuta.

Seria igualmente interessante proceder a um estudo das características resistentes de algumas pontes construídas em Portugal, onde se usou como base de dimensionamento o RSA, e proceder à verificação de segurança dessas mesmas pontes considerando as sobrecargas definidas no EC1.

Referências bibliográficas

AASHTO (2007); *LFRD Bridge Design Specifications – 5th Edition*; AASHTO, Washington DC.

EC1 – Parte 2 (2003); *EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridge*; CEN, Bruxelas.

ALVES, M. (2012); *Modelação de sobrecargas rodoviárias. Estudo comparativo entre diferenças normas*, Tese de Mestrado; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL – IPL), Lisboa.

BAKHT, B., HOLLAND, D. (1976); *A manual method for the elastic analysis of wide cantilever slabs of linearly varying thickness*, Canadian journal of civil engineering, 3(4) 523-530; Canada.

CALÇADA, R.A. (2001); *Avaliação experimental e numérica de efeitos dinâmicos de cargas de tráfego em pontes rodoviárias*, Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.

CARLSSON, B., DANIELSSON, L. (1999); *Nordic support to SATCC-TU*; SIDA, Stockholm.

CAVALCANTI, P. (2004); *Trens tipo de projeto AP-02*, Sebenta de estudo; Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS), Sorocaba.

CRUZ, L. (2013); *Efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias definidas nas normas mais utilizadas pela engenharia portuguesa em tabuleiros vigados de betão*, Tese de Mestrado; Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT – UNL), Almada.

FREITAS, J.M. (2008); *Acção do tráfego rodoviário em pontes de betão armado*, Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.

HOMBERG, H. (1972); *Dalles d'épaisseur variable*; Éditions Dunod, Paris.

JONES, D. (2002); *The development of SATCC standard specifications and design guides for roads and bridges*, Artigo Científico; CSIR Transportek, South Africa.

MASCARANHAS, A. (1978); *Segurança e acções em pontes rodoviárias: Acções verticais devidas ao tráfego e correspondentes sistemas regulamentares europeus de cargas de cálculo*, Relatório de Investigação; LNEC, Lisboa.

MILLER, R., SWANSON, J. (2007); *AASHTO LRFD bridge design specifications: Loading and general information*; University of Cincinnati, Cincinnati.

MOSES, F., GHOSN, M. (1985); *A comprehensive study of bridge loads and reliability, report FHWA/OH-85/005*; Case Western Reserve University, Cleveland.

MUFTI, A., BAKHT, B., JAEGER, L. (1993); *Moments in deck slabs due to cantilever loads*, Journal of structural engineering, Vol.119, No. 6; American Society of Civil Engineers (ASCE), USA.

NBR – 7188 (1982); *Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*; ABNT, Rio de Janeiro.

NP EC1 – Parte 2 (2012); *Proposta de Anexo Nacional de Aplicação da Norma NP EN 1991-2*; CTPN, Portugal.

PIPA, M. (2009); *Evolução da regulamentação de estruturas em Portugal*; LNEC, Lisboa.

RSA (1983); *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes – Decreto Lei nº 235/83*; MOPTC, Portugal.

ROBALO, J.N. (2013); *Structural analysis of road bridge decks: Comparison between the Portuguese code (RSA) and the Eurocode Load Model 1*, Tese de Mestrado; Instituto Superior Técnico (IST – UL), Lisboa.

SATCC (2001); *Code of practice for the design of road bridges and culverts*; SATCC, South Africa.

SAWKO, F., MILLS, J. (1971); *Design of cantilever slabs for spine beam bridges. Developments in bridge design and construction*; Proc. Cardiff Conf. Crosby Lockwood and Son Ltd., London.

ANEXOS

Anexo A1

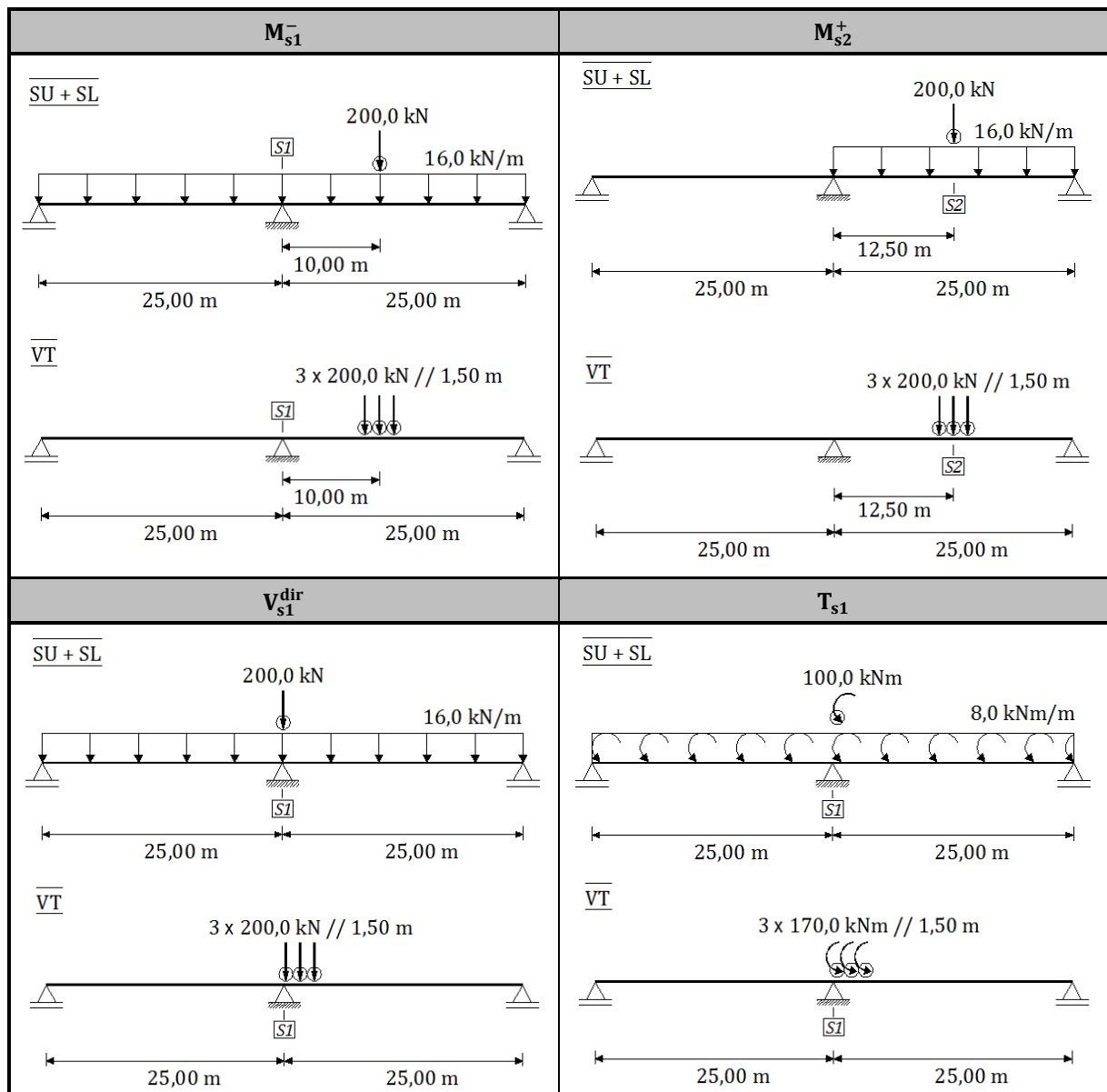
Esquemas dos carregamentos da análise longitudinal

Apresentam-se os carregamentos dos modelos de sobrecarga utilizados na análise longitudinal e, no caso dos modelos que requerem a discretização do tabuleiro em vias fictícias, a correspondente divisão do tabuleiro em diferentes vias. Os apoios seguidamente representados são encastrados à torção.

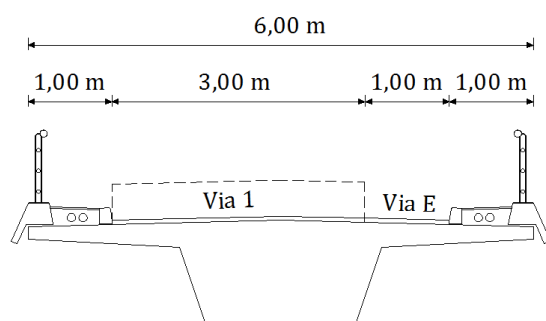
Os esquemas apresentados são meramente representativos. Apesar dos comprimentos dos vãos serem proporcionais, devido à diferença na gama de valores os afastamentos entre as cargas não apresentam proporcionalidade relativamente ao comprimento dos vãos.

A1.1 – Caso de Estudo 1

RSA

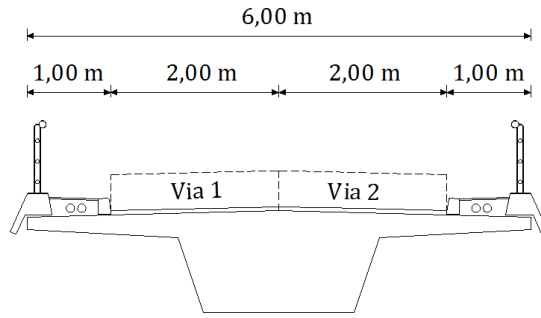


EC1



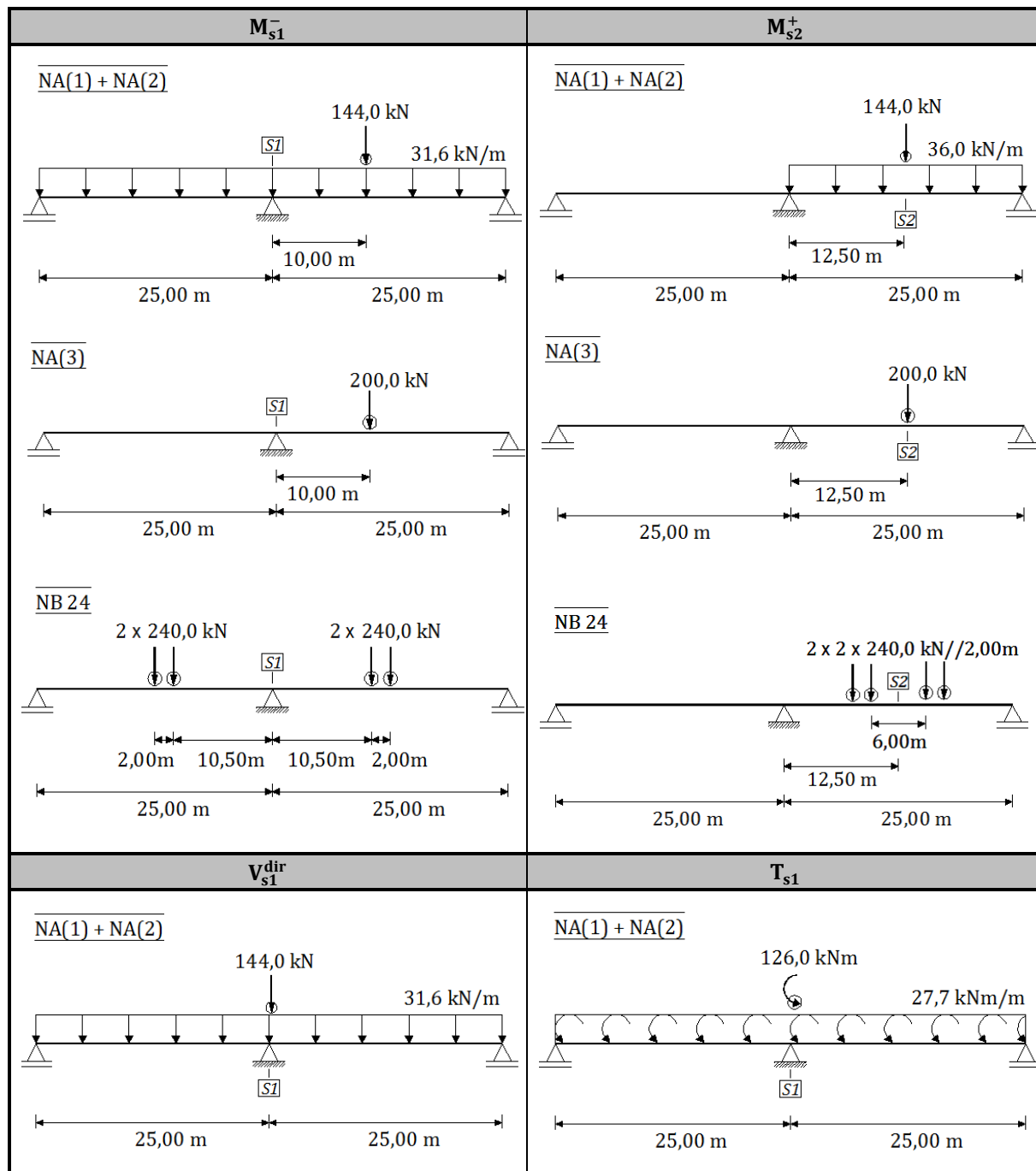
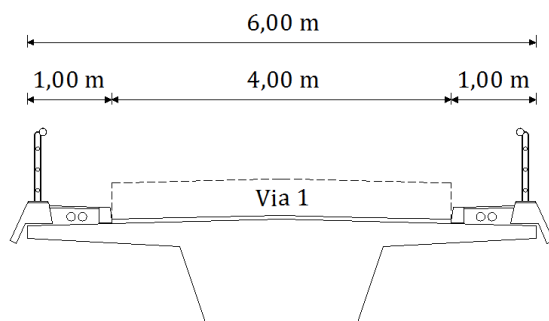
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">2 x 270,0 kN // 1,20 m 21,4 kN/m</p> <p style="text-align: center;">10,00 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">2 x 270,0 kN // 1,20 m 21,4 kN/m</p> <p style="text-align: center;">12,50 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>
<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">10,00 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>	<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">12,50 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">2 x 270,0 kN // 1,20 m 21,4 kN/m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">2 x 243,0 kNm // 1,20 m 12,6 kNm/m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>
<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>	<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">306,0 kNm</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p>

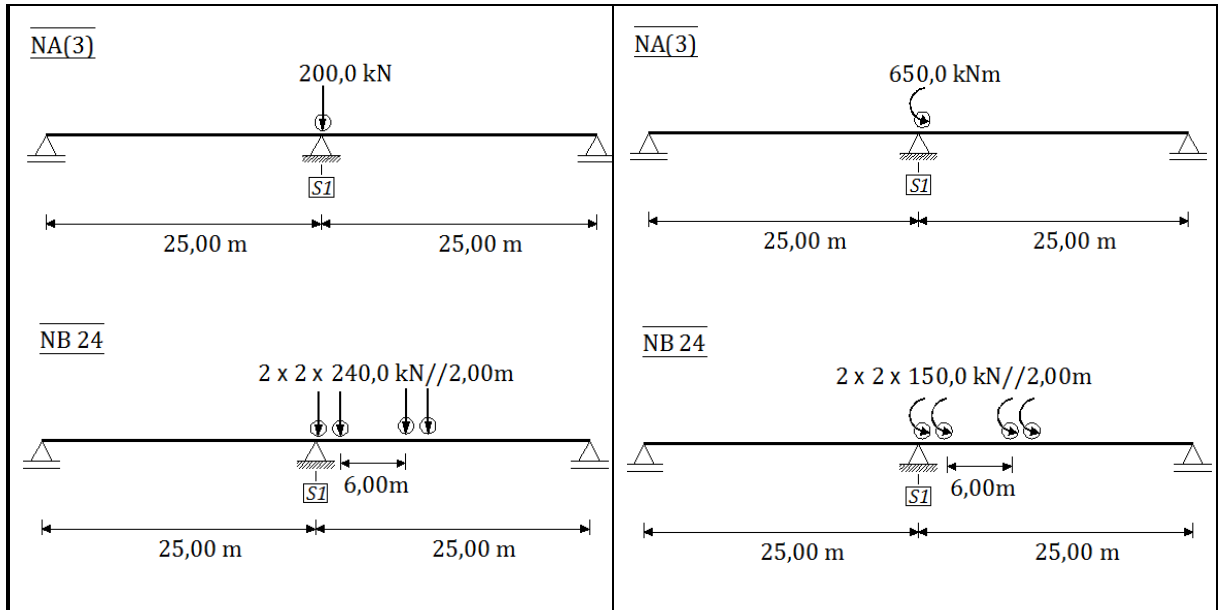
AASHTO



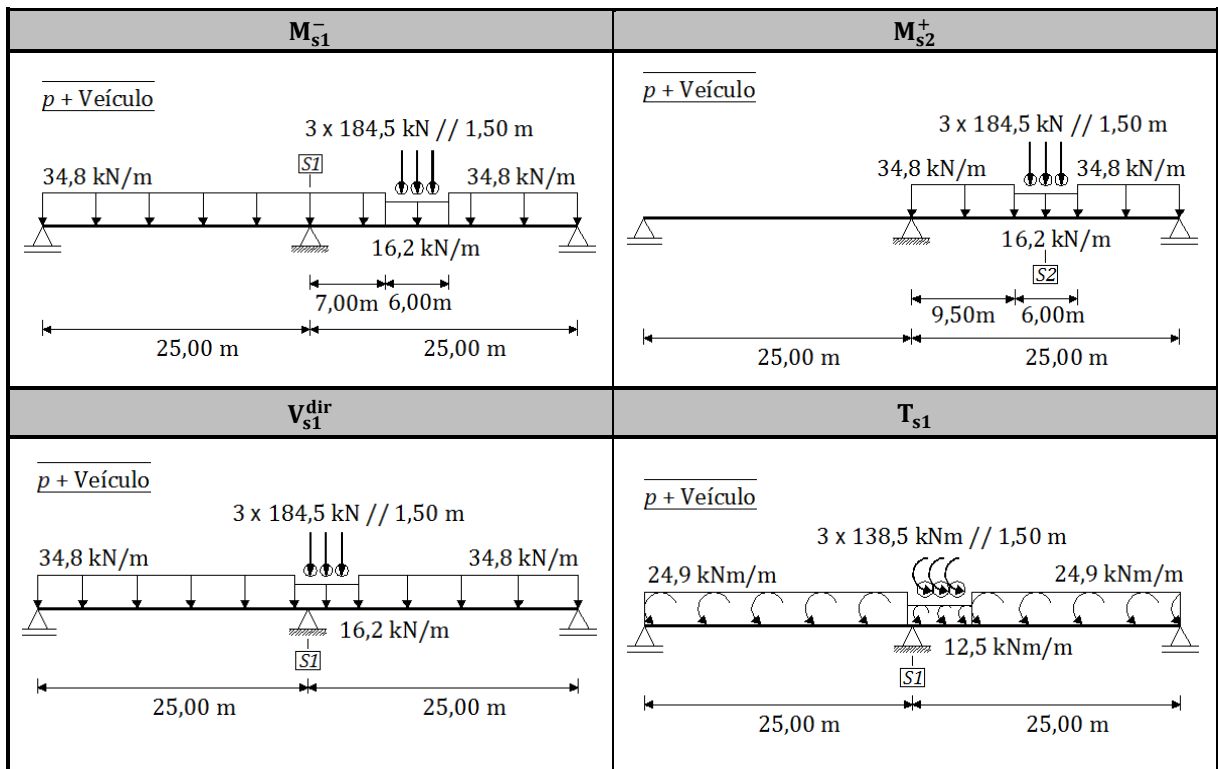
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>

SATCC



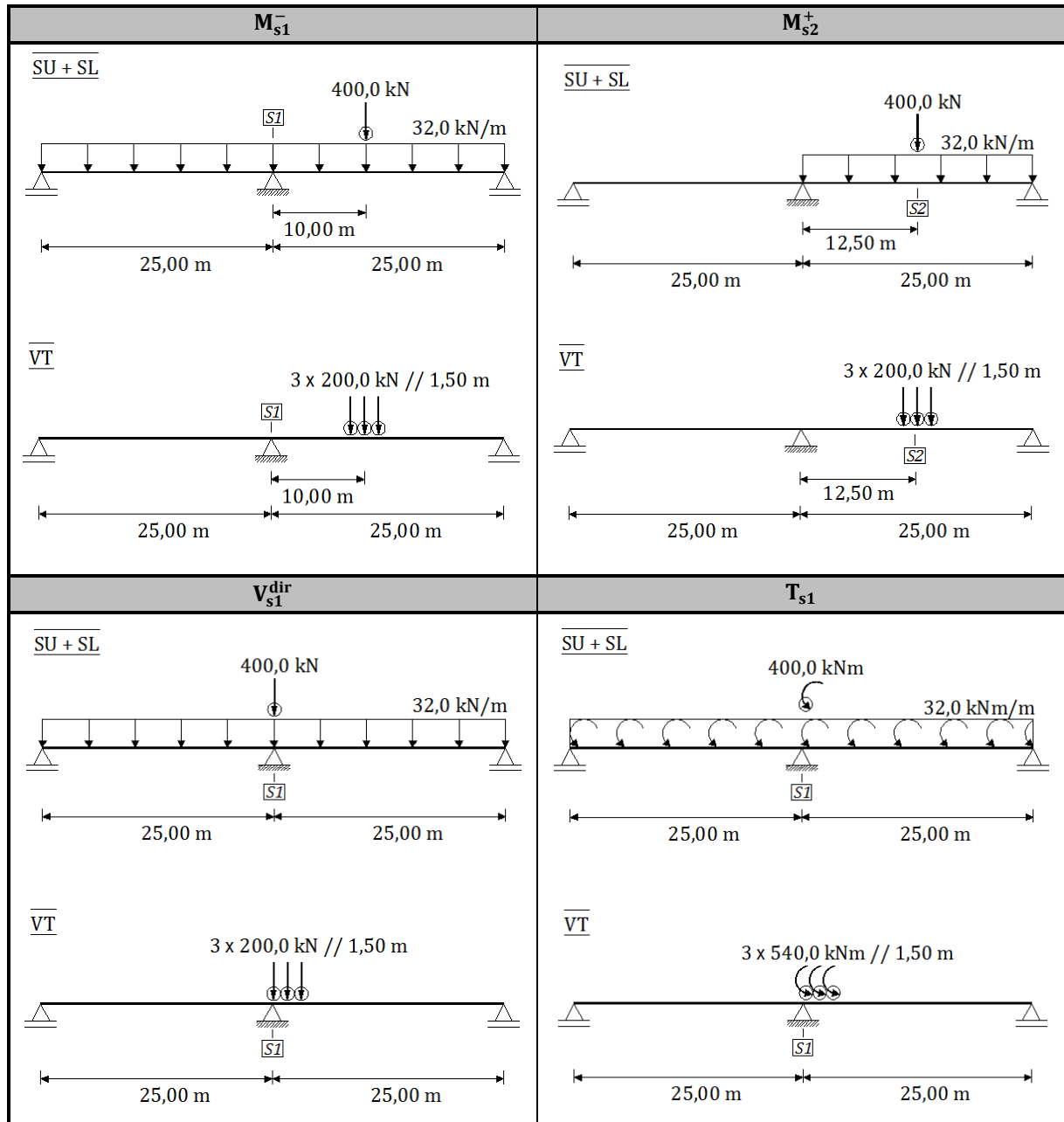


ABNT

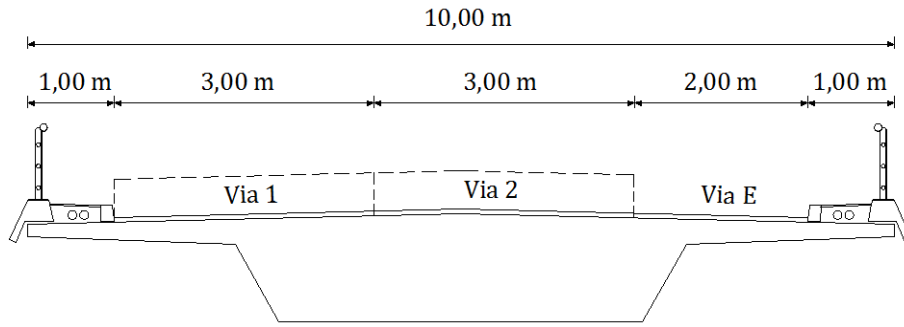


A1.2 - Caso de Estudo 2

RSA

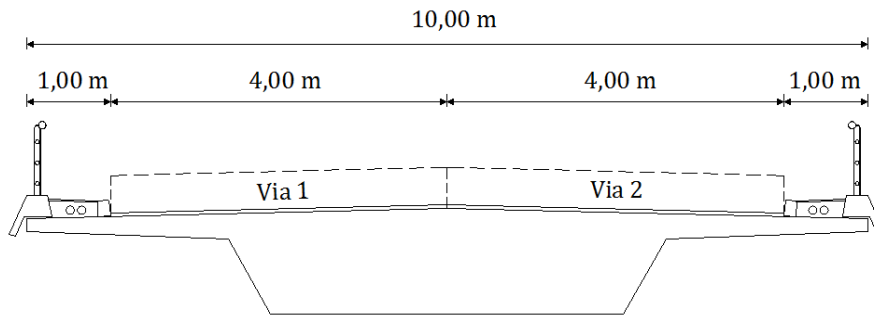


EC1



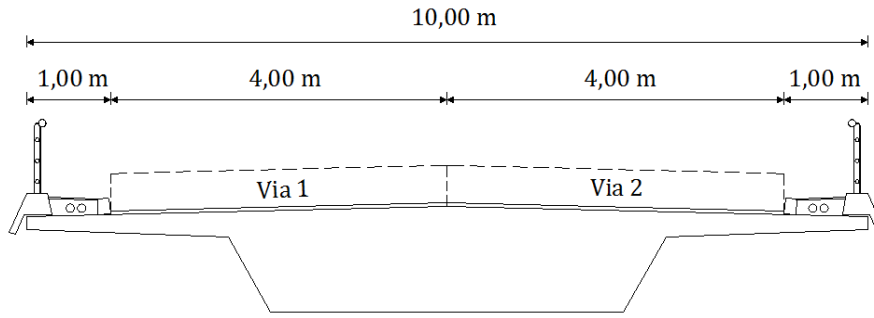
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">$2 \times 430,0 \text{ kN} // 1,20 \text{ m}$</p> <p style="text-align: center;">$31,4 \text{ kN/m}$</p> <p style="text-align: center;">10,00 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">$2 \times 430,0 \text{ kN} // 1,20 \text{ m}$</p> <p style="text-align: center;">$31,4 \text{ kN/m}$</p> <p style="text-align: center;">12,50 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S2</p>
<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">10,00 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>	<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">12,50 m</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S2</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">$2 \times 430,0 \text{ kN} // 1,20 \text{ m}$</p> <p style="text-align: center;">$31,4 \text{ kN/m}$</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p style="text-align: center;">$2 \times 820,0 \text{ kNm} // 1,20 \text{ m}$</p> <p style="text-align: center;">$48,6 \text{ kNm/m}$</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>
<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">360,0 kN</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>	<p><u>LM2</u></p> <p style="text-align: center;">972,0 kNm</p> <p style="text-align: center;">25,00 m 25,00 m</p> <p style="text-align: center;">S1</p>

AASHTO

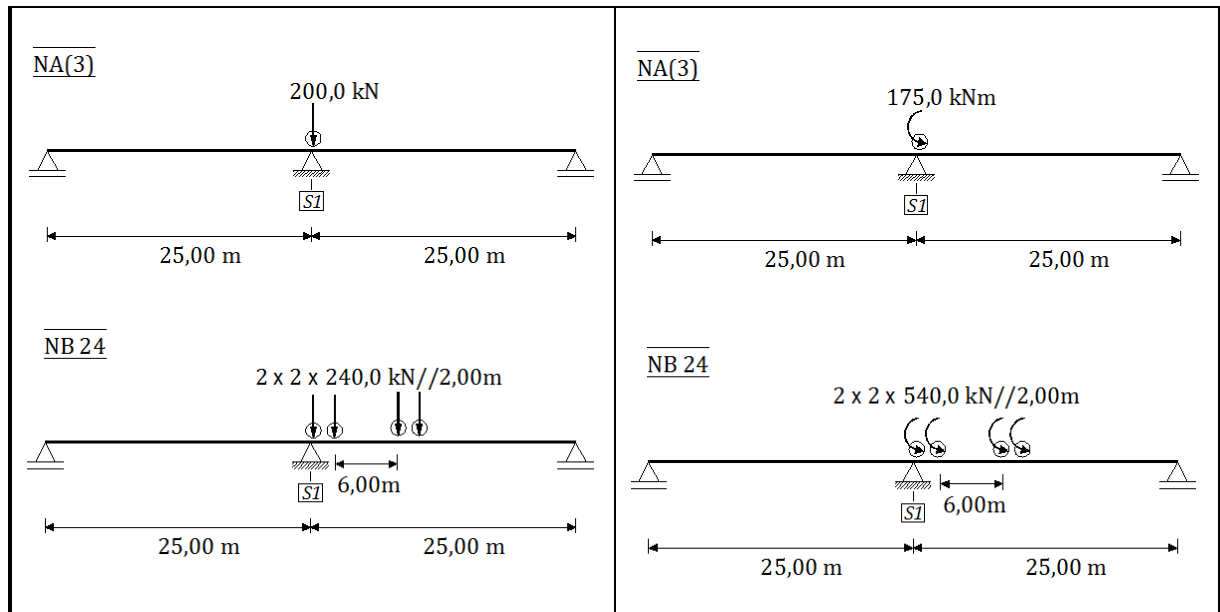


M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>

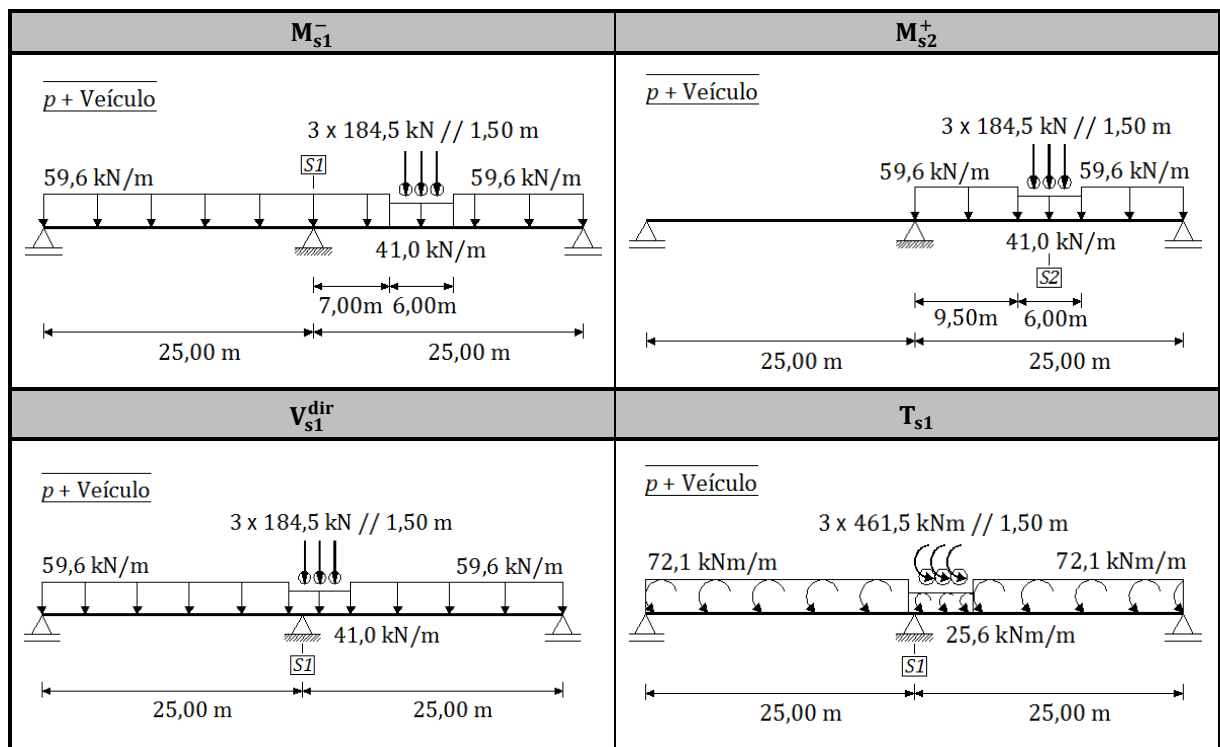
SATCC



M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p>
<p><u>NA(3)</u></p>	<p><u>NA(3)</u></p>
<p><u>NB 24</u></p>	<p><u>NB 24</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p>

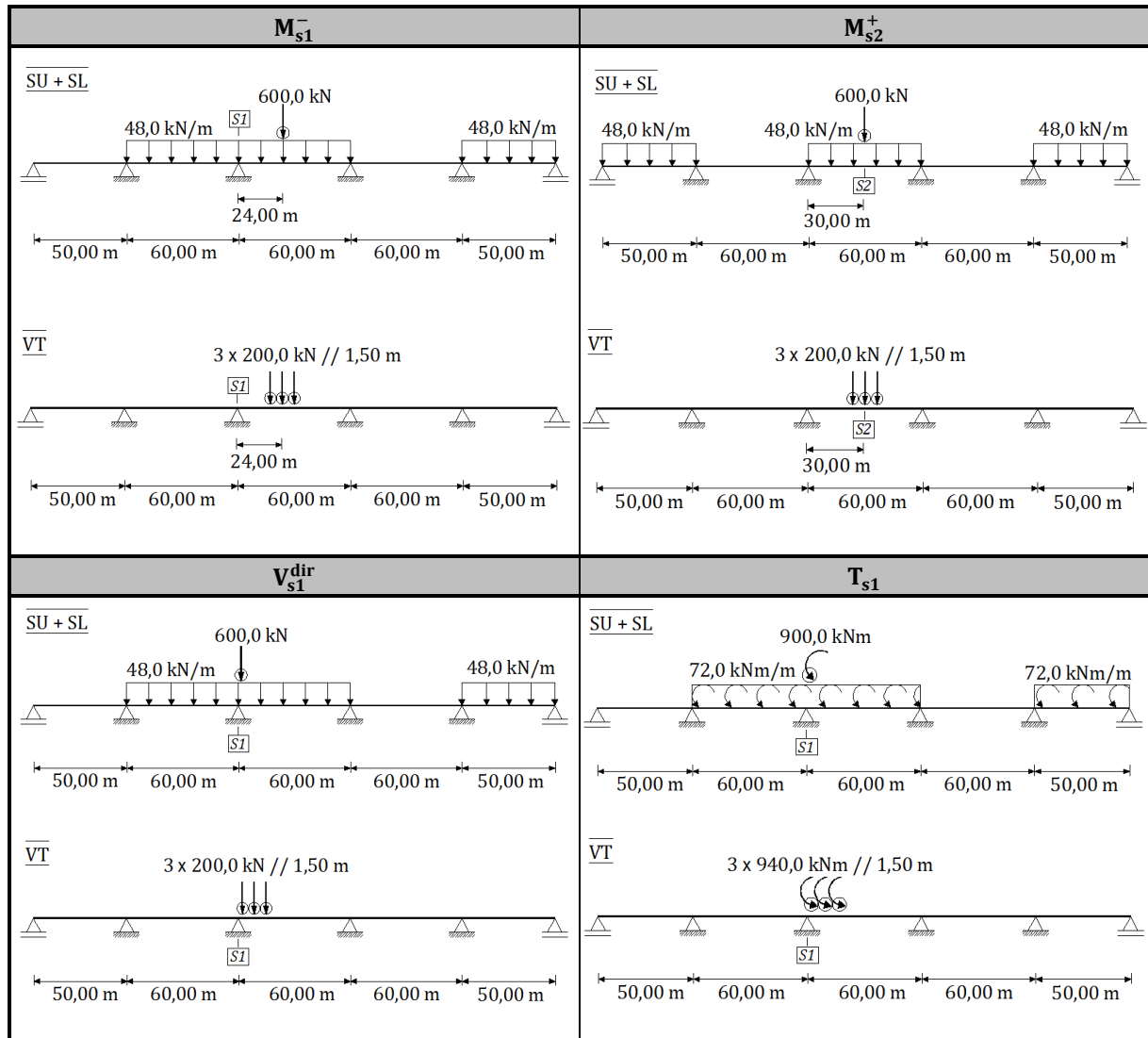


ABNT

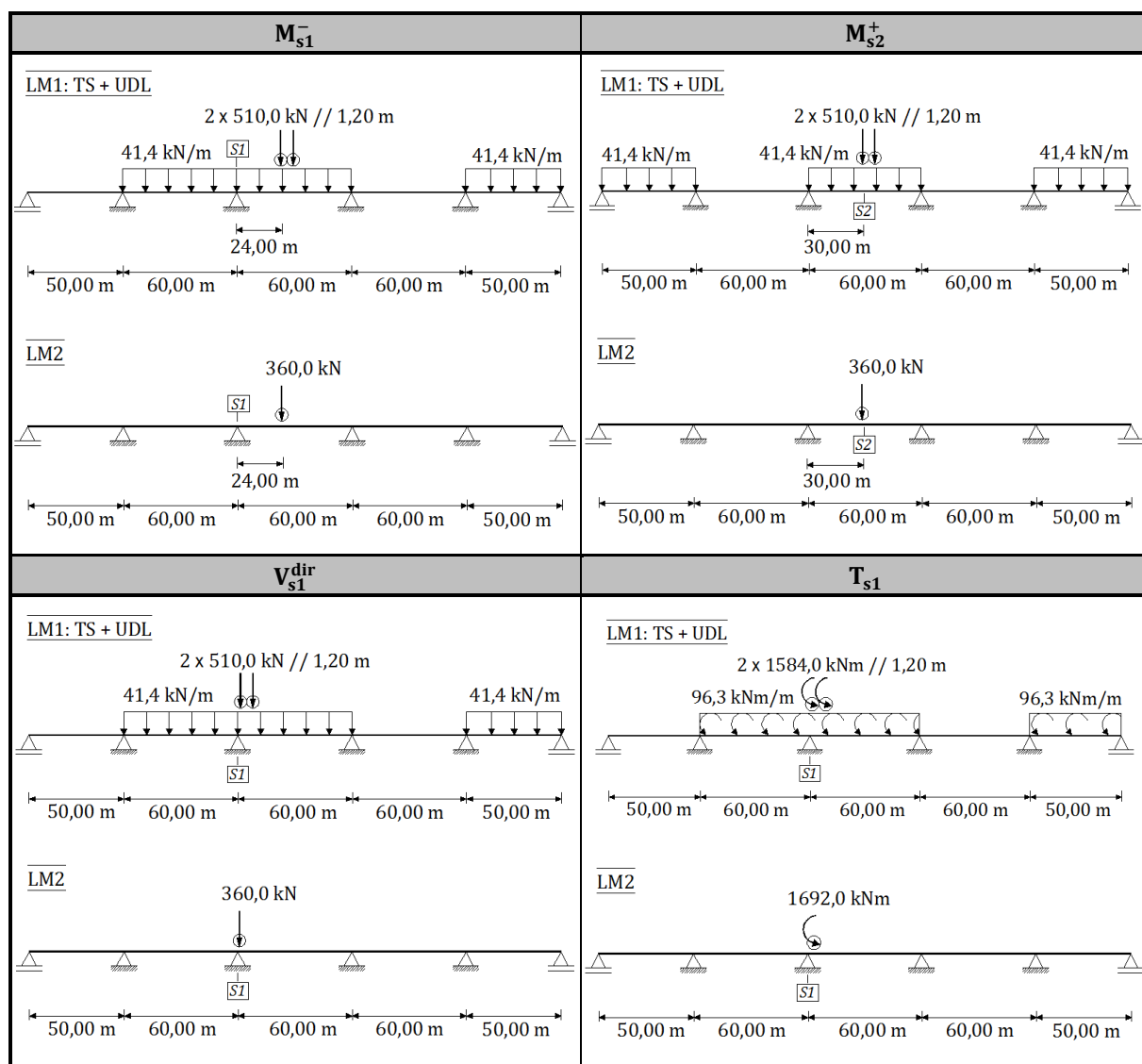
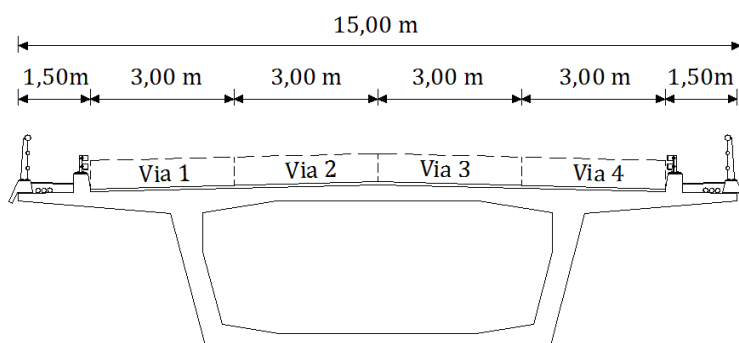


A1.3 - Caso de Estudo 3

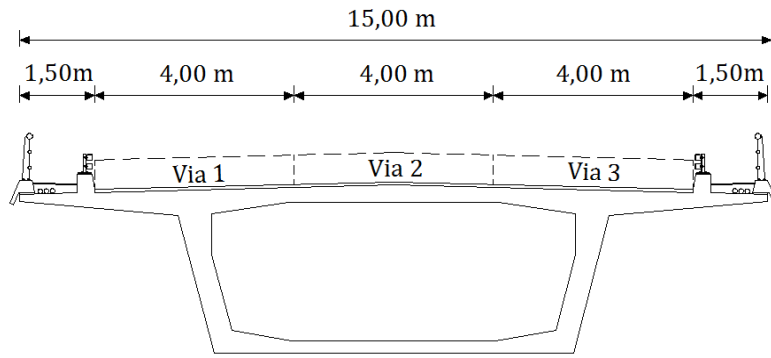
RSA



EC1

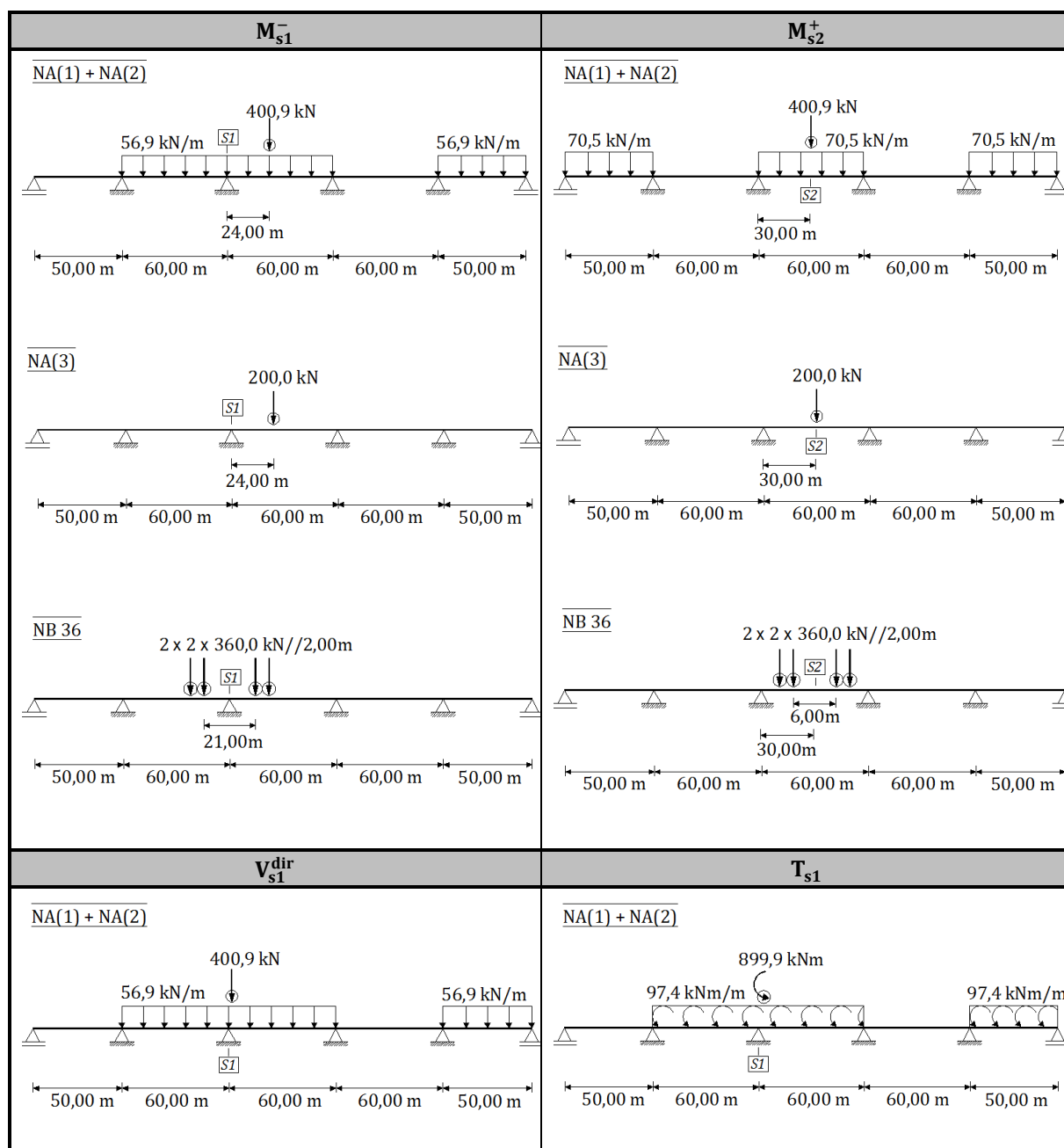
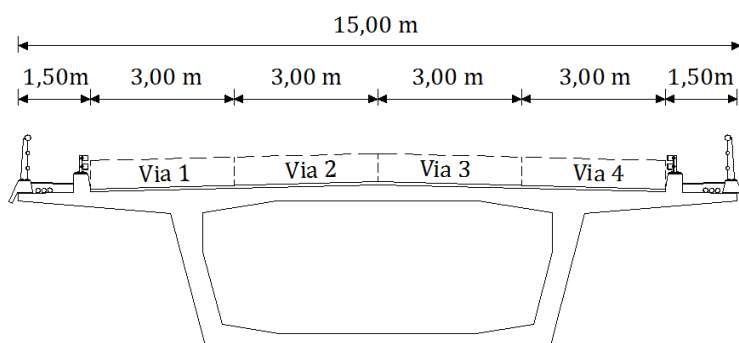


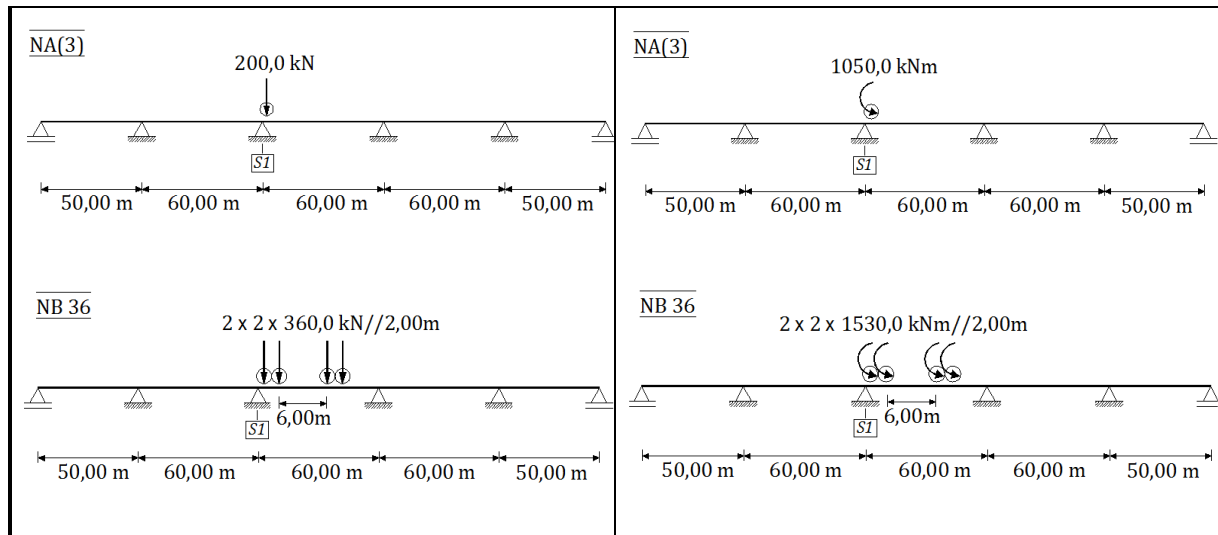
AASHTO



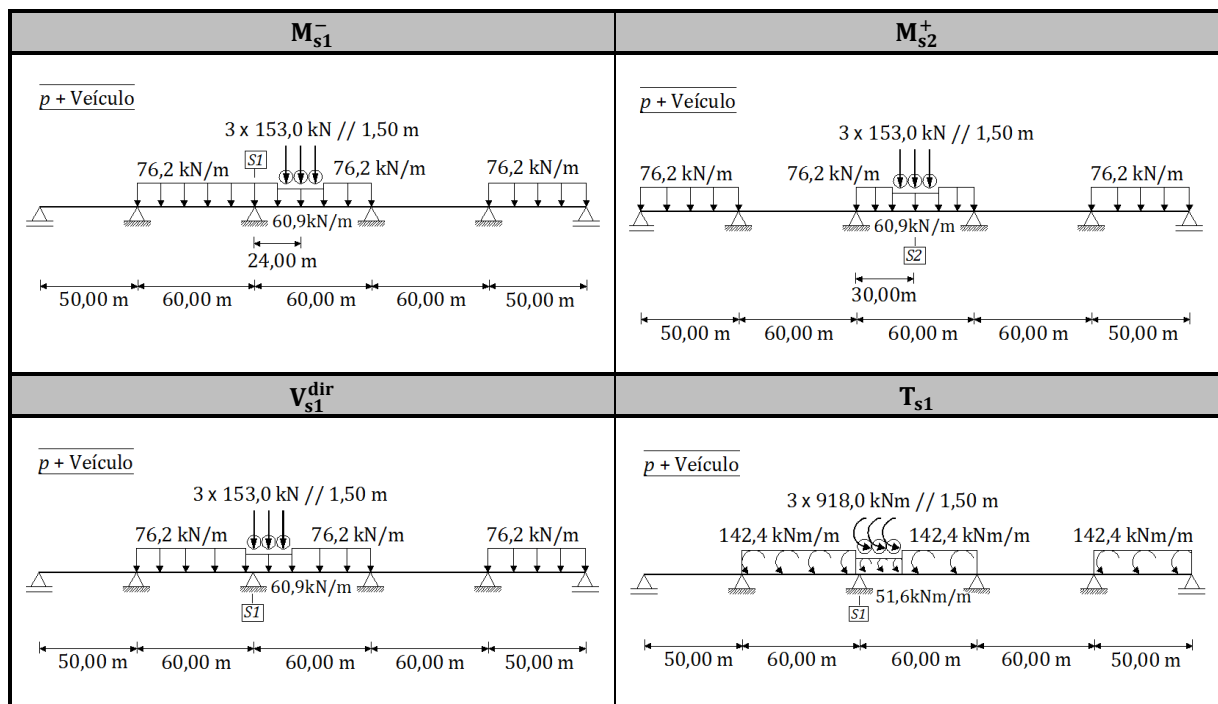
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><i>Lane Load + Truck</i></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p><i>Lane Load + Truck</i></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><i>Lane Load + Tandem</i></p>
<p>V_{s1}^{dir}</p> <p><i>Lane Load + Truck</i></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><i>Lane Load + Tandem</i></p>	<p>T_{s1}</p> <p><i>Lane Load + Truck</i></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><i>Lane Load + Tandem</i></p>

SATCC



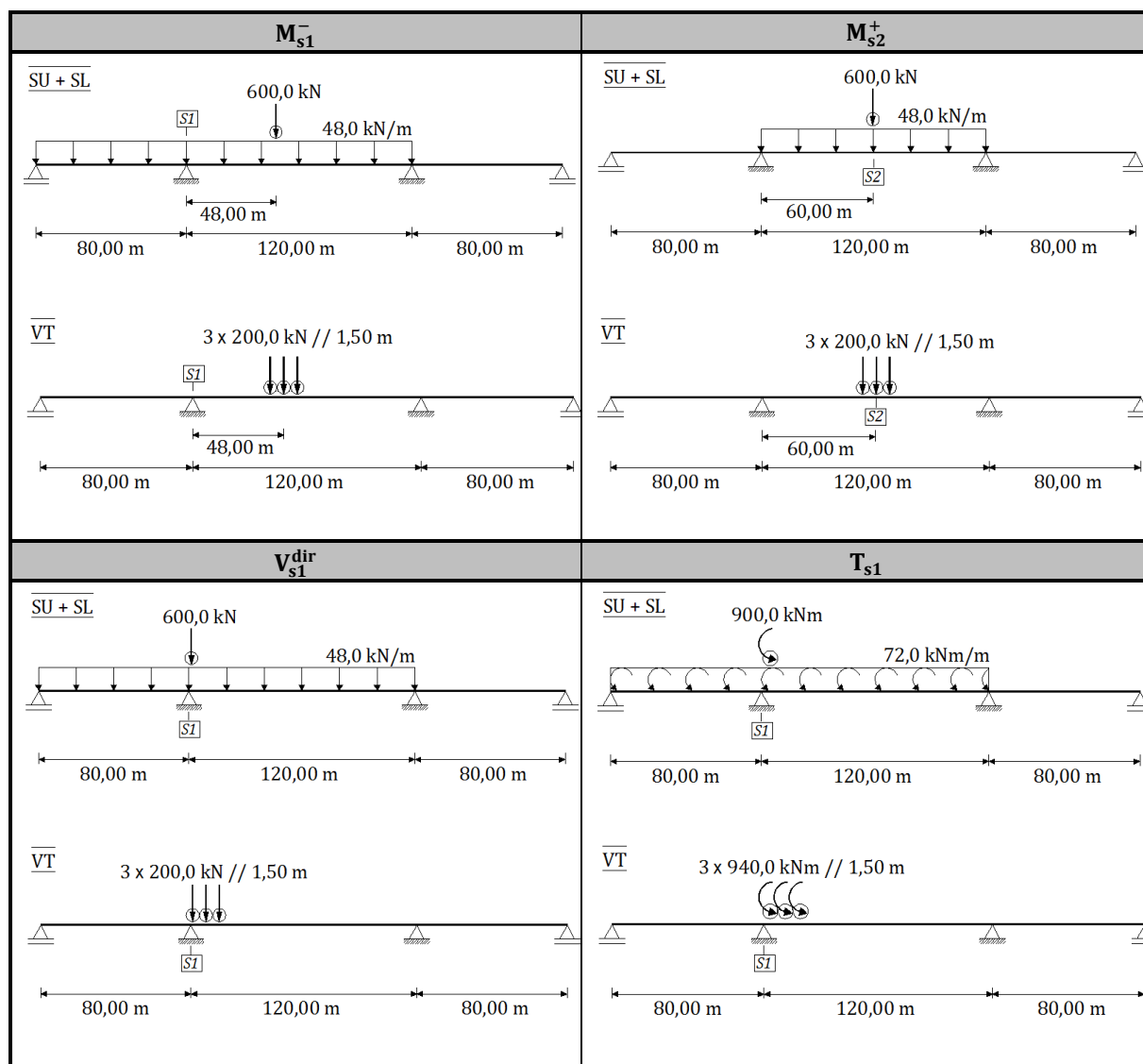


ABNT

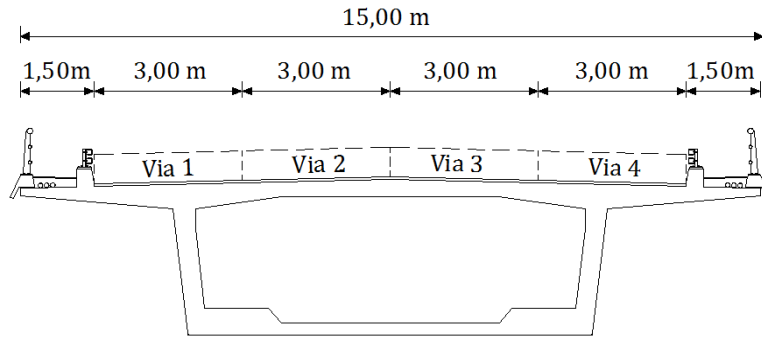


A1.4 - Caso de Estudo 4

RSA

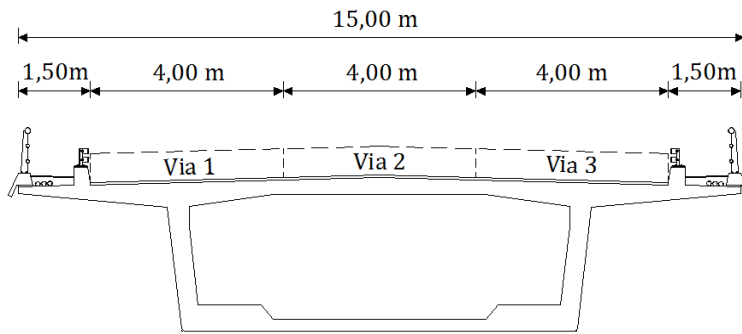


EC1



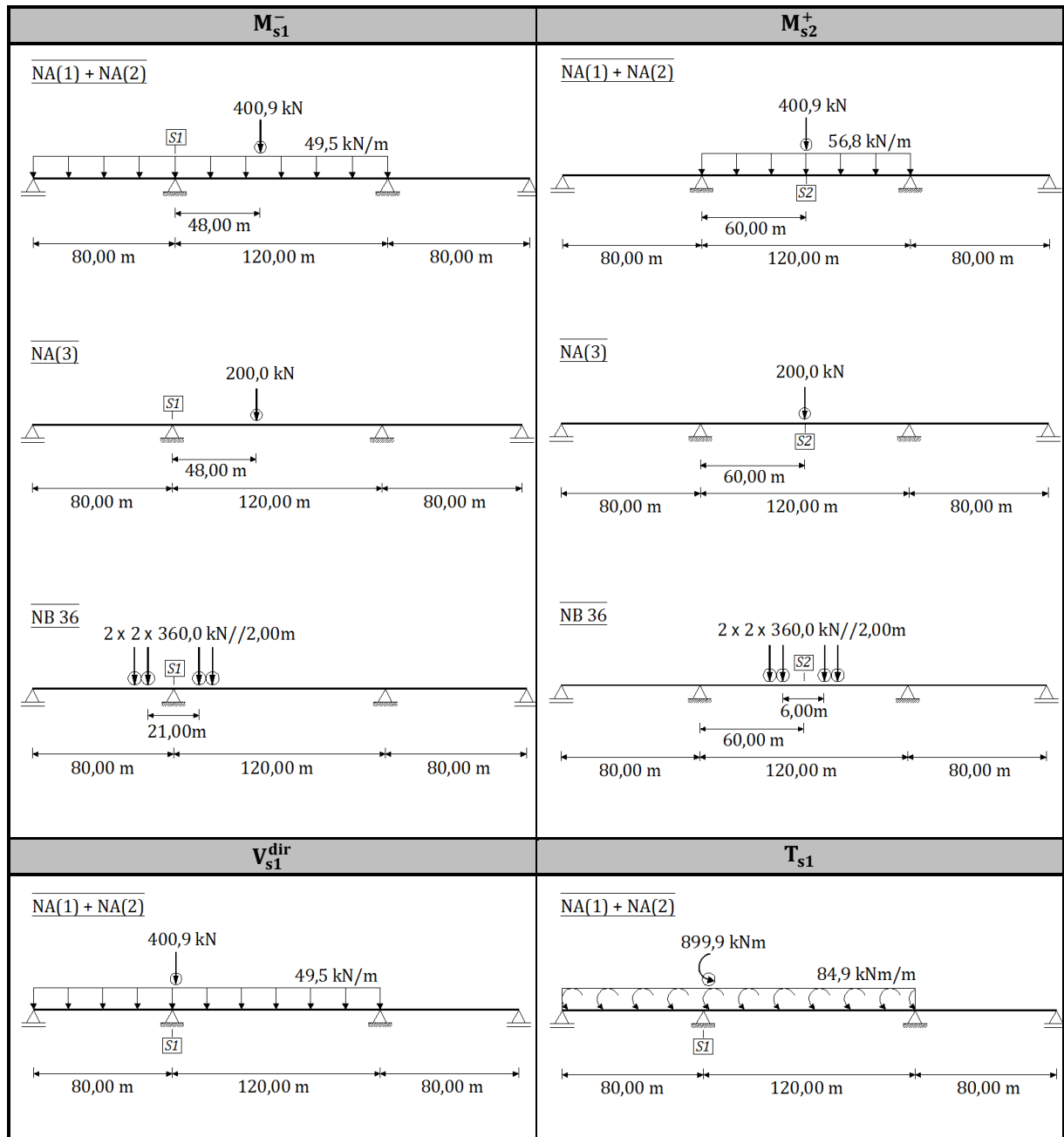
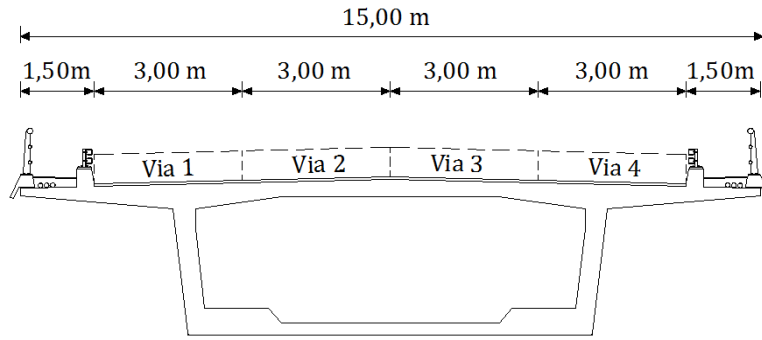
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m 41,4 kN/m</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p> <p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m 41,4 kN/m</p> <p>80,00 m 60,00 m 120,00 m 80,00 m</p> <p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>80,00 m 60,00 m 120,00 m 80,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m 41,4 kN/m</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p> <p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 1584,0 kNm // 1,20 m 96,3 kNm/m</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p> <p><u>LM2</u></p> <p>1692,0 kNm</p> <p>80,00 m 48,00 m 120,00 m 80,00 m</p>

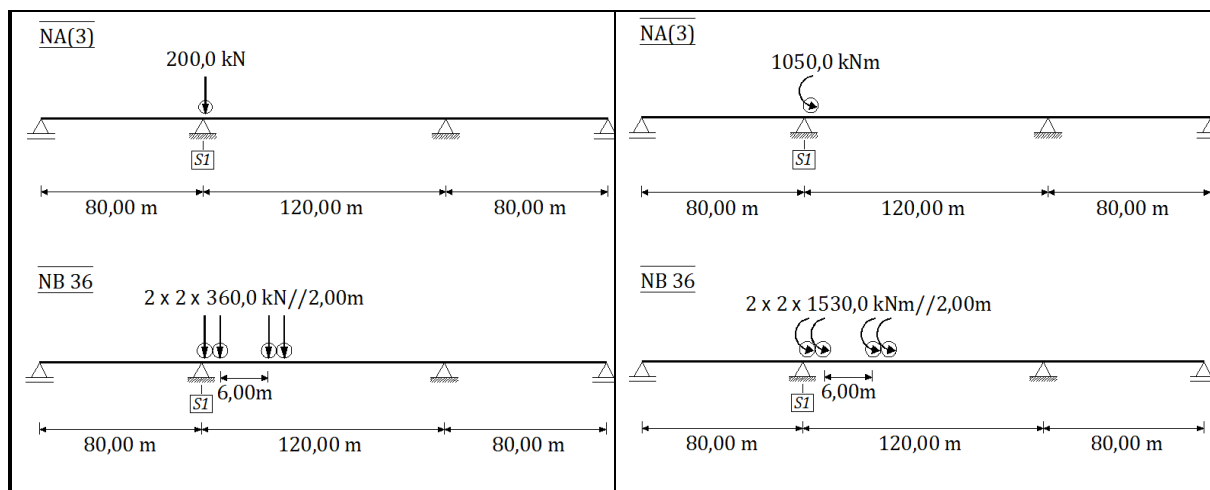
AASHTO



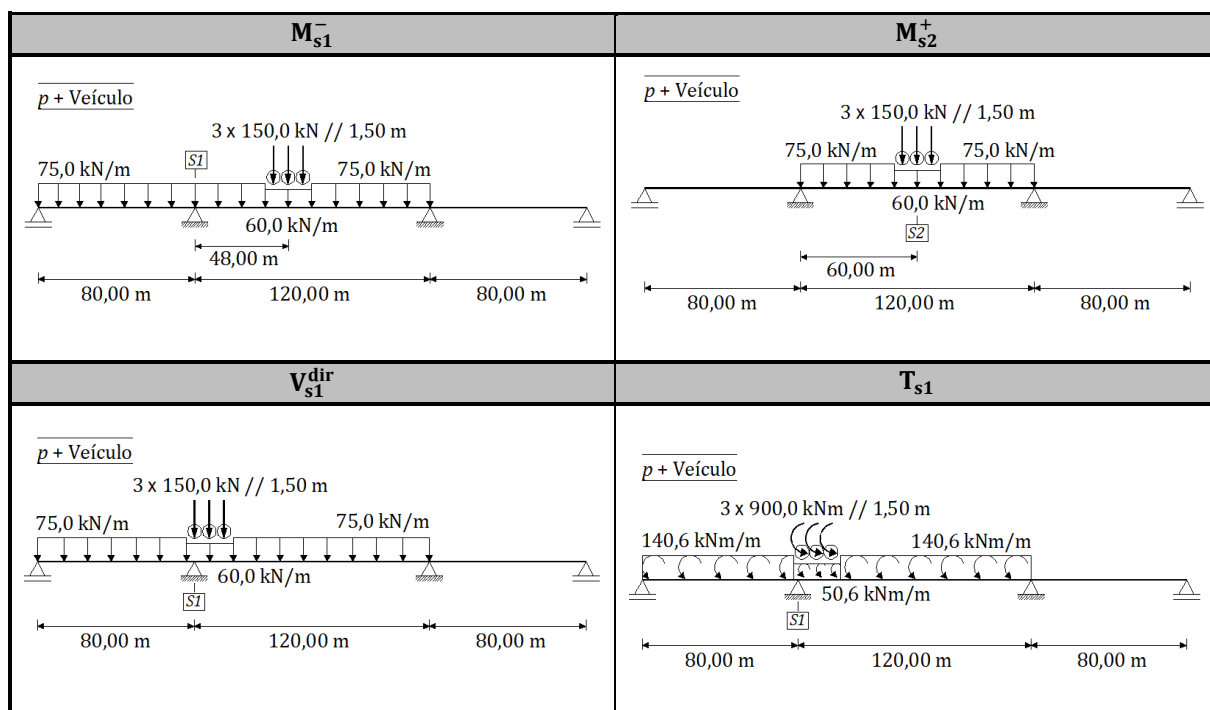
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>

SATCC





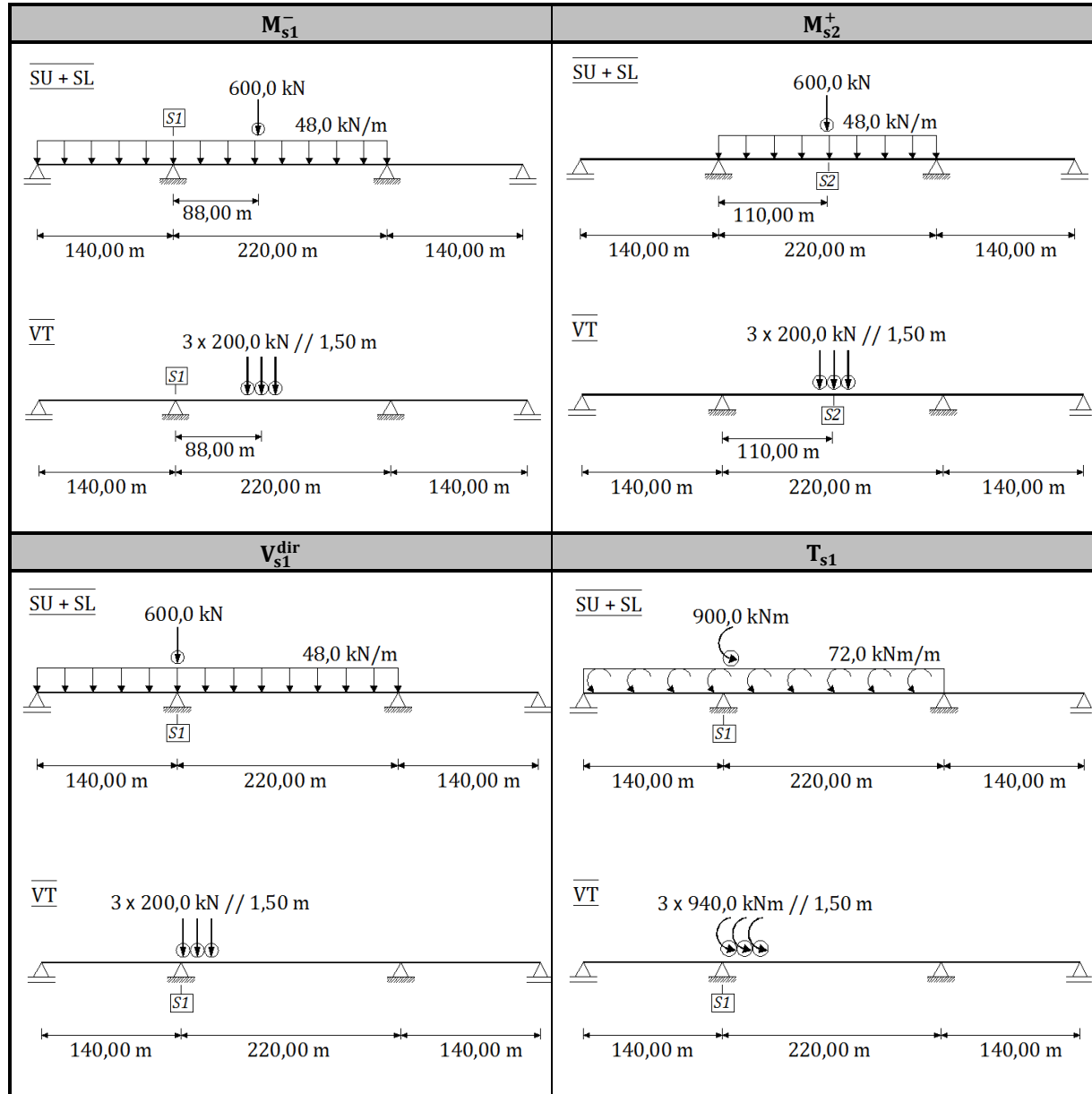
ABNT



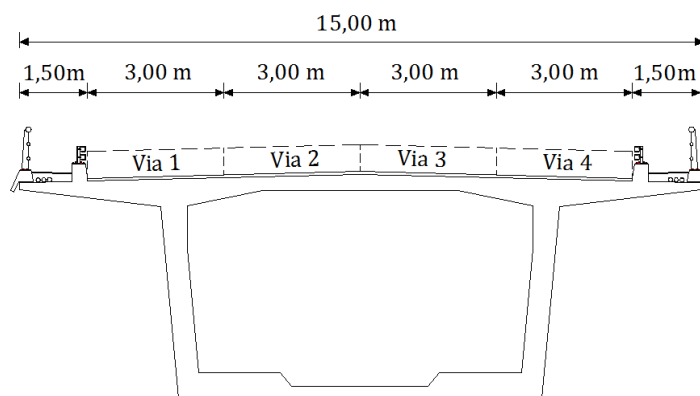
A1.5 - Caso de Estudo 5

Para facilitar a representação, nas figuras foram considerados apoios fixos no topo dos pilares, nos casos de estudo 5 e 6.

RSA

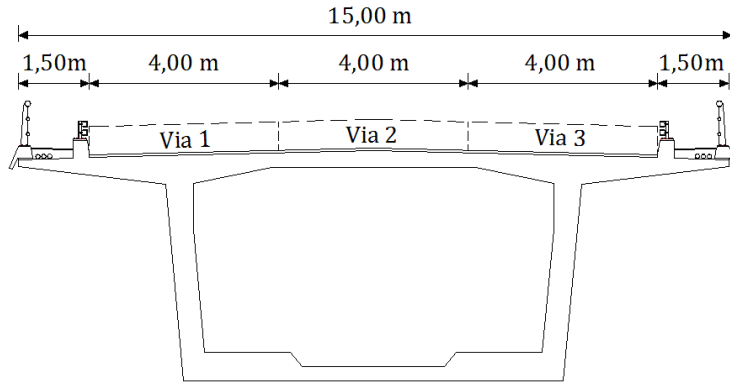


EC1



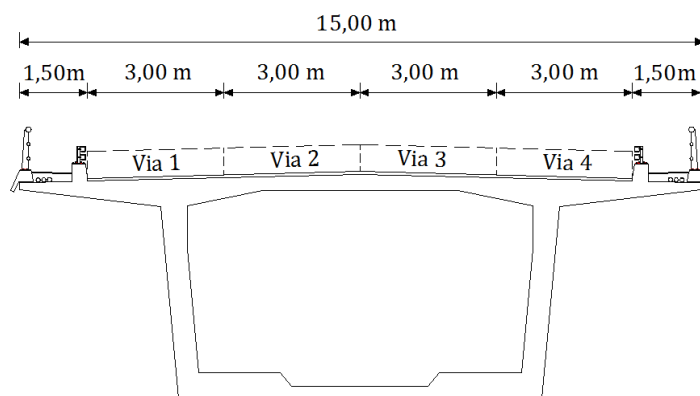
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m</p> <p>41,4 kN/m</p> <p>88,00 m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m</p> <p>41,4 kN/m</p> <p>110,00 m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>88,00 m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>110,00 m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 510,0 kN // 1,20 m</p> <p>41,4 kN/m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>LM1: TS + UDL</u></p> <p>2 x 1584,0 kNm // 1,20 m</p> <p>96,3 kN/m</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>LM2</u></p> <p>360,0 kN</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>LM2</u></p> <p>1692,0 kNm</p> <p>140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>

AASHTO

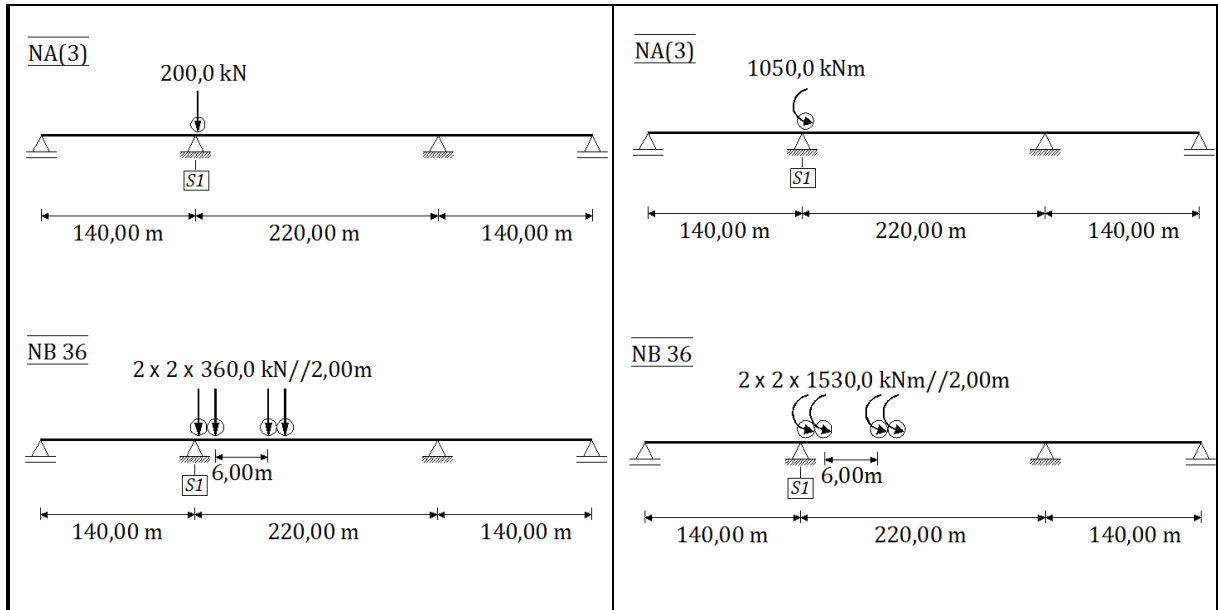


M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>Lane Load + Truck</u></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p><u>Lane Load + Truck</u></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><u>Lane Load + Tandem</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>Lane Load + Truck</u></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><u>Lane Load + Tandem</u></p>	<p><u>Lane Load + Truck</u></p> <p>*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p><u>Lane Load + Tandem</u></p>

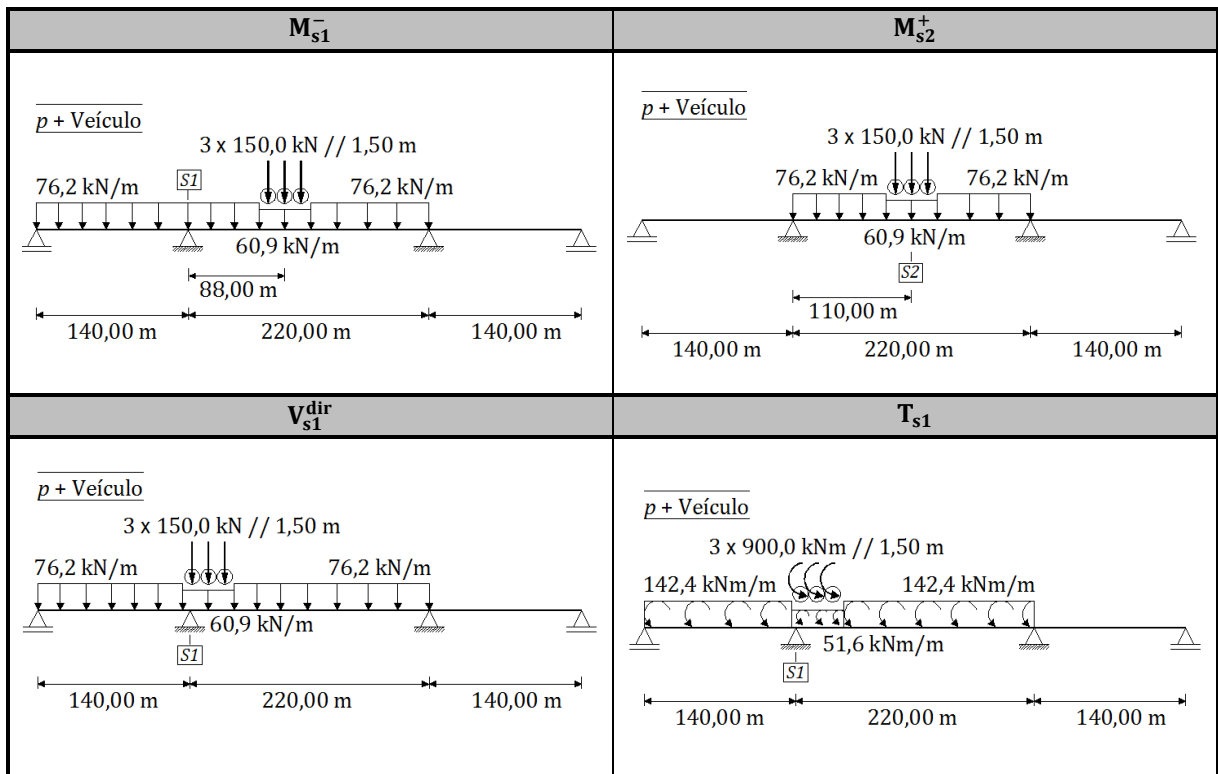
SATCC



M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>400,9 kN 43,0 kN/m 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>400,9 kN 48,3 kN/m 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>NA(3)</u></p> <p>200,0 kN 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(3)</u></p> <p>200,0 kN 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>NB 36</u></p> <p>2 x 2 x 360,0 kN//2,00m 21,00m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NB 36</u></p> <p>2 x 2 x 360,0 kN//2,00m 6,00m 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>400,9 kN 43,0 kN/m 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>899,9 kNm 73,6 kNm/m 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>

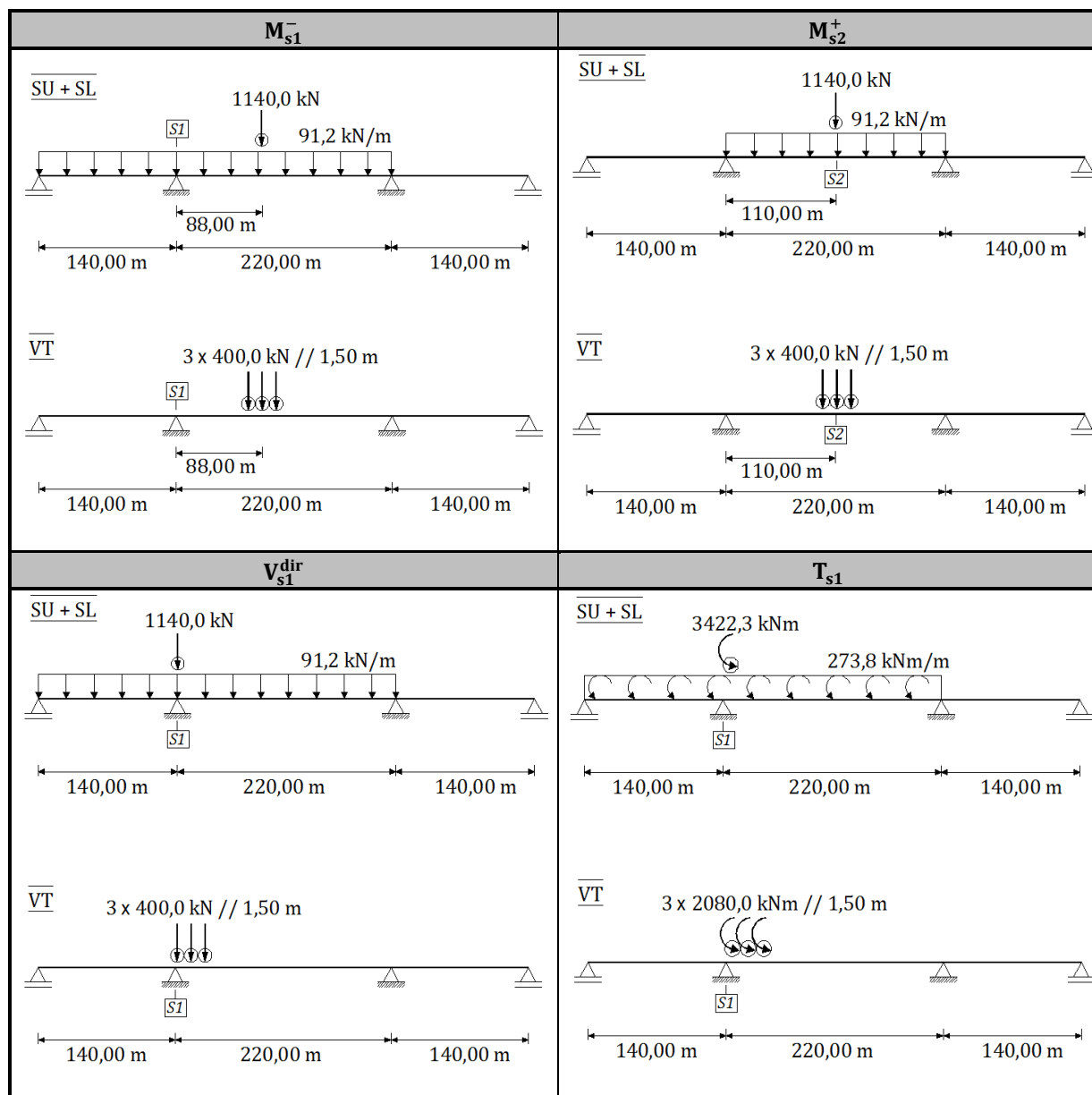


ABNT

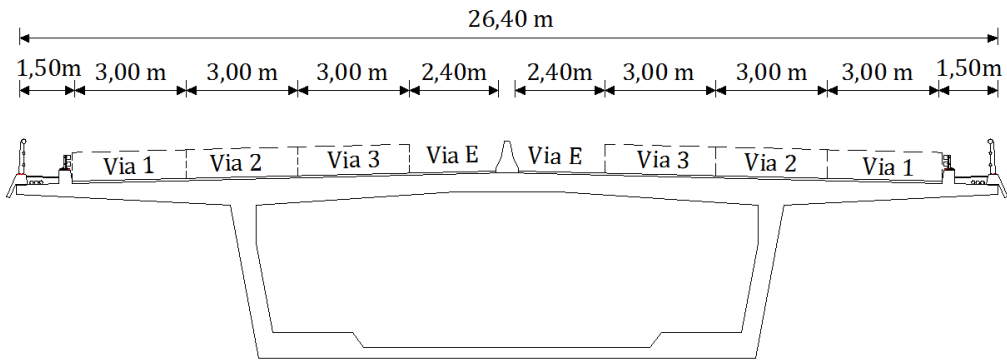


A1.6 - Caso de Estudo 6

RSA

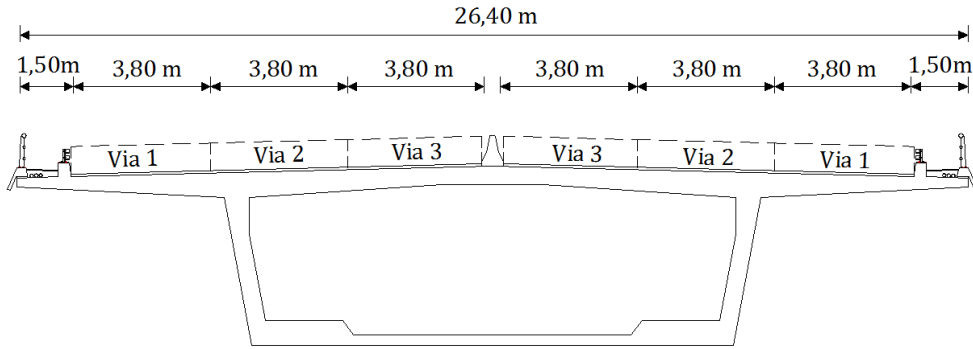


EC1



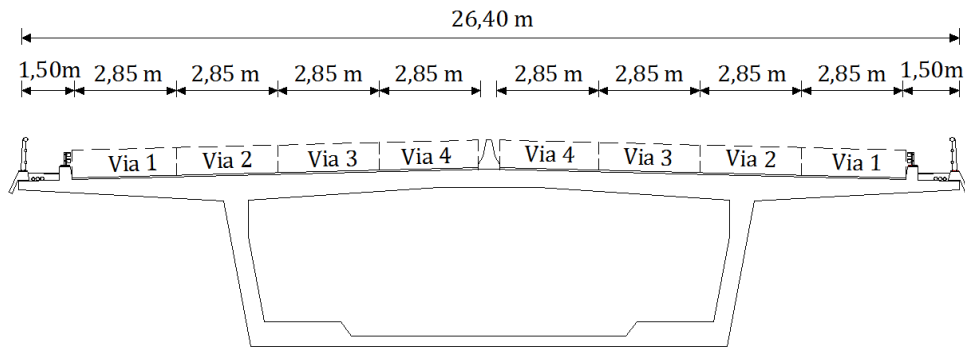
M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p>LM1: TS + UDL</p> <p>2 x 1020,0 kN // 1,20 m 79,8 kN/m 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p> <p>LM2</p> <p>360,0 kN 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p>LM1: TS + UDL</p> <p>2 x 1020,0 kN // 1,20 m 79,8 kN/m 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p> <p>LM2</p> <p>360,0 kN 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p>LM1: TS + UDL</p> <p>2 x 1020,0 kN // 1,20 m 79,8 kN/m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p> <p>LM2</p> <p>360,0 kN 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p>LM1: TS + UDL</p> <p>2 x 4395,0 kNm // 1,20 m 287,3 kNm/m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p> <p>LM2</p> <p>3744,0 kNm 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>

AASHTO

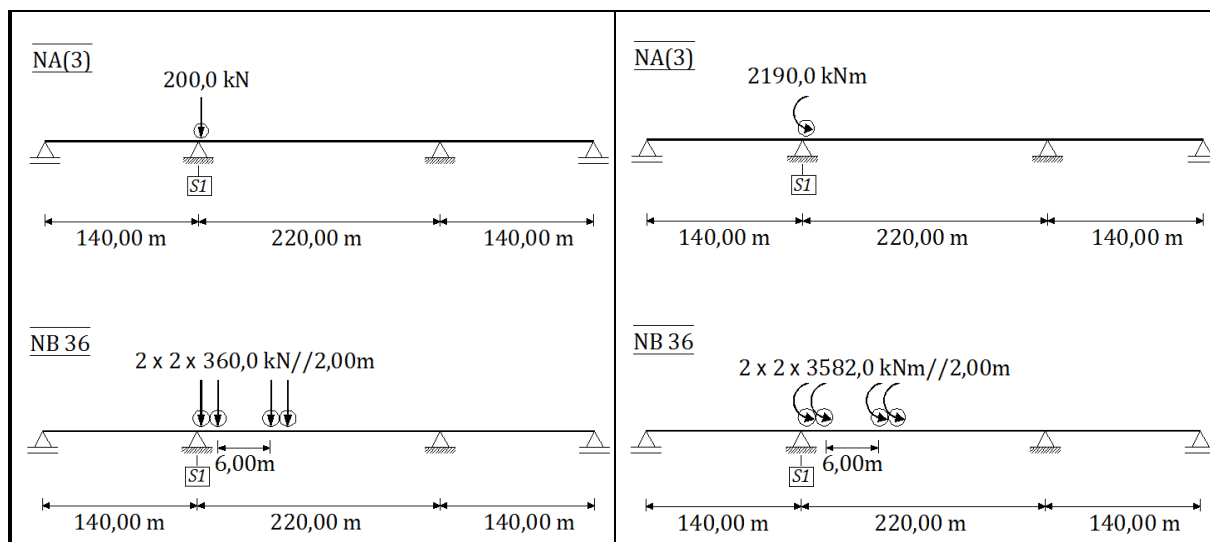


M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p>Nota: o regulamento considera apenas 90% dos efeitos produzidos por este carregamento</p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Truck</u></p> <p style="text-align: center;">*Espaçamento entre eixos: 4,27 m</p> <p style="text-align: center;"><u>Lane Load + Tandem</u></p>

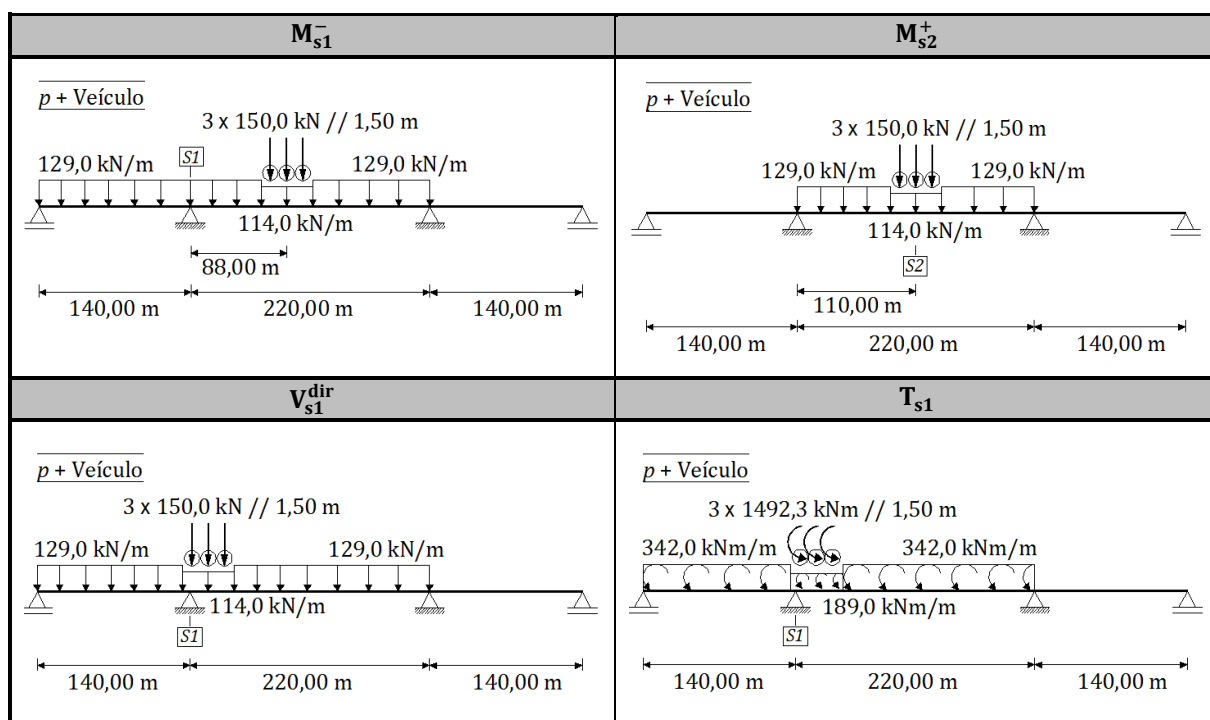
SATCC



M_{s1}^-	M_{s2}^+
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>801,8 kN 74,8 kN/m 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>801,8 kN 82,4 kN/m 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>NA(3)</u></p> <p>200,0 kN 88,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(3)</u></p> <p>200,0 kN 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
<p><u>NB 36</u></p> <p>2 x 2 x 360,0 kN//2,00m 21,00m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NB 36</u></p> <p>2 x 2 x 360,0 kN//2,00m 6,00m 110,00 m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>
V_{s1}^{dir}	T_{s1}
<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>801,8 kN 74,8 kN/m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>	<p><u>NA(1) + NA(2)</u></p> <p>2894,8 kNm 240,1 kNm/m 140,00 m 220,00 m 140,00 m</p>



ABNT



Anexo A2

Esquemas dos carregamentos da análise transversal

Foram utilizadas digitalizações (efetuadas para o efeito) das superfícies de influência de Homberg. Em todos os casos foi considerada uma relação de espessuras de 1/1,5 (vão/apoio).

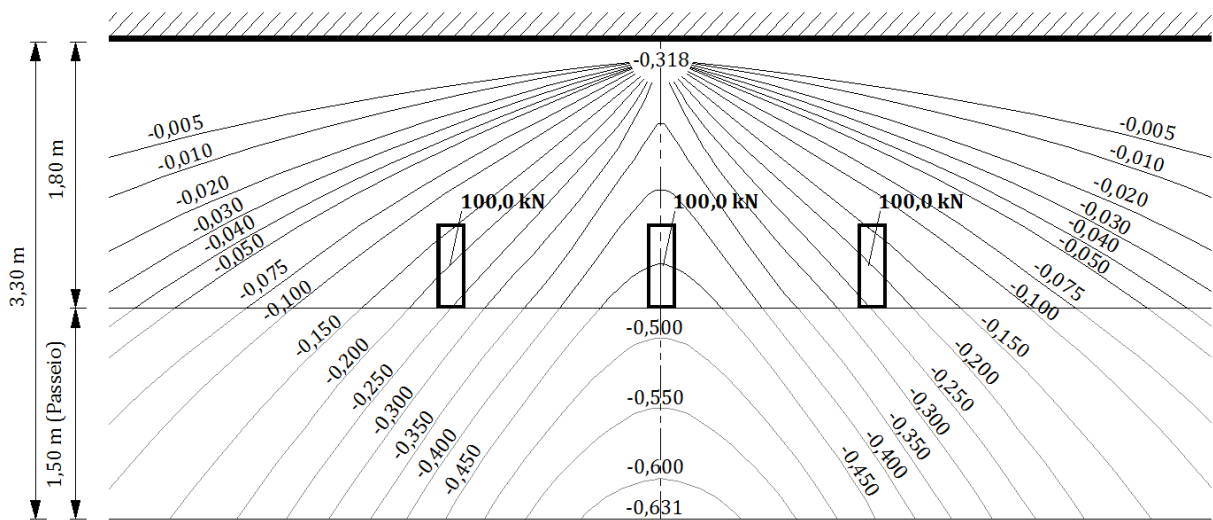
São apresentados apenas os esquemas dos carregamentos condicionantes de cada regulamento nas três secções analisadas, em cada caso de estudo. As dimensões das rodas são proporcionais com as dimensões do tabuleiro.

As secções S1, S2 e S3 são no encastramento da consola, na ligação da laje intermédia às almas e de meio vão da laje, respetivamente.

A2.1 - Caso de Estudo 3

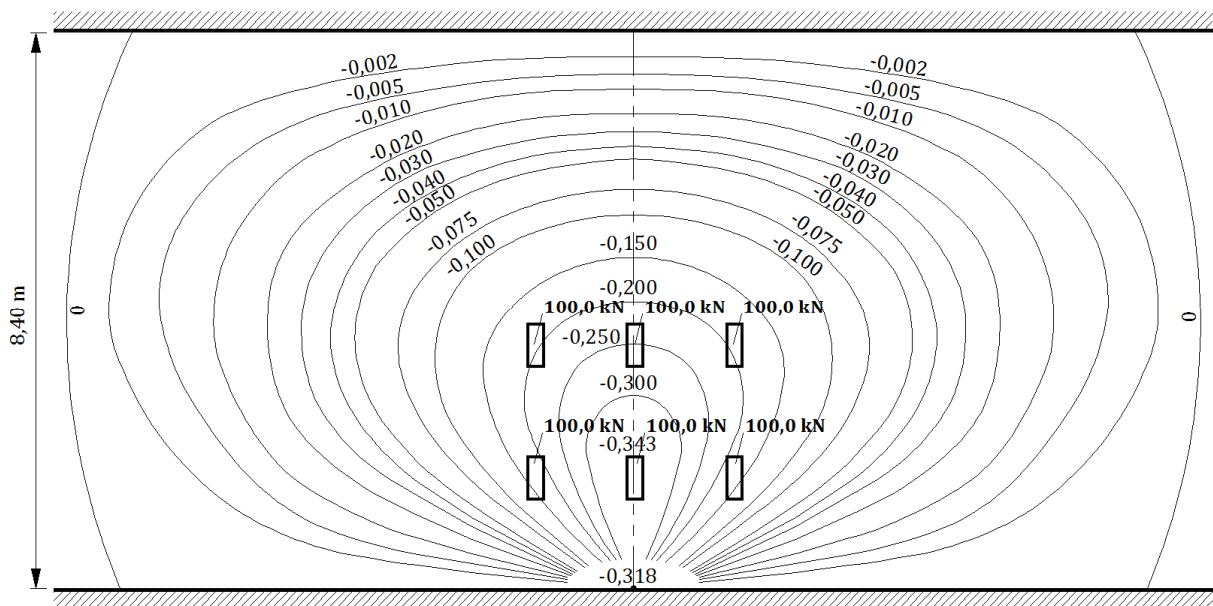
RSA (secção S1)

- VT



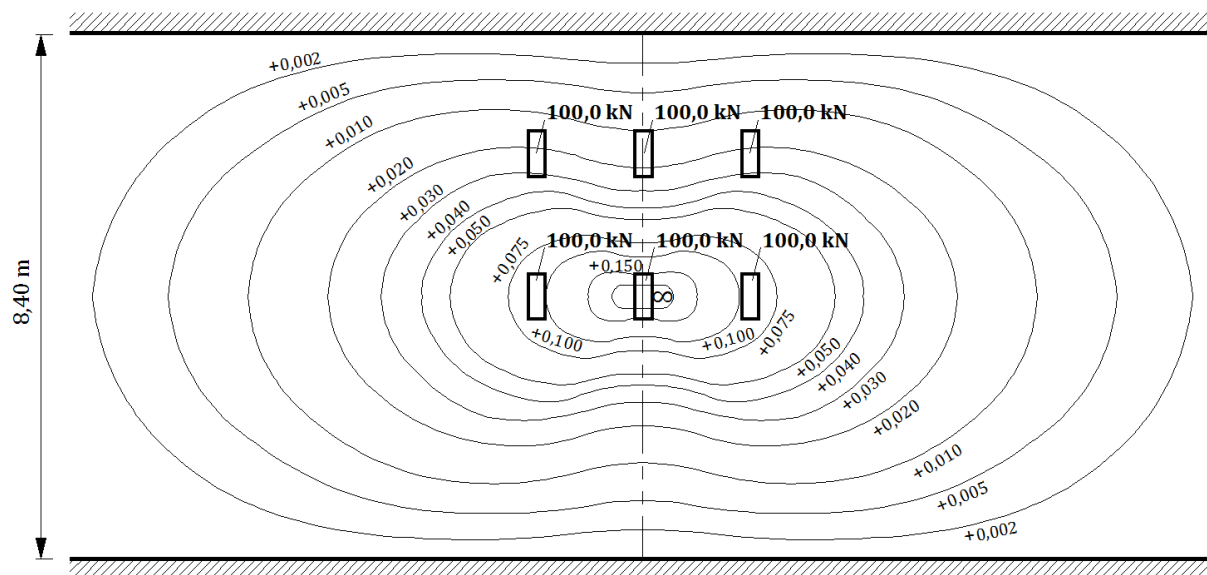
RSA (secção S2)

- VT



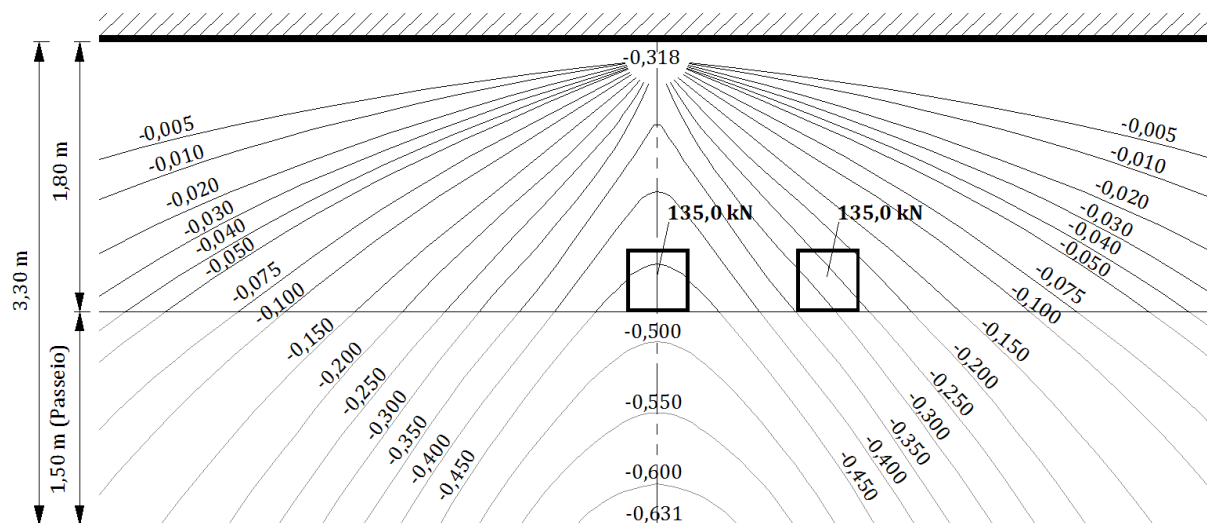
RSA (secção S3)

- VT

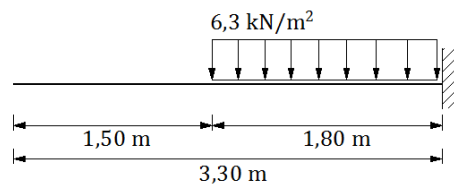


EC1 (secção S1)

- TS

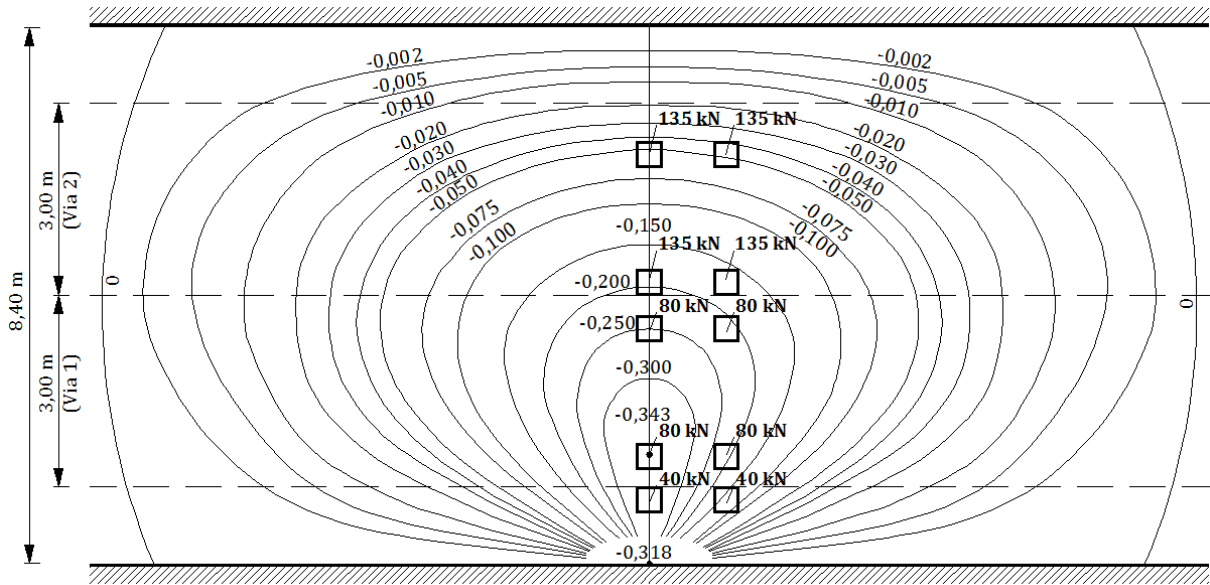


- UDL

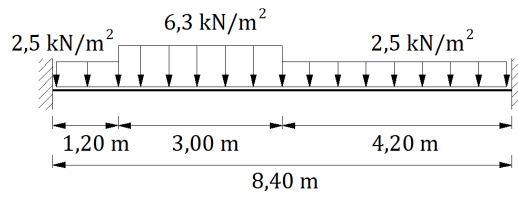


EC1 (secção S2)

- TS

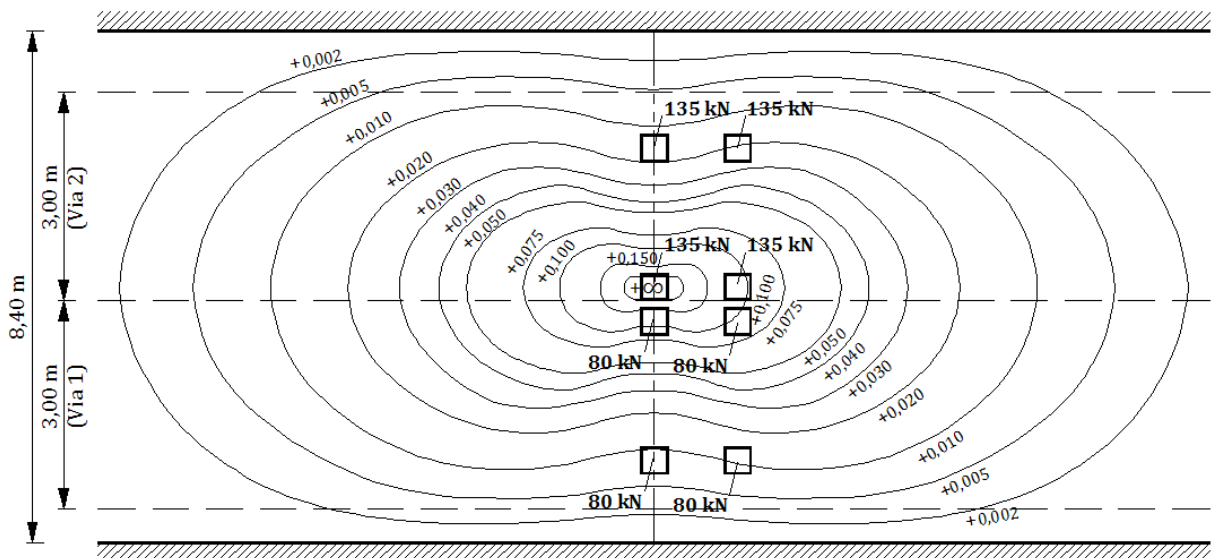


- UDL

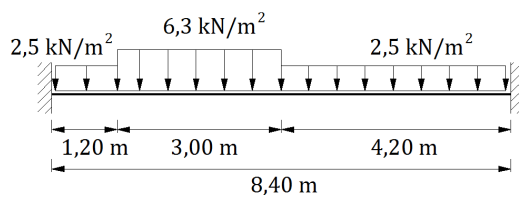


EC1 (secção S3)

- TS

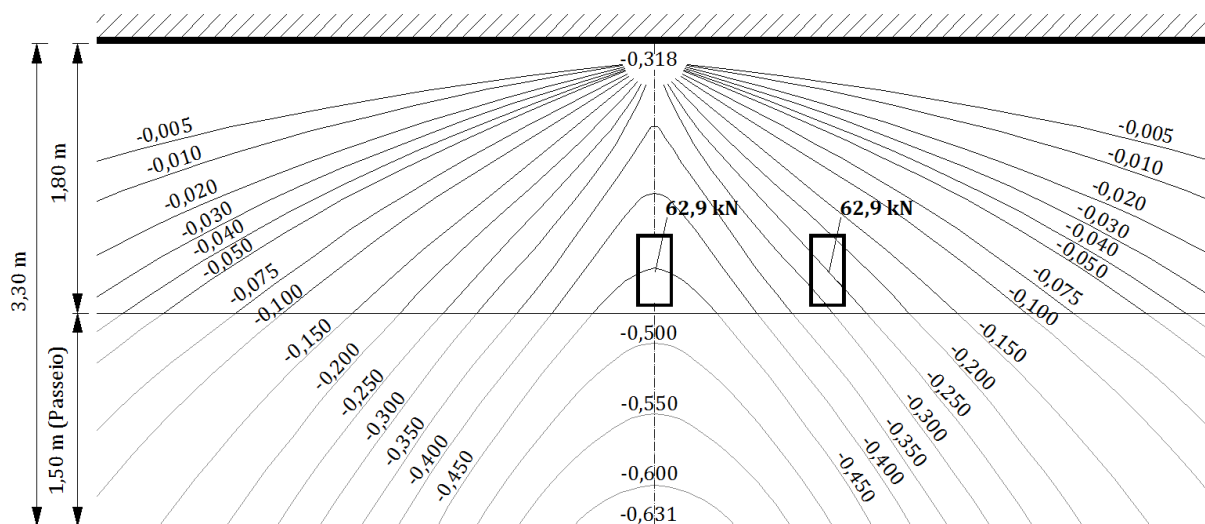


- UDL

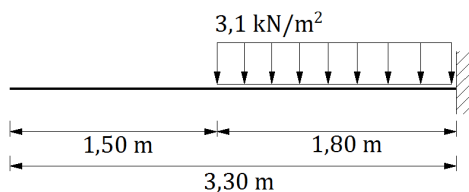


AASHTO (secção S1)

- Tandem

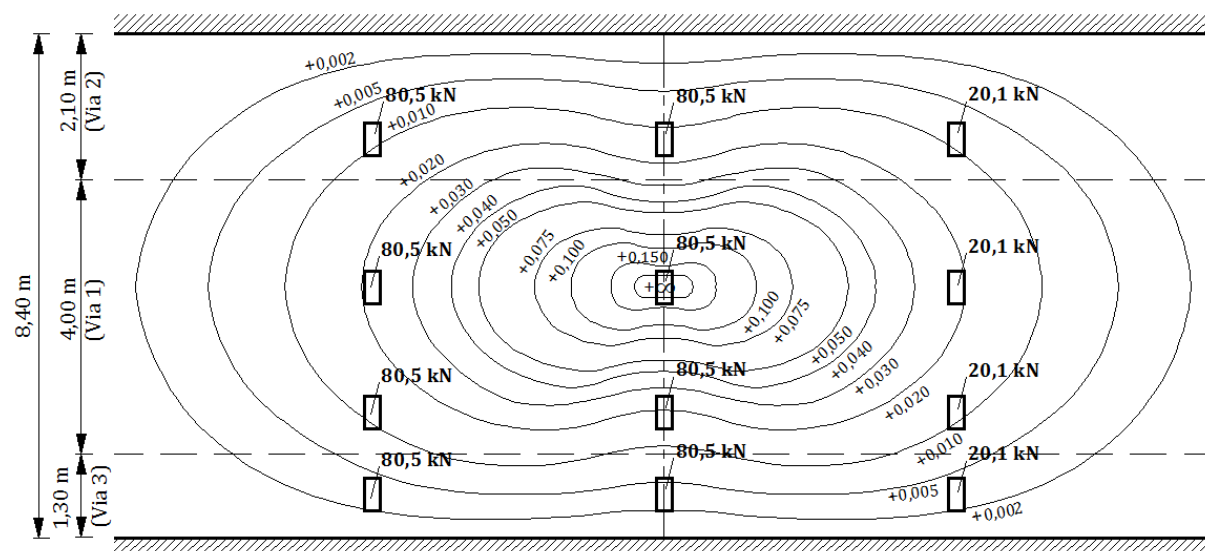


- Lane Load

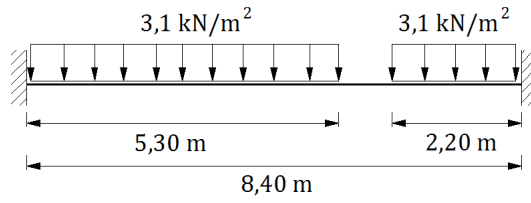


AASHTO (secção S2)

- Truck

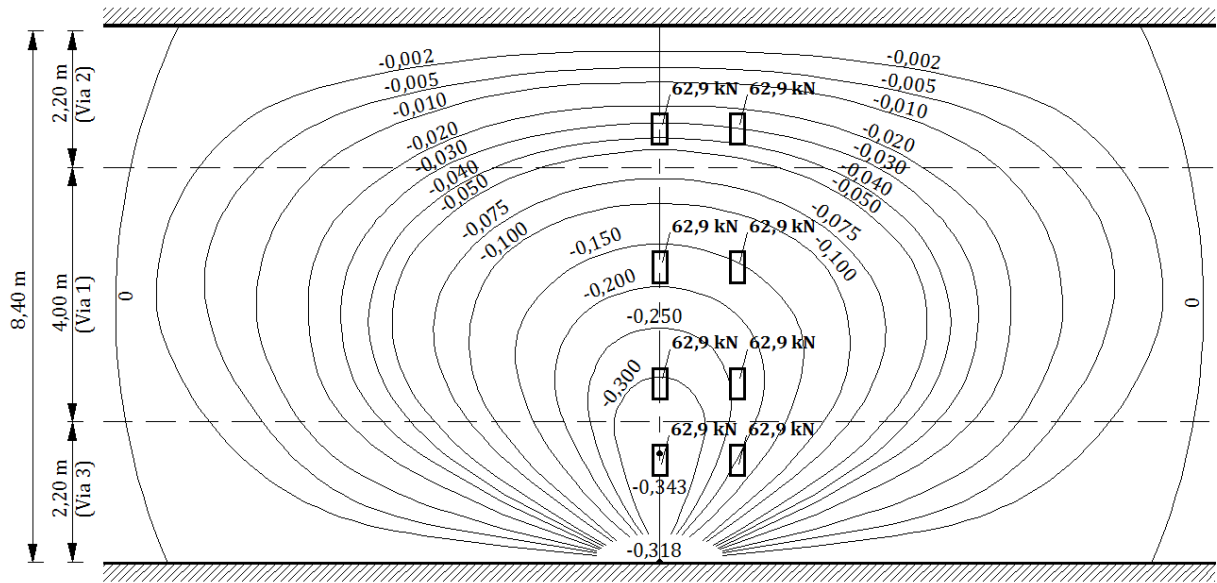


- Lane Load

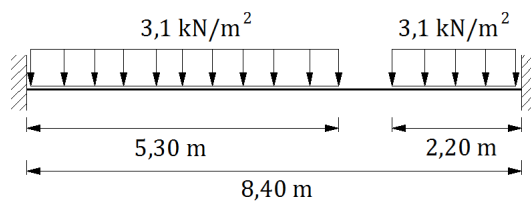


AASHTO (secção S3)

- Tandem

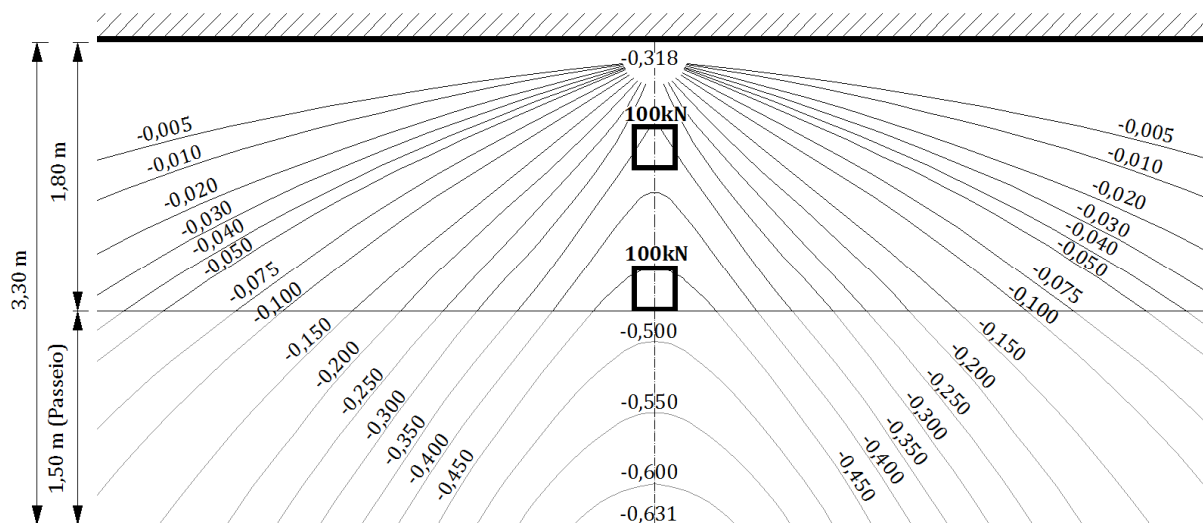


- Lane Load



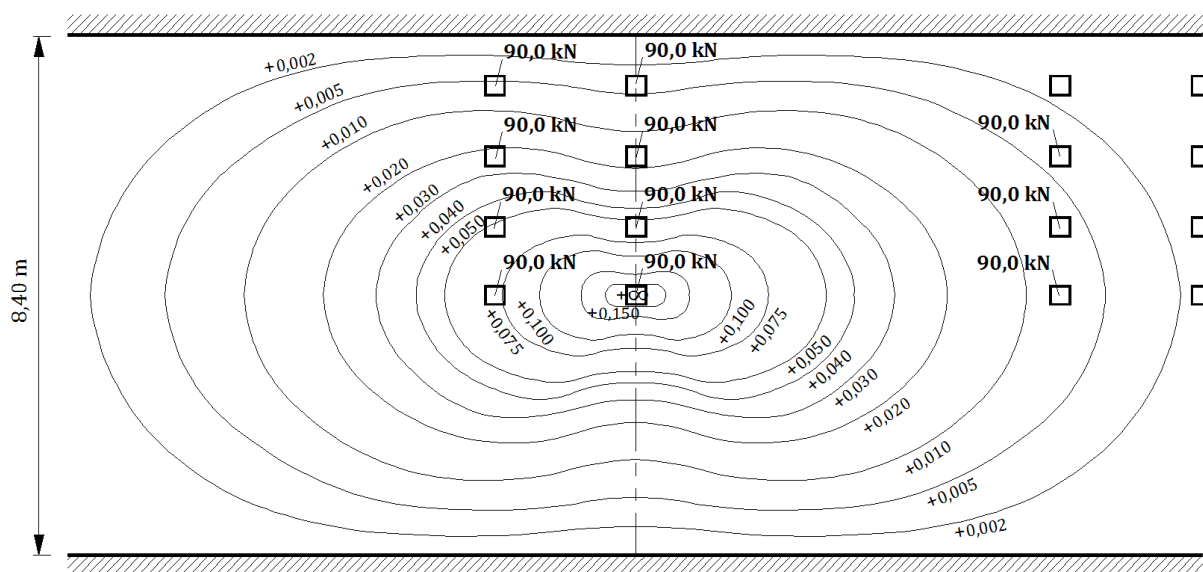
SATCC (secção S1)

- NA (3)



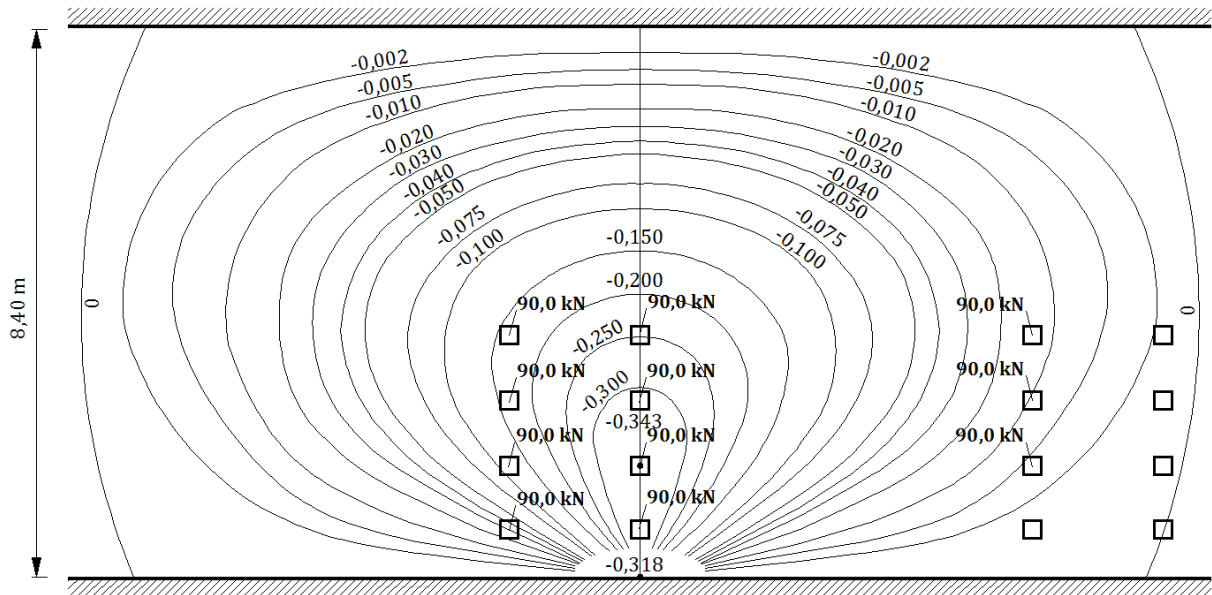
SATCC (secção S2)

- NB 36



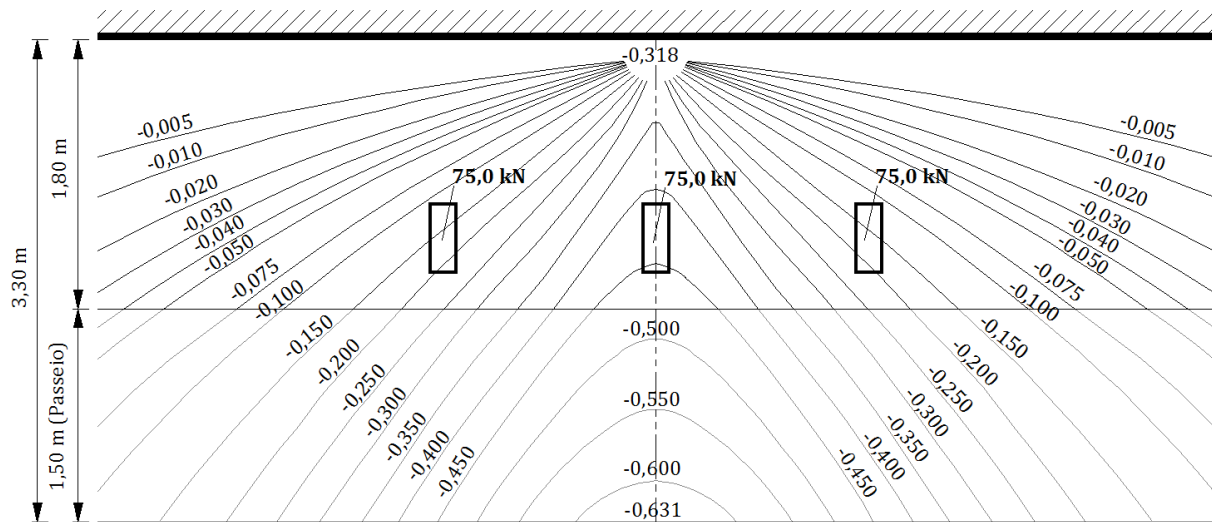
SATCC (secção S3)

- NB 36

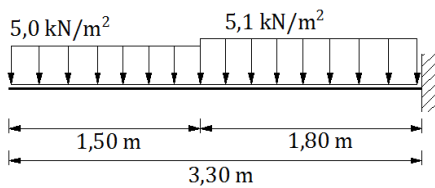


ABNT (secção S1)

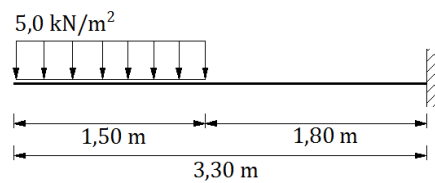
- Veículo



- Carga uniforme p



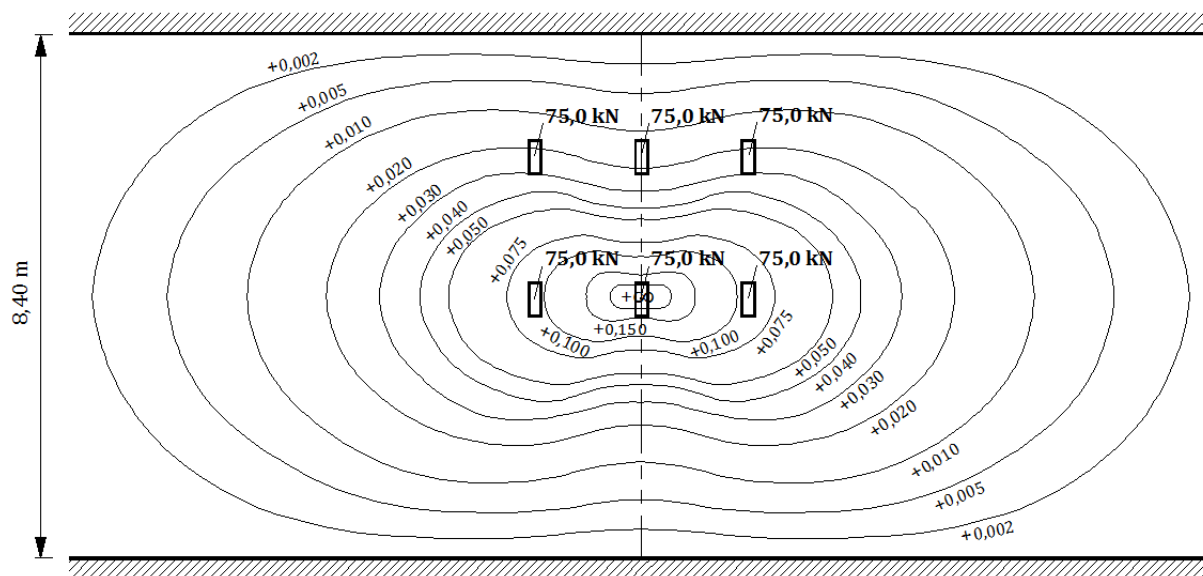
Secção sem veículo



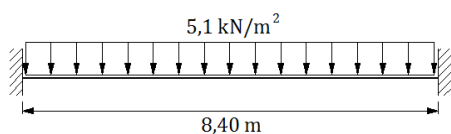
Secção com veículo

ABNT (secção S2)

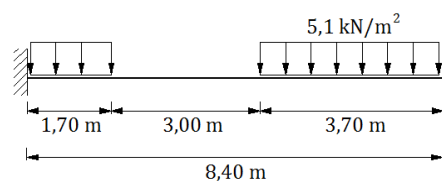
- Veículo



- Carga uniforme p



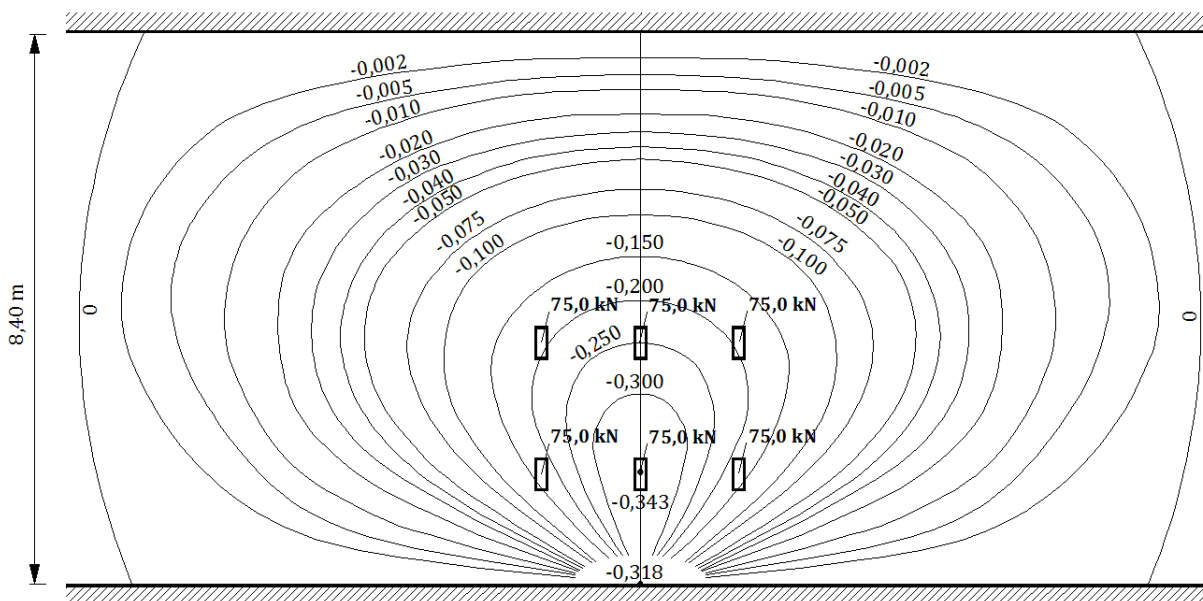
Secção sem veículo



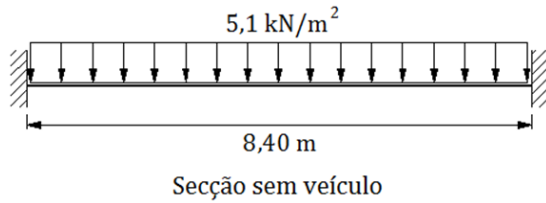
Secção com veículo

ABNT (secção S3)

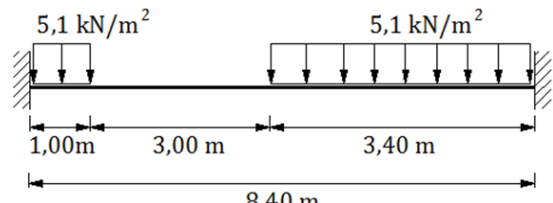
- Veículo



- Carga uniforme p



Seção sem veículo



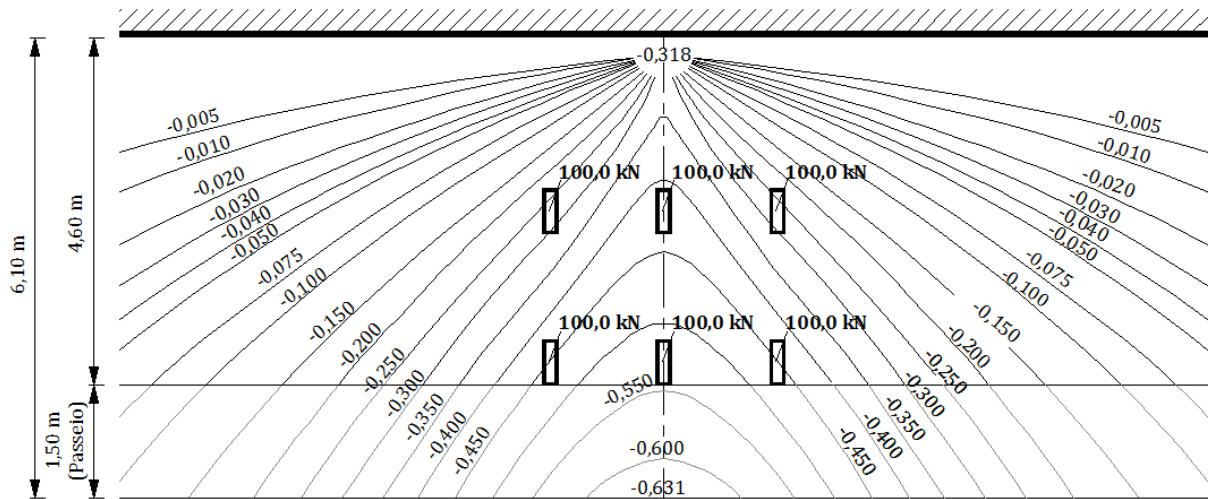
Seção com veículo

A2.2 - Caso de Estudo 6

Para a análise do momento positivo na seção S3, o separador central de todas as superfícies de influência não está centrado na laje, de maneira a que os modelos de sobrecargas intersem a ordenada de maior influência.

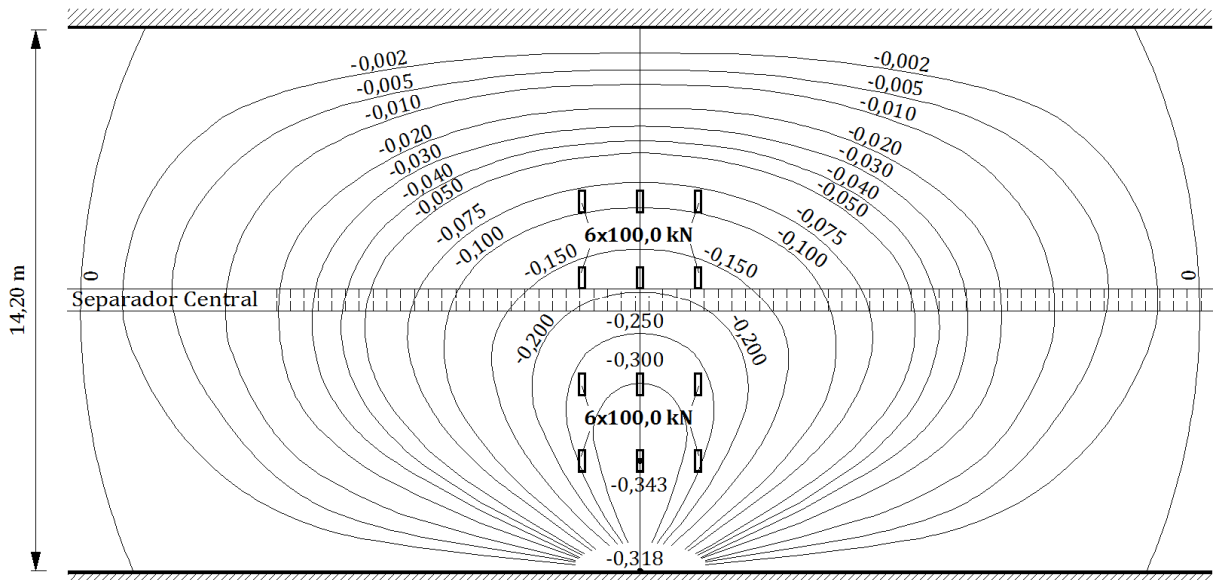
RSA (seção S1)

- VT



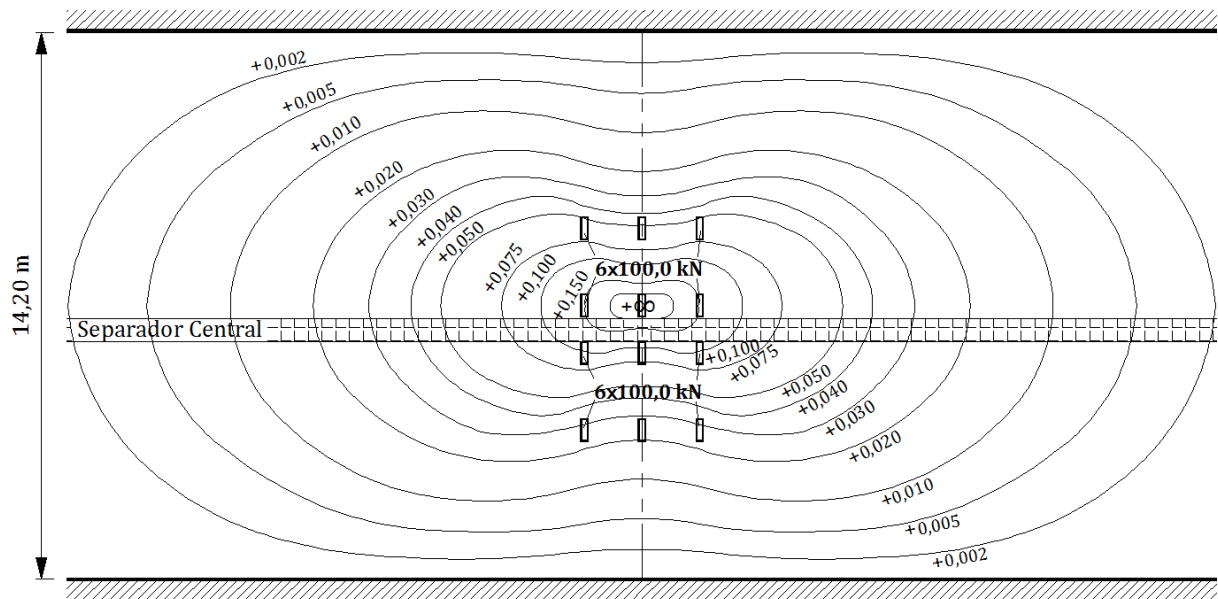
RSA (seção S2)

- VT



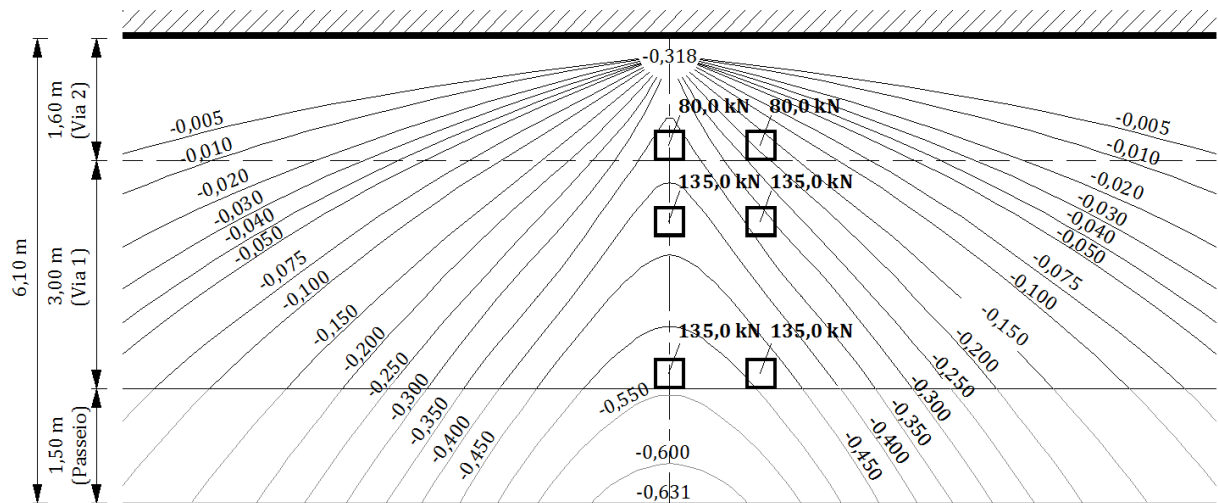
RSA (secção S3)

- VT

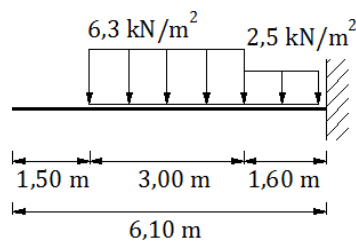


EC1 (secção S1)

- LM1

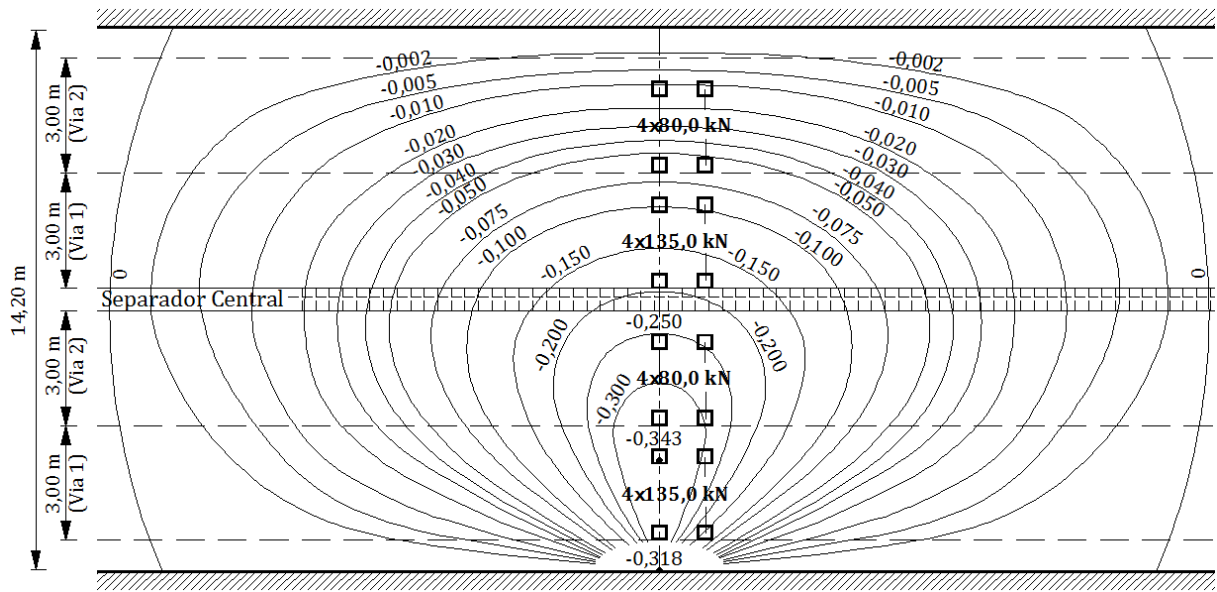


- UDL

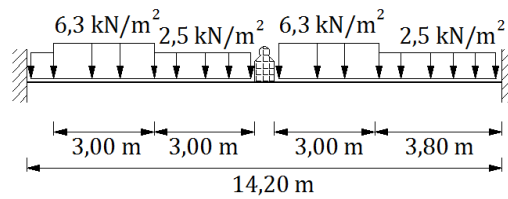


EC1 (secção S2)

- LM1

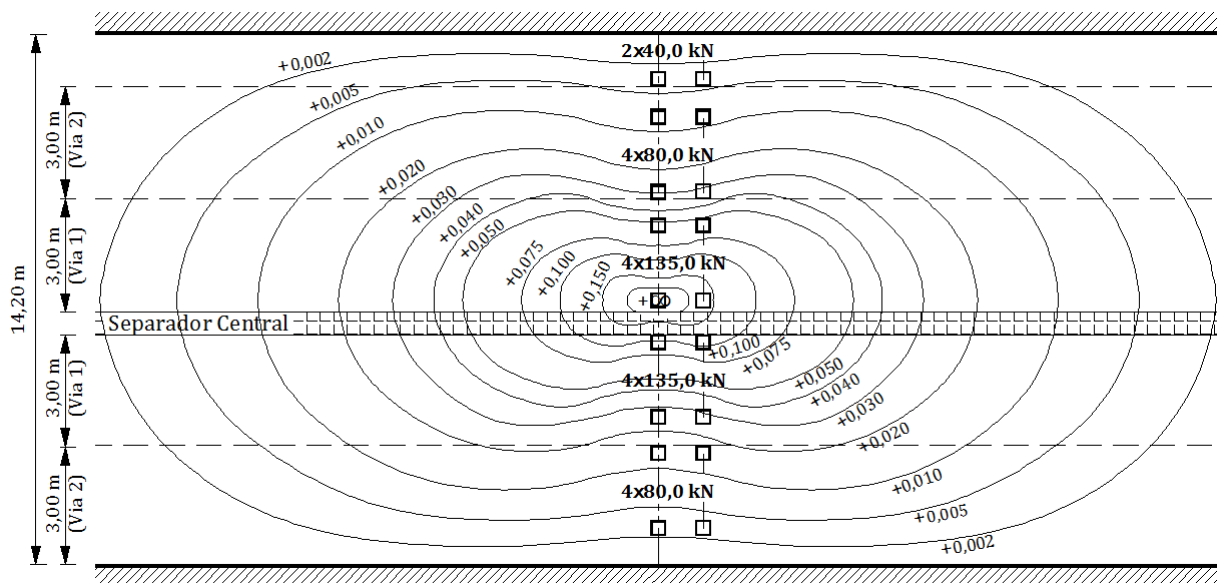


- UDL

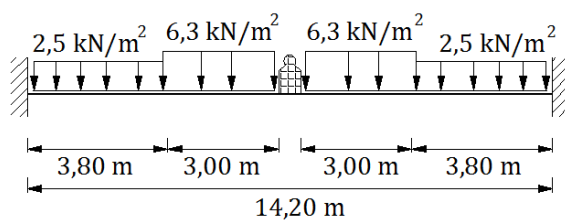


EC1 (secção S3)

- LM1

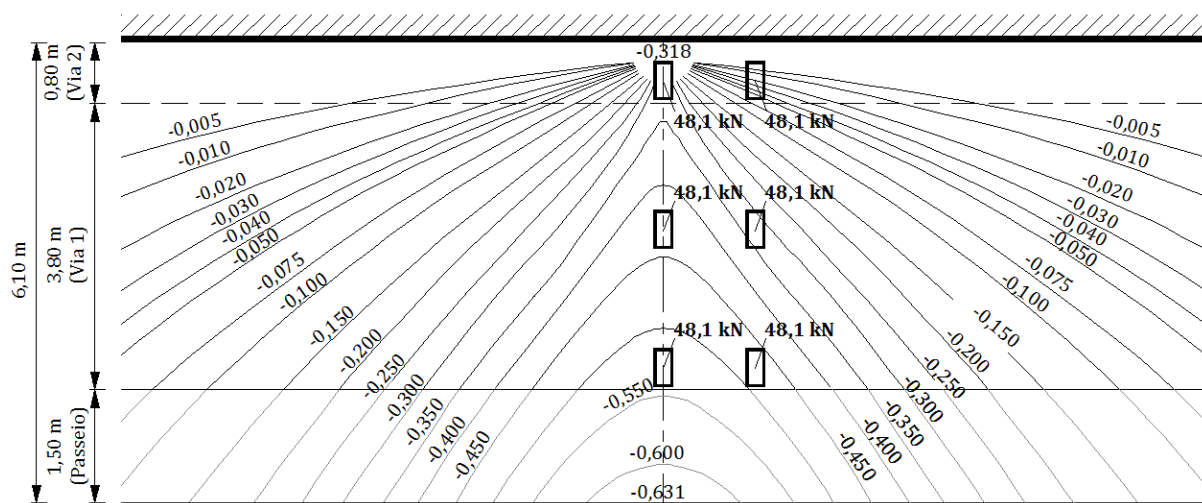


- UDL

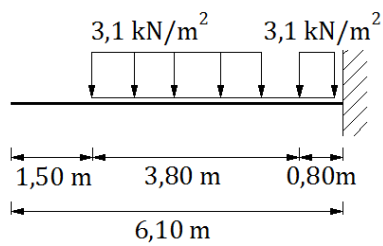


AASHTO (secção S1)

- Tandem

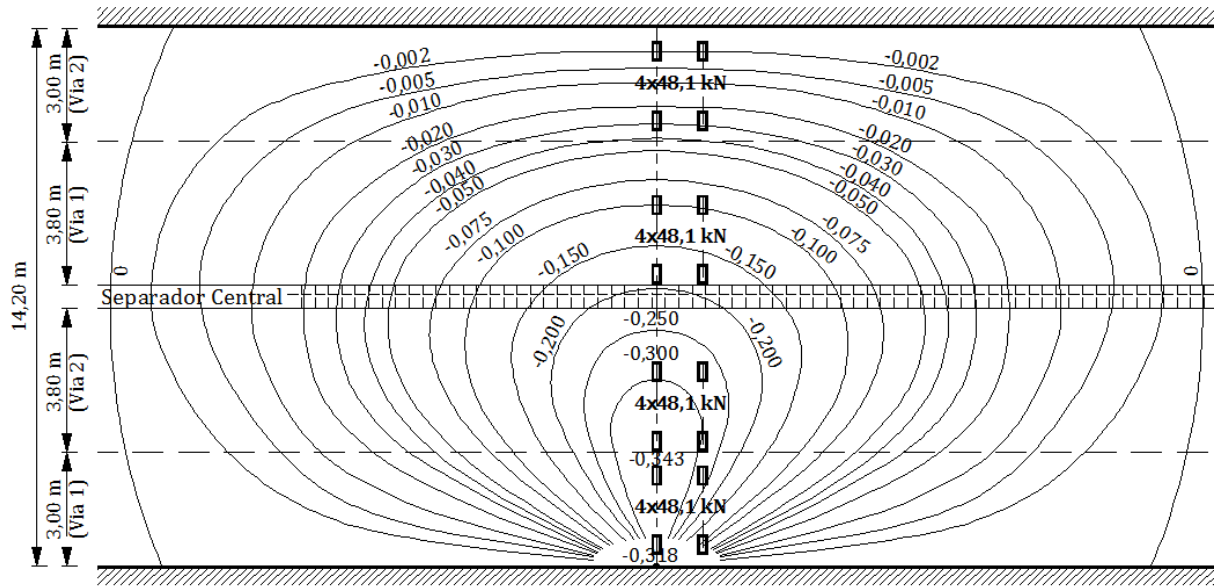


- Lane Load

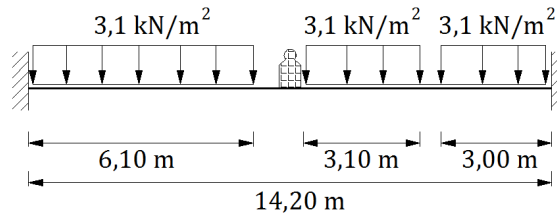


AASHTO (secção S2)

- Tandem

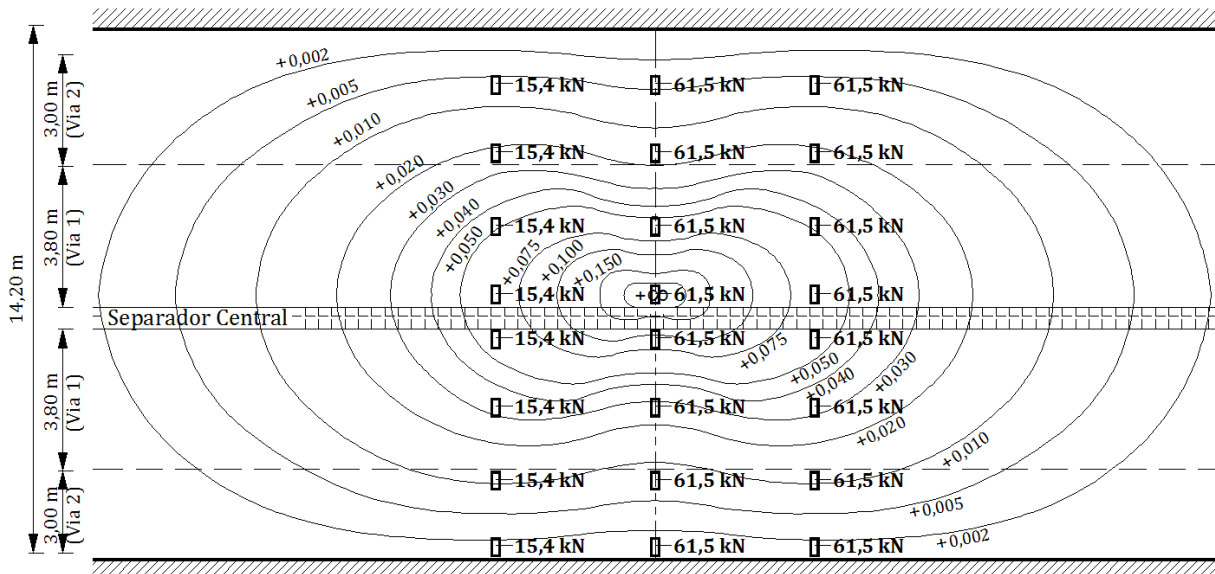


- Lane Load

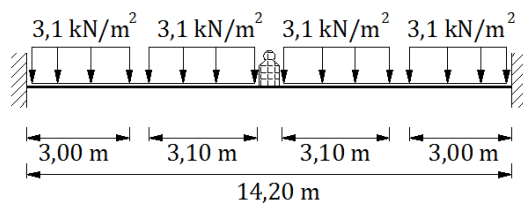


AASHTO (secção S3)

- Truck

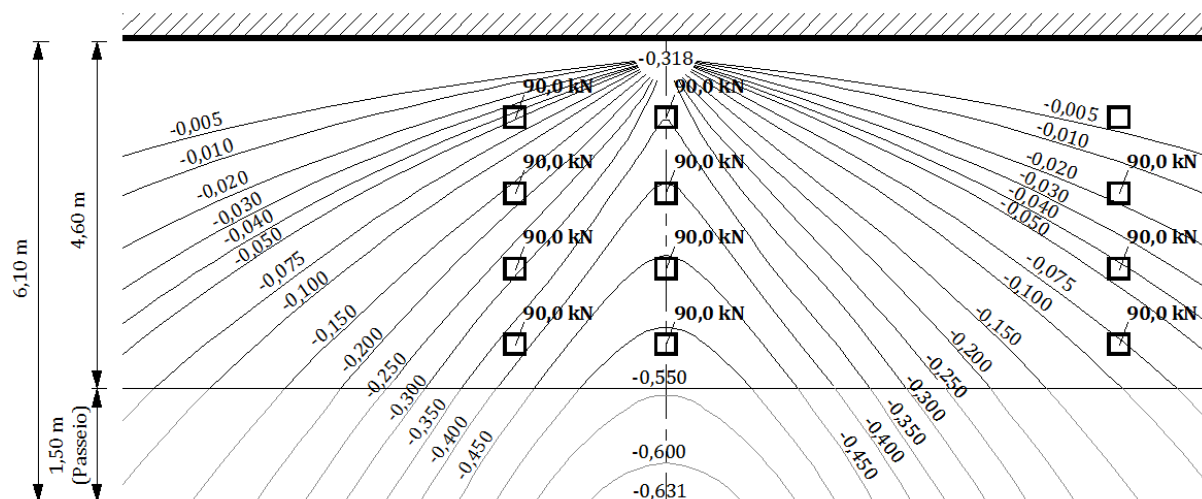


- Lane Load



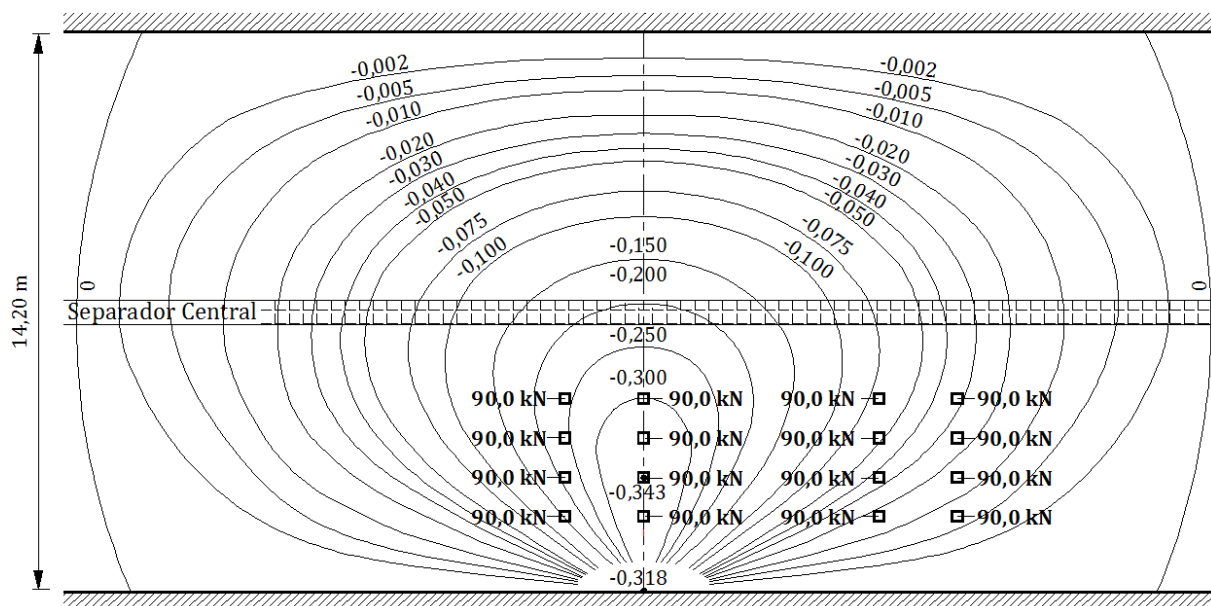
SATCC (secção S1)

- NB 36



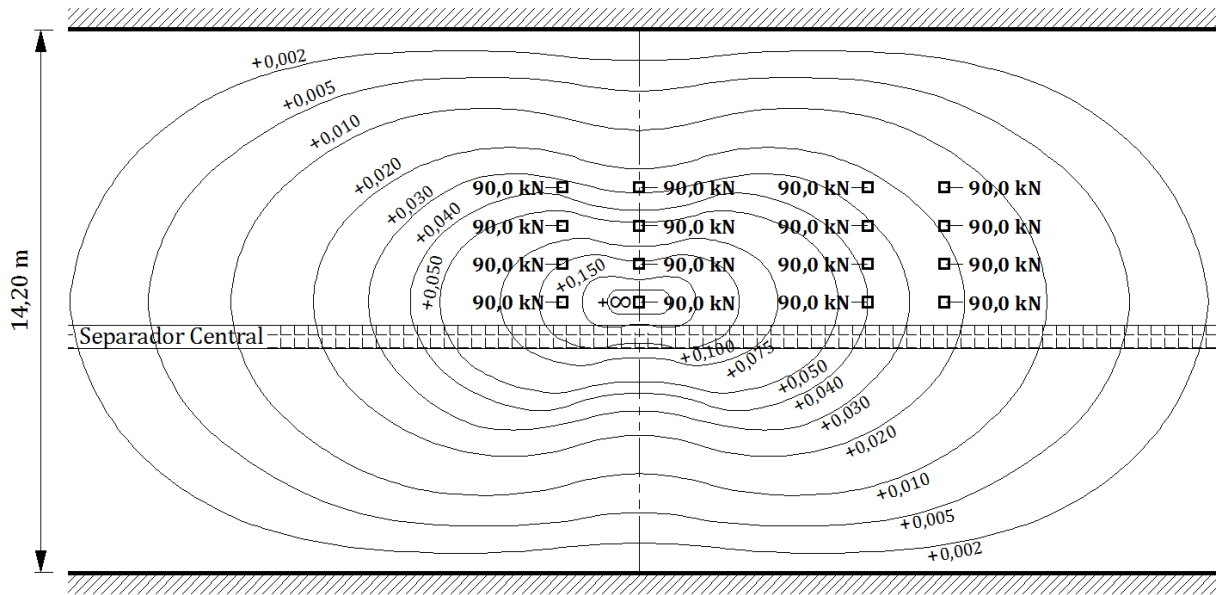
SATCC (secção S2)

- NB 36



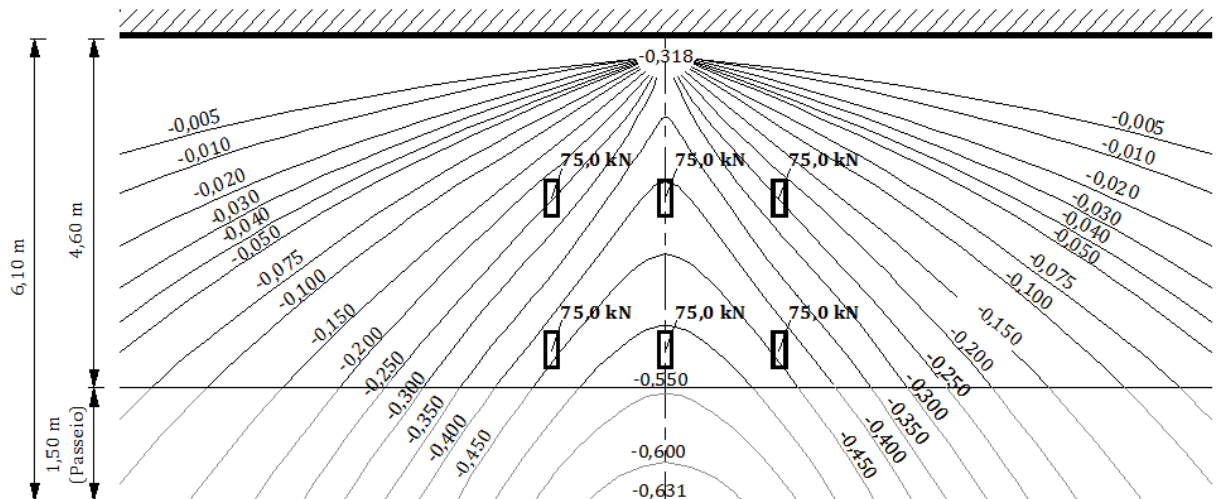
SATCC (secção S3)

- NB 36

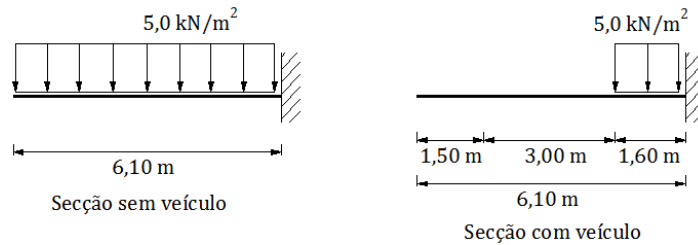


ABNT (secção S1)

- Veículo

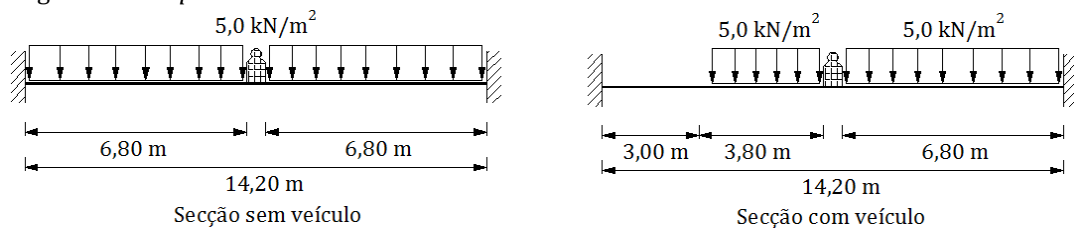


- Carga uniforme p

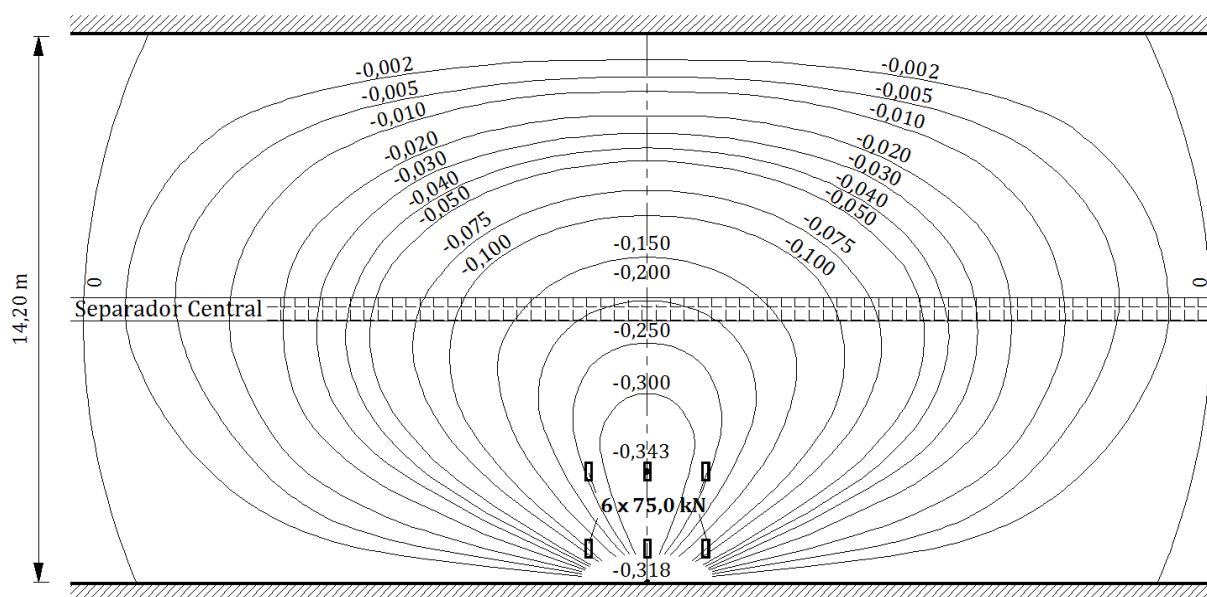


ABNT (secção S2)

- Carga uniforme p

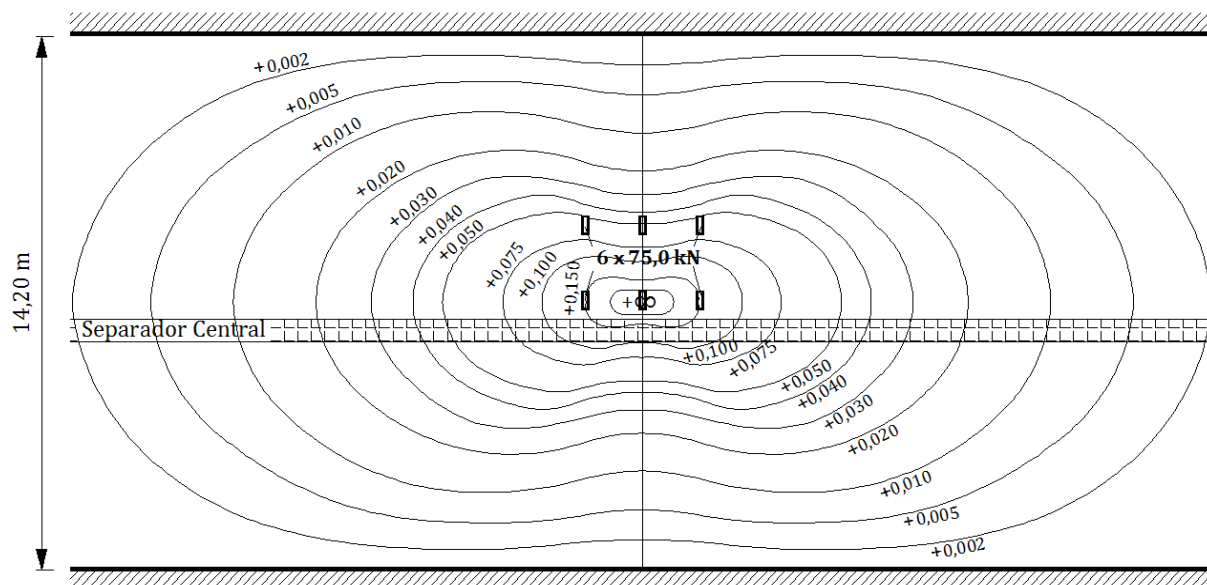


- Veículo

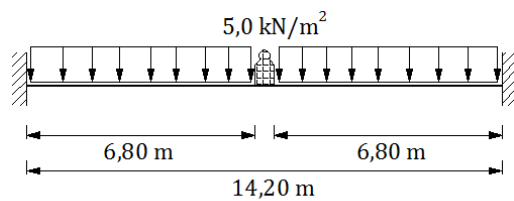


ABNT (secção S3)

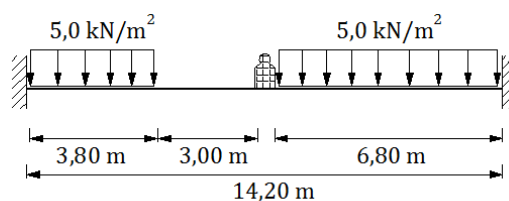
- Veículo



- Carga uniforme p



Secção sem veículo



Secção com veículo