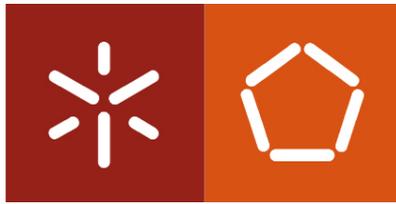


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Pedro Martins Moreira

**Desenvolvimento de uma Ferramenta  
para Avaliação da Capacidade de  
Carga de Pontes Mistas Aço-Betão**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Pedro Martins Moreira

**Desenvolvimento de uma Ferramenta  
para Avaliação da Capacidade de  
Carga de Pontes Mistas Aço-Betão**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Campos e Matos  
e da Professora Doutora Maria Isabel Brito  
Valente

11 de dezembro de 2018



## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento muito especial ao meu orientador Professor Doutor José Campos e Matos, e co-orientadora Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente, não apenas por me terem dado a oportunidade de dedicar a esta área de pesquisa, como também pela disponibilidade demonstrada para assumirem a orientação e co-orientação desta dissertação, pela dedicação, boa vontade e nível de exigência durante o desenvolvimento deste trabalho. O conhecimento e empenho demonstrado por ambos durante todo o percurso, assim como nas sessões de esclarecimento sobre as diversas dúvidas que me foram surgindo ao longo de todo o trabalho, serviram como constante fonte de inspiração.

A toda a minha família, pela oportunidade, apoio incondicional e força transmitidos.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram e que, de alguma forma, levantaram a minha autoestima para poder continuar em frente.



## RESUMO

A implementação de soluções em estrutura mista aço-betão para tabuleiros de pontes ocupa um lugar de destaque no mercado das obras-de-arte, devido às suas inegáveis qualidades estéticas e à conceção inovadora. A leveza e transparência inerentes a estes tipos de soluções permitem um melhor enquadramento na envolvente e uma redução do impacto visual, ao mesmo tempo que a tornam competitiva face às soluções tradicionais em betão pré-esforçado.

Esta dissertação começa por apresenta os conceitos básicos relacionados com o dimensionamento de pontes mistas em aço e betão e depois aprofundar questões relacionadas com os diferentes tipos de secções transversais mistas de modo a compreender a metodologia de cálculo associada à determinação da respetiva capacidade resistente. Neste sentido, pretende-se averiguar quais os métodos de análise da secção transversal de vigas mistas, diretamente relacionados com a classe da secção. A quantificação de ações específicas em pontes rodoviárias é avaliada, à luz das normas NP EN 1991-2-2003 e RSA – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes.

De seguida, são descritos os aspetos fundamentais associados ao desenvolvimento da ferramenta, bem como as metodologias e simplificações adotadas na análise plástica e na análise elástica de secções transversais de vigas mistas.

Também são descritas as metodologias e simplificações adotadas para análise longitudinal do tabuleiro de pontes mistas, com base na determinação da carga de rotura através da aplicação do teorema cinemático.

Assim, esta dissertação tem como principal objetivo elaborar uma ferramenta, que é desenvolvida em linguagem *Matlab*, e cujo principal objetivo é avaliar a capacidade de carga de tabuleiros de pontes mistas em aço e betão.

Na última parte da dissertação, desenvolve-se uma análise comparativa entre os sistemas estruturais tradicionais em pontes mistas: um baseado no sistema bi-viga, com utilização de perfis reconstituídos soldados, e outro baseado num sistema multi-viga, com recurso a perfis laminares e por fim um sistema caixão, com o intuito de encontrar da solução mais resistente e económica.

A ferramenta desenvolvida é aplicada a um caso de estudo. Trata-se do viaduto sobre o rio Sousa, uma estrutura com tabuleiro misto em aço e betão, constituída por quatro vãos de 44 m e um vão extremo de 26 m, localizada na A43, que realiza a ligação entre Gondomar e Aguiar de Sousa (IC24).

**PALAVRAS-CHAVE:** análise transversal, análise longitudinal, secções mistas em aço e betão, ferramenta, pontes



## ABSTRACT

The implementation of steel and concrete composite solutions for bridge decks occupies a prominent place in the construction market, due to its undeniable aesthetic qualities and innovative design. The lightness and transparency inherent to these solutions allows a better framing in the landscape and a reduction of the visual impact, making it competitive against traditional prestressed concrete solutions.

This dissertation starts by exploring the basic concepts of steel and concrete composite bridge decks design and then focuses on the analysis of different types of cross-sections and the methodology associated with calculating their strength capacity. Considering this, the intention is to investigate the methods for analyzing the cross section of composite beams, that are directly related to the cross section class. The existing standards for specific actions on road bridges are also considered and used to calculate the adequate loading scenarios.

The fundamental aspects related to the development of the software tool, as well as the methodologies and simplifications adopted for the linear and elastic analysis of cross sections of composite beams are presented.

The methodologies and simplifications adopted for longitudinal analysis of composite bridge decks, are also described, based on the determination of the failure load obtained through the application of the kinematic theorem.

Thus, this dissertation has the main objective of elaborating a tool, developed in *Matlab* language, whose main objective is to evaluate the load capacity of steel and concrete composite bridge decks.

In the last part of the dissertation a comparative analysis between the traditional structural systems in mixed bridges is available: one is based on a double I-beam system that uses welded profiles, and another is based on a multi-beam system, with resorting to laminar profiles and finally a coffin system. This analysis aims to identify the most resistant and economical solution.

The tool developed is applied to a case study. The case study chosen is the viaduct over the Sousa River, a composite deck viaduct that consists of four spans of 44 m and an end span of 26 m. It is located on the A43, which connects Gondomar and Aguiar de Sousa (IC24).

**KEYWORDS:** transversal analysis, longitudinal analysis, composite cross sections, tool, bridges



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.2	Metodologia .....	2
1.3	Organização da dissertação .....	3
2	ESTADO DA ARTE.....	4
2.1	Tipologia de Pontes Mistas.....	4
2.1.1	Vigas de alma cheia .....	5
2.1.2	Vigas em caixão .....	7
2.1.3	Treliça mista.....	8
2.1.4	Arcos .....	9
2.1.5	Atirantado .....	10
2.1.6	Suspensão .....	11
2.2	Análise de secções transversais de vigas mistas .....	11
2.2.1	Largura efetiva do banzo de betão .....	12
2.2.2	Classificação da secção transversal .....	13
2.2.3	Análise Plástica - secções de Classe 1 e 2 .....	17
2.2.4	Análise Elástica.....	18
2.3	Ações específicas de pontes rodoviárias e ferroviárias.....	19
2.3.1	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes 19	
2.3.2	EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes	21
2.4	Exemplos de pontes e viadutos mistos em Portugal .....	25
2.4.1	Ponte sobre o Rio Sousa .....	25
2.4.2	Viaduto sobre o IC19, Lisboa .....	26
2.4.3	Ponte Edgar Cardoso (Figueira da Foz).....	27
2.4.4	Passagem superior à A3-Porto/Valença.....	29
2.4.5	Viaduto misto Maia Norte .....	30
2.5	Conclusões .....	31
3	ANÁLISE DE SECÇÃO TRANSVERSAL.....	33
3.1	Introdução .....	33
3.2	Apresentação da ferramenta.....	33
3.3	Estrutura da ferramenta.....	34
3.4	Métodos de programação.....	34

3.4.1	Ficheiro de entrada de dados da secção transversal.....	35
3.4.2	Ficheiro de entrada de dados do caso de estudo .....	45
3.5	Largura efetiva do banzo .....	46
3.6	Determinação da posição do eixo neutro .....	48
3.6.1	Eixo neutro plástico .....	48
3.6.2	Eixo neutro elástico.....	50
3.7	Classificação da secção transversal .....	52
3.8	Determinação da secção efetiva para uma secção de classe 4 .....	53
3.9	Cálculo do momento fletor resistente .....	56
3.9.1	Momento fletor resistente plástico.....	56
3.9.2	Momento fletor resistente elástico .....	57
3.10	Funcionamento da ferramenta.....	59
3.11	Validação da ferramenta desenvolvida .....	61
3.11.1	Exemplo 1 .....	61
3.11.2	Exemplo 2 .....	62
3.11.3	Exemplo 3 .....	65
3.12	Conclusões .....	67
4	ANÁLISE LONGITUDINAL .....	68
4.1	Introdução .....	68
4.2	Apresentação da ferramenta.....	68
4.3	Ficheiro de entrada de dados para análise longitudinal .....	68
4.4	Determinação da carga de rotura .....	76
4.4.1	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) 77	
4.4.2	EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes 78	
4.5	Linhas de influência.....	81
4.6	Validação da ferramenta desenvolvida .....	82
4.7	Conclusões .....	84
5	ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES.....	85
5.1	Introdução .....	85
5.2	Características geométricas e estruturais da ponte de referência.....	85
5.3	Características da secção transversal do tabuleiro da ponte de referência.....	86
5.4	Definição dos modelos de sobrecarga, em função do regulamento considerado 87	
5.5	Dados a comparar .....	87

5.6	Tabuleiros considerados na análise comparativa .....	88
5.6.1	Tabuleiros em secção bi-viga.....	88
5.6.2	Tabuleiros em secção multi-viga .....	93
5.6.3	Tabuleiros em secção caixaõ .....	96
5.7	Estimativa de custos.....	99
6	CONCLUSÕES .....	102
6.1	Conclusões do trabalho efetuado .....	102
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	108
7	ANEXOS .....	114
7.1	ANEXO A – Funções do programa .....	114
7.2	ANEXO B – Análise transversal .....	122
7.3	ANEXO C – Análise longitudinal .....	170
7.4	ANEXO D – Esquematização de diferentes soluções .....	177

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipologias de pontes conforme o seu sistema estrutural: a) ponte em viga; b) ponte em arco; c) ponte atirantada; d) ponte suspensa. ....	4
Figura 2.2: Solução de bi-viga. ....	6
Figura 2.3: Solução de multi-viga. ....	6
Figura 2.4: Secção transversal de soluções do tipo multi-viga. ....	7
Figura 2.5: Sistema estrutural de uma ponte de um vão em treliça. ....	9
Figura 2.6: Soluções de pontes em arco: a) elevado com tabuleiro superior; b) abatido. ....	10
Figura 2.7: Soluções de pontes em arco: a) biarticulado abatido; b) livre. ....	10
Figura 2.8: Soluções de pontes em arco: a) para grandes vãos com tabuleiro intermediário; b) com tabuleiro inferior funcionando como tirante. ....	10
Figura 2.9: Disposição dos tirantes, pontes com duas torres: a) leque; b) semi- leque; c) harpa. ....	11
Figura 2.10: Ponte suspensa. ....	11
Figura 2.11: Exemplos de secções transversais de vigas mistas. ....	12
Figura 2.12: Vãos equivalentes para a largura efetiva do banzo de betão (adaptada da figura 5.5, EN 1994-1-1, 5.4.1.2). ....	13
Figura 2.13: Classificação das secções transversais. ....	14
Figura 2.14: Alma efetiva da Classe 2 (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	16
Figura 2.15: Esquema representativo do método de cálculo do valor do momento fletor resistente plástico, $M_{pl,Rd}$ (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	18
Figura 2.16: Comparação entre secção real e secção homogeneizada: a) secção real de aço-betão; b) secção homogeneizada em aço (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	19
Figura 2.17: Esquema representativo com a disposição e dimensões. ....	20
Figura 2.18: Aplicação do modelo LM1. ....	22
Figura 2.19: Disposição e dimensões do modelo de carga LM2. ....	23
Figura 2.20: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71. ....	24
Figura 2.21: Modelos de carga SW/0 e SW/2. ....	25
Figura 2.22: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da secção da ponte. ....	26
Figura 2.23: Secção transversal do tabuleiro. ....	26
Figura 2.24: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da secção da ponte. ....	27
Figura 2.25: Secção transversal do tabuleiro. ....	27
Figura 2.26: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da ponte. ....	28
Figura 2.27: Corte transversal a meio vão. ....	28
Figura 2.28: a) alçado longitudinal da solução; b) corte transversal do tabuleiro sobre meio vão. ....	30
Figura 2.29: a) vista geral do viaduto; b) Secção transversal da superestrutura do viaduto. ....	31
Figura 3.1: Corte longitudinal da Ponte sobre o Rio Sousa integrada na A43 – Gondomar/Aguiar de Sousa. ....	36
Figura 3.2: Esquema representativo da numeração adotada. ....	36
Figura 3.3: Esquema representativo da numeração adotada. ....	37
Figura 3.4: Esquema representativo. ....	38

Figura 3.5: Esquema representativo da definição das coordenadas.....	38
Figura 3.6: Mensagem de informação do erro relativo às coordenadas. ....	39
Figura 3.7: Esquema representativo da definição das coordenadas.....	39
Figura 3.8: Mensagem de informação do erro. ....	39
Figura 3.9: Acesso ao navegador de diretorias. ....	40
Figura 3.10: Mensagem de informação do erro e informação sobre o número máximo de divisões de camadas na laje de betão. ....	40
Figura 3.11: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de divisões de camadas no banzo superior do perfil metálico.....	41
Figura 3.12: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de divisões de camadas na alma do perfil metálico. ....	42
Figura 3.13: Mensagem de informação do erro e aviso informando o número máximo de divisões de camadas no banzo inferior do perfil metálico. ....	43
Figura 3.14:Esquema representativo da definição das armaduras longitudinais em camadas.....	44
Figura 3.15: Verificação gráfica da geometria da secção transversal.....	45
Figura 3.16: Esquema representativo da largura efetiva do banzo inferior de uma secção em caixão. ....	46
Figura 3.17: Comprimento efetivo $L_e$ de uma viga contínua e distribuições das larguras efetivas (adaptado da figura 3.1, EN 1993-1-5).....	47
Figura 3.18: Notações para o shear lag (adaptada da figura 3.2, EN 1993-1-5).....	47
Figura 3.19: Esquema das diversas opções da posição do eixo neutro plástico. ....	49
Figura 3.20: Esquema representativo do eixo neutro elástico, $L_{Ne}$ , na zona do perfil metálico (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	50
Figura 3.21: Esquema representativo do eixo neutro elástico, $L_{Ne}$ , na zona do banzo de betão (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	51
Figura 3.22: Esquema representativo do eixo neutro elástico, $L_{Ne}$ , (adaptado de Calado e Santos, 2013).....	52
Figura 3.23: Esquema das diversas opções da classificação da secção transversal (adaptado da figura 5.12, EN 1994-2, 5.5). ....	53
Figura 3.24: Esquema representativo do método de cálculo: a) momento fletor resistente plástico positivo; b) momento fletor resistente plástico negativo (adaptado de Calado e Santos, 2013).....	57
Figura 3.25: Definição da geometria da secção transversal da viga mista para a posição do eixo neutro elástico, $L_{Ne}$ : a) na zona do perfil metálico; b) na zona do banzo de betão (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	58
Figura 3.26: Definição da geometria da secção transversal da viga mista sob a ação de momento fletor negativo (adaptado de Calado e Santos, 2013). ....	59
Figura 3.27: Navegador para a seleção da diretoria corrente.....	60
Figura 3.28: Acesso ao navegador de diretorias. ....	60
Figura 3.29: Dimensões da secção transversal em mm, do Exemplo 1 (exemplo 5.6 em Calado et al. (2013)). ....	61
Figura 3.30: Definição das dimensões em mm (exemplo 6.2 em Calado et al. (2013)): a) viga mista contínua; b) pormenor da secção transversal. ....	63

Figura 3.31: Definição das dimensões em mm (exemplo 6.4 em Calado et al. (2013)): a) viga simplesmente apoiada; b) pormenor da secção transversal. ....	66
Figura 4.1: Disposição e dimensões do veículo de três eixos equidistantes, cada um de duas rodas.....	70
Figura 4.2: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de eixos longitudinais para o veículo-tipo. ....	70
Figura 4.3: Mensagem com informação de erro. ....	71
Figura 4.4: Disposição e dimensões do veículo de dois eixos equidistantes, cada um de duas rodas.....	72
Figura 4.5: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71. ....	74
Figura 4.6: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de eixos longitudinais para o comboio-tipo. ....	74
Figura 4.7: Mensagem com informação de erro. ....	76
Figura 4.8: Aviso informando da irregularidade nos comprimentos vãos da ponte. ....	76
Figura 4.9: Aplicação do modelo LM1. ....	80
Figura 4.10: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71. ....	81
Figura 4.11: Detalhe da secção transversal do tabuleiro em secção multi-viga de três vigas. ....	82
Figura 4.12: Corte longitudinal da solução adotada. ....	83
Figura 5.1: Corte longitudinal da Ponte sobre o Rio Sousa integrada na A43 – Gondomar/Aguiar de Sousa. ....	85
Figura 5.2: Corte transversal do tabuleiro da ponte de referência. ....	86
Figura 5.3: Detalhe da secção transversal da laje de betão. ....	87
Figura 5.4: Pré-dimensionamento de lajes de betão com espessura variável, em tabuleiros mistos (adaptada de Manterola, 2006). ....	88
Figura 5.5: Tabuleiro misto em laje vigada de alma cheia: a) multi-viga; b) bi-viga.....	90
Figura 5.6: Dimensões da secção transversal pré-dimensionada. ....	92
Figura 5.7: Detalhe da secção transversal do tabuleiro em secção multi-viga de três vigas. ....	94
Figura 5.8: Detalhe da secção transversal do tabuleiro em secção multi-viga de quatro vigas. ....	94
Figura 5.9: Dimensões da secção transversal do tabuleiro com secção em caixão. ....	98
Figura 5.10: Rácio da capacidade resistente e estimativa de custo em relação à ponte referência.....	100
Figura B.1: Dados identificadores do caso de estudo. ....	124
Figura B.2: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico. ....	124
Figura B.3: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.....	125
Figura B.4: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas. ....	126
Figura B.5: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. ....	127
Figura B.6: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas. ....	127

Figura B.7: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. ....	128
Figura B.8: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica. ....	129
Figura B.9: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.....	129
Figura B.10: Propriedades do ficheiro de entrada de dados inputFile_PS.m. ....	130
Figura B.11: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , dos dados identificadores do caso de estudo.....	131
Figura B.12: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , das propriedades do perfil e classificação da secção transversal. ....	131
Figura B.13: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , da posição do eixo neutro e momento fletor resistente. ....	132
Figura B.14: Visualização da representação gráfica da secção transversal. ....	132
Figura B.15: Dados identificadores do caso de estudo. ....	134
Figura B.16: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico. ...	135
Figura B.17: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.....	135
Figura B.18: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas. ....	136
Figura B.19: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. ....	137
Figura B.20: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em subcamadas.....	137
Figura B.21: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. ....	138
Figura B.22: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica. ....	139
Figura B.23: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.....	139
Figura B.24: Dados identificadores do caso de estudo. ....	140
Figura B.25: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico. ...	141
Figura B.26: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.....	141
Figura B.27: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas. ....	142
Figura B.28: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. ....	143
Figura B.29: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas. ....	143
Figura B.30: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. ....	144
Figura B.31: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica. ....	145

Figura B.32: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.....	145
Figura B.33: Dados identificadores do caso de estudo. ....	146
Figura B.34: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico. ...	147
Figura B.35: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.....	147
Figura B.36: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas. ....	148
Figura B.37: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. ....	149
Figura B.38: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas. ....	150
Figura B.39: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. ....	150
Figura B.40: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica. ....	151
Figura B.41: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.....	152
Figura B.42: Propriedades do ficheiro de input dados inputFile_PS.m.....	153
Figura B.43: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, dos dados identificadores da secção S1. ....	154
Figura B.44: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão. ....	154
Figura B.45: Visualização dos resultados, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.....	155
Figura B.46: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, dos dados identificadores da secção S2. ....	155
Figura B.47: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão. ....	156
Figura B.48: Visualização dos resultados, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.....	156
Figura B.49: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, dos dados identificadores da secção S3. ....	156
Figura B.50: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão. ....	157
Figura B.51: Visualização dos resultados, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do Matlab, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.....	157
Figura B.52: Visualização da representação gráfica da secção transversal S1.....	158
Figura B.53: Visualização da representação gráfica da secção transversal S2.....	158
Figura B.54: Visualização da representação gráfica da secção transversal S2.....	159
Figura B.55: Dados identificadores do caso de estudo.....	161
Figura B.56: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico. ...	161

Figura B.57: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.....	162
Figura B.58: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas. ....	163
Figura B.59: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. ....	164
Figura B.60: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas. ....	164
Figura B.61: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. ....	165
Figura B.62: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica. ....	166
Figura B.63: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.....	166
Figura B.64: Propriedades do ficheiro de input dados inputFile_PS.m.....	167
Figura B.65: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , dos dados identificadores do caso de estudo.....	168
Figura B.66: Visualização, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , das propriedades do perfil e largura efetiva do banzo de betão. ....	168
Figura B.67: Visualização dos resultados, através da janela de comandos ( <i>Command Window</i> ) do <i>Matlab</i> , da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.....	169
Figura B.68: Visualização da representação gráfica da secção transversal. ....	169
Figura C.1: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte. ....	171
Figura C.2: Escolha da disposição e dimensões das cargas a aplicar na ponte. ....	171
Figura C.3: Parâmetros da definição da configuração do veículo-tipo.....	172
Figura C.4: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte. ....	173
Figura C.5: Escolha da disposição e dimensões das cargas a aplicar na ponte. ....	173
Figura C.6: Parâmetros da definição da configuração do veículo-tipo.....	174
Figura C.7: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte. ....	174
Figura C.8: Parâmetros da definição da configuração do comboio-tipo .....	175
Figura D.1: Visualização da representação gráfica da secção transversal multi-viga (3 vigas).....	177
Figura D.2: Visualização da representação gráfica da secção transversal multi-viga (4 vigas).....	178
Figura D.3: Visualização da representação gráfica da secção transversal duplo-caixão. ....	178

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Dimensões das rodas e pesos do veículo tipo. ....	20
Tabela 2.2: Valores das sobrecargas linear e uniforme. ....	20
Tabela 2.3: Valores característicos dos subsistemas UDL e TS. ....	22
Tabela 2.4: Valores característicos da carga vertical e dos parâmetros geométricos dos modelos SW/0 e SW/2. ....	25
Tabela 3.1: Coeficiente de largura efetiva $\beta$ (adaptado do quadro 3.1, EN 1993-1-5)...	48
Tabela 3.2: Elementos comprimidos interiores (quadro 4.1, EN 1993-1-5).....	55
Tabela 3.3: Elementos comprimidos em consola (salientes) (quadro 4.2, EN 1993-1-5). .....	56
Tabela 3.4: Propriedades dos materiais usados no Exemplo 1. ....	61
Tabela 3.5: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab. ....	62
Tabela 3.6: Características dos materiais usados no Exemplo 2. ....	62
Tabela 3.7: Comparação da classificação da secção transversal entre em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1. ....	63
Tabela 3.8: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1.....	63
Tabela 3.9: Comparação da classificação da secção transversal entre Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S2.....	64
Tabela 3.10: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S2.....	64
Tabela 3.11: Comparação da classificação da secção transversal entre em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S3. ....	65
Tabela 3.12: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S3.....	65
Tabela 3.13: Características dos materiais usados no Exemplo 3. ....	65
Tabela 3.14: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1.....	66
Tabela 4.1: Número e largura das vias segundo a norma europeia (EN 1991-2). ....	79
Tabela 4.2: Cargas máximas obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal multi-viga.....	83
Tabela 5.1: Esbelteza de tabuleiros mistos rodoviários. ....	88
Tabela 5.2: Cargas de rotura obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal bi-viga.....	92
Tabela 5.3: Cargas máximas obtidas em tabuleiros de pontes com secção transversal multi-viga. ....	95
Tabela 5.4: Cargas de rotura obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal caixão. ....	98
Tabela 5.5: Custo unitário e total dos tabuleiros.....	99

# 1 INTRODUÇÃO

Uma ponte é uma solução construtiva que permite interligar ao mesmo nível pontos não acessíveis separados por rios, vales ou uma estrada, em que a componente estrutural tem um peso decisivo na sua conceção. Está intrínseco a uma obra desta natureza um elevado impacto social, e por vezes histórico, na forma como possibilita um fluxo de pessoas e bens que até então não existia e, assim, participar decisivamente no processo evolutivo da sociedade.

As variáveis que determinam o projeto de uma ponte são, sobretudo, as condições funcionais impostas pelo tráfego, as dificuldades inerentes ao obstáculo a ultrapassar, como o perfil topográfico de um vale ou a geotécnica dos terrenos, e a tecnologia disponível. São várias as componentes que no seu conjunto formam a ponte. Esta pode dividir-se em termos de superestrutura, constituída pelo tabuleiro, e infraestrutura, composta pelos pilares, as fundações, os encontros e os aparelhos de apoio. Nesta dissertação, será analisada em pormenor apenas uma dessas componentes, o tabuleiro, que tem inerente uma maior complexidade a nível de projeto e cálculo.

No domínio das várias tipologias de um tabuleiro, será analisada em particular a solução mista, que resulta da combinação da laje de betão com um perfil de aço. Os tabuleiros mistos aço-betão, atendendo às suas características que associam elevada rigidez a um peso relativamente baixo, têm a vantagem, em fase construtiva, de serem muito menos condicionantes dos que os tabuleiros em betão. As vantagens a nível ambiental, de condicionamentos de tráfego e de prazo de execução são também evidentes. O problema de custos de manutenção, antigamente utilizado como argumento contra as soluções mistas, encontra-se hoje em dia ultrapassado. Só o desconhecimento dos novos processos de proteção anticorrosiva e de exigências de manutenção das pontes mistas pode justificar o argumento contra uma solução deste tipo.

Conhecendo o comportamento de cada um dos materiais, é possível aproveitar os pontos fortes de ambos de forma complementar. O betão é eficiente à compressão, protege o aço contra corrosão e isola-o de altas temperaturas (no caso de situações de incêndio). O aço, reúne características complementares, apresentando elevada resistência à tração e esbelteza dos elementos. Além disso, ambos os materiais possuem coeficiente de dilatação térmica linear semelhante.

Atualmente, em Portugal, a implementação de soluções em estrutura mista aço-betão para tabuleiros de pontes tem resultado de um esforço conjunto de Projetistas, Donos de Obra

e Construtores, no sentido de se considerarem, em fases de projeto, ou em concursos de conceção-construção, as soluções mistas como alternativas às soluções de betão armado.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação é avaliar a capacidade de carga de pontes mistas aço-betão. De modo a cumprir com este objetivo principal, foram considerados os seguintes objetivos intermédios:

- Análise plástica e elástica linear de secções transversais de vigas mistas, determinação da largura efetiva do banzo de betão, e classificação da secção transversal;
- Análise longitudinal de tabuleiros mistos aço-betão e consequente definição da carga de colapso;
- Análise comparativa de diferentes soluções estruturais, nomeadamente a verificação da segurança e a estimativa de custo da solução.

## **1.2 Metodologia**

A primeira fase desta dissertação correspondeu à análise do estado da arte, onde é efetuada uma revisão da bibliografia disponível sobre pontes mistas aço-betão. Numa segunda fase, procurou-se analisar diferentes tipos de secções transversais mistas no sentido de compreender a metodologia de cálculo associada à determinação da respetiva capacidade resistente. Com esta medida, pretendeu-se averiguar quais os métodos de análise da secção transversal de vigas mistas, diretamente relacionados com a classe da secção. Em paralelo, automatizou-se o cálculo da capacidade resistente da secção transversal.

Numa terceira fase, automatizou-se o cálculo para a determinação da capacidade de carga de pontes mistas, onde se inclui a definição de casos de carga e a estimativa de custo associado à secção predefinida. Na fase final, desenvolveu-se uma análise comparativa de diferentes soluções estruturais de uma ponte mista, através de uma análise de diferentes casos de carga e custo.

### **1.3 Organização da dissertação**

A dissertação está organizada em seis capítulos e quatro anexos. O Capítulo 1 tem carácter introdutório no qual se apresenta as temáticas constituintes da dissertação, bem como os objetivos inerentes à mesma.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica (estado da arte) referente a tipologias de pontes mistas. Também são explicados os conceitos fundamentais para a análise de secções transversais de vigas mistas, bem como, normas existentes para ações específicas em pontes rodoviárias. Os aspetos fundamentais do desenvolvimento da ferramenta, bem como as metodologias e simplificações adotadas para a análise plástica e elástica linear de secções transversais de vigas mistas, são apresentadas no Capítulo 3.

O Capítulo 4 é dedicado à análise longitudinal do tabuleiro. Este capítulo compreende a metodologia implementada na conceção da ferramenta para a análise da verificação da segurança de pontes mistas aço-betão, e a determinação da respetiva carga de rotura.

O Capítulo 5 apresenta a análise comparativa de diferentes soluções estruturais. São estudadas secções de bi-viga, multi-viga e caixão. É dado especial ênfase ao viaduto sobre o Rio Sousa, integrada na A43-Gondomar/Aguiar de Sousa. O último capítulo apresenta as conclusões relevantes sobre o trabalho apresentado e desenvolvido na presente dissertação, e algumas sugestões como incentivos para futuros desenvolvimentos.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Tipologia de Pontes Mistas

Os tabuleiros mistos aço-betão são em geral mais vantajosos do ponto de vista técnico-económico do que os tabuleiros metálicos, com exceção dos grandes vãos, acima dos 100 a 150 m. Nestes tabuleiros mistos aço-betão, a laje de tabuleiro é uma laje de betão armado ou pré-esforçada, integralmente betonada in-situ, betonada sobre pré-lajes colaborantes ou, mais raramente, integralmente constituída por segmentos pré-fabricados. A estrutura metálica serve de cimbre à laje até que se realize a interação laje-estrutura metálica, passando a estrutura a funcionar como mista. As soluções mistas aço-betão, embora com maior carga permanente, são as preferenciais. A fase construtiva torna-se em geral muito menos condicionante do que numa ponte de betão, as vantagens a nível ambiental, de condicionamentos de tráfego e de prazo de execução são evidentes. O problema de custos de manutenção, antigamente utilizado contra este tipo de soluções em relação às soluções de betão, encontra-se ultrapassado.

Há uma grande diversidade de sistemas estruturais para pontes. Estes podem ser agrupados em quatro grandes grupos: *i)* as pontes em viga, *ii)* as pontes em arco; *iii)* as pontes atirantadas; e *iv)* as pontes suspensas, conforme exemplificado na Figura 2.1.

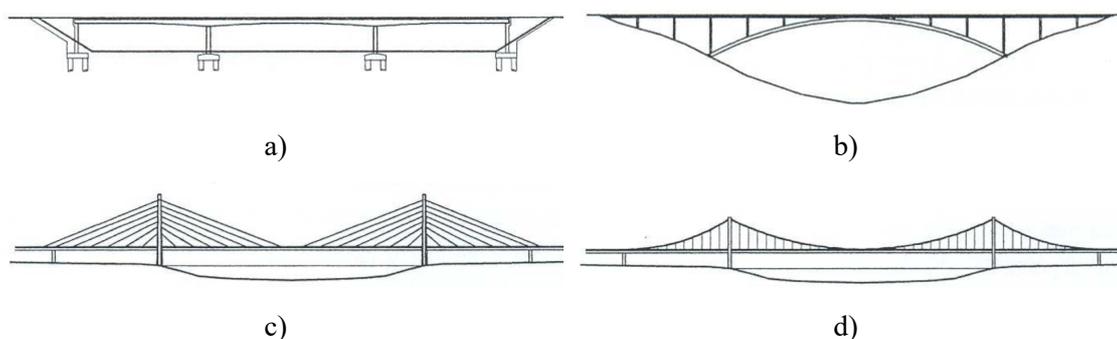


Figura 2.1: Tipologias de pontes conforme o seu sistema estrutural: a) ponte em viga; b) ponte em arco; c) ponte atirantada; d) ponte suspensa.

A escolha do sistema estrutural de uma ponte é uma das tarefas iniciais no trabalho de um projetista. No entanto, a escolha é sempre condicionada pelo seu comportamento estrutural e pela sua expressão estética. As pontes mistas possibilitarão ao projetista uma maior liberdade na execução de novas e inovadoras formas de pontes e viadutos. Estas enquadram-se em qualquer um dos grupos acima indicados. Para este efeito são identificadas algumas tipologias de tabuleiros mais usuais em pontes e viadutos mistos:

*i)* vigas de alma cheia; *ii)* vigas em caixão; *iii)* treliça mista; *iv)* pórticos; *v)* arcos; e/ou *vi)* atirantado/suspensão.

### **2.1.1 Vigas de alma cheia**

Com o progresso da indústria metalúrgica e metalomecânica, emergiram no mercado perfis laminados até 1100 mm de altura. Surgiu também a possibilidade de usar perfis reconstituídos soldados (PRS), sem limitações de altura, sendo a espessura limitada até 150mm, condições que beneficiaram muito a utilização deste tipo de vigas em pontes. Os perfis reconstituídos soldados usados em pontes são constituídos por dois banzos assimétricos soldados a uma alma de pequena espessura, inferior a 25mm, podendo esta ser reforçada longitudinal e transversalmente. A altura ótima da viga neste tipo de ponte oscila entre 1/18 e 1/25 para vãos simplesmente apoiados e contínuos, respetivamente.

No que se refere ao sistema estrutural transversal identifica-se fundamentalmente dois tipos de solução em vigas de alma cheia: *i)* bi-viga; e/ou *ii)* multi-viga.

#### **2.1.1.1 Bi-viga**

Este tipo de solução é composto por duas vigas de alma cheia com um sistema de contraventamento transversal reduzido a carlingas ou a sistemas triangulados constituídos por tubos ou outro tipo de perfis. As almas das vigas são reforçadas transversalmente devido ao afastamento entre perfis e, por vezes, longitudinalmente, dependendo da altura da alma. O espessamento das almas para evitar os reforços longitudinais é em geral compensador, do ponto de vista económico, pelo menos para tabuleiros com alturas até 3 a 4 m. Quanto aos banzos, a utilização de aços soldáveis, permite a utilização de chapas de banzo de grande espessura (em geral até cerca de 120 ou 150 mm) nas secções sobre os apoios. A zona comprimida é composta por uma laje de betão armado ligada às vigas através de conetores metálicos.

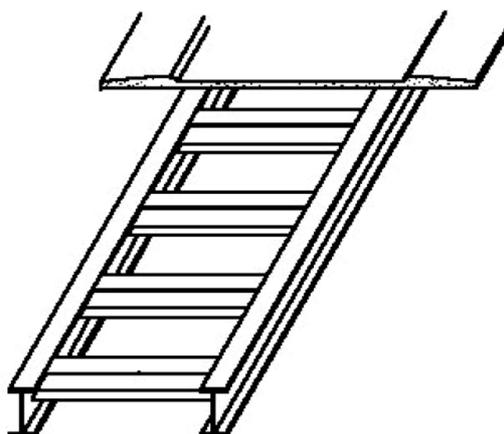


Figura 2.2: Solução de bi-viga.

A laje de betão, para viadutos rodoviários apresentam em geral espessuras variáveis que rondam os 150 a 170 mm, nas extremidades das consolas, 200 a 220 mm, na zona entre vigas e um máximo na ordem de 400 mm, na zona de apoio da laje sobre as vigas.

A laje pode estar apoiada apenas nas vigas longitudinais com um afastamento máximo das vigas da ordem dos 7 m, ou pode também estar apoiada em vigas transversais, afastadas de cerca de 4 m. Esta solução permite uma redução da espessura da laje ou o aumento da largura sem necessidade de recorrer ao pré-esforço. Nesta solução a laje pode ter espessura variável ou constante. Estas vigas metálicas são em geral imbatíveis em custo e facilidade de montagem para uma gama de vãos da ordem dos 40 a 60 m.

### 2.1.1.2 Multi-viga

Esta solução é formada por várias vigas de alma cheia colocadas paralelamente entre si. Sobre as vigas assenta uma laje de betão armado, normalmente de espessura constante. A ligação da laje às vigas é assegurada por conectores, obrigando estes elementos a trabalharem solidariamente quando solicitados, formando uma série de vigas em “T”.

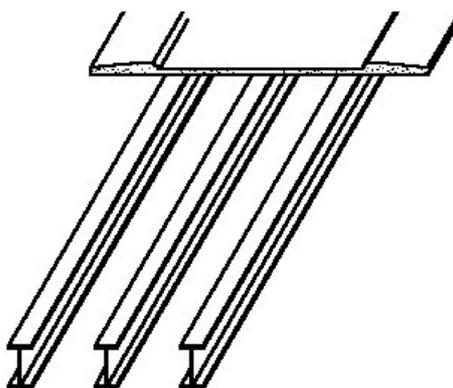


Figura 2.3: Solução de multi-viga.

É uma metodologia usada para pequenos vãos, até cerca de 25 a 30m, em vãos simplesmente apoiados, ou 30 a 40m, em vãos contínuos, isto quando nos referimos a pontes rodoviárias ou ferroviárias.

Os perfis laminados têm maior utilização neste tipo de soluções, em relação aos perfis reconstituídos soldados, devido ao pequeno vão a vencer e à altura reduzida dos perfis. Em alguns casos, mesmo para pequenos vãos, os perfis reconstituídos soldados são mais económicas devido à otimização das áreas dos banzos e, principalmente, da alma que em perfis laminados é significativamente espessa. Para pontes rodoviárias com duas vias de tráfego o espaçamento entre perfis varia entre 2,5 e 4,5 m.

A espessura da laje pode variar entre 200 e os 300mm, dependendo da largura do tabuleiro e do espaçamento entre as vigas metálicas.

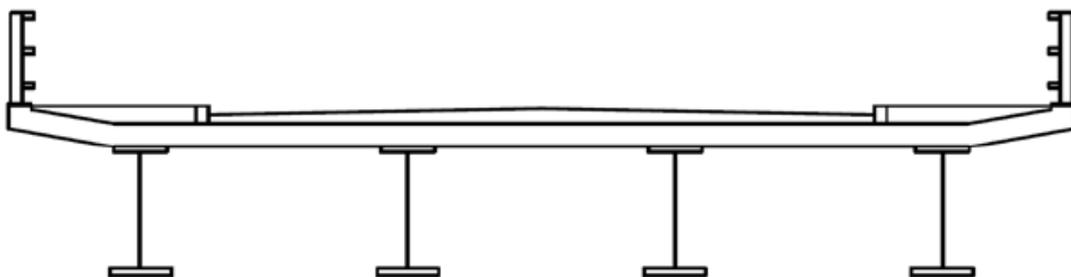


Figura 2.4: Secção transversal de soluções do tipo multi-viga.

### 2.1.2 Vigas em caixão

Este tipo de vigas é composto por duas vigas laterais, uma chapa metálica inferior e um elemento superior que pode ser uma laje de betão armado, chapa metálica ou placa ortotrópica. Este elemento é sempre ligado às vigas, funcionando em conjunto com elas para aumentar a capacidade resistente da secção. Pela sua eficiência, particularmente no comportamento à torção, esta solução apresenta-se bastante competitiva, em especial para grandes vãos, pontes curvas e para situações em que seja importante maximizar a esbelteza. Para vãos acima dos 60 ou 70 m, as soluções mistas em caixão monocelular, começam a ser altamente competitivas em relação às soluções bi-viga.

Esta solução apresenta as seguintes vantagens face às pontes em laje vigada: *i*) rigidez de torção mais elevada devido ao facto de ser uma secção fechada; *ii*) banzo inferior

geralmente mais largo, o que lhe confere maior resistência aos momentos fletores; e/ou *iii*) o espaço interior facilita a manutenção e a passagem de serviços.

Existe a possibilidade de se usar caixão monocelular (ver Figura 2.5a), com ou sem longarinas no interior para apoio da laje de betão, ou duplo-caixão (ver Figura 2.5b). Estes têm como principal função reduzir o vão da laje entre vigas, aumentando a sua resistência aos esforços. Em tabuleiros de grande largura pode-se adicionar escoras laterais para reduzir as consolas ou vigas transversais para as suportar.

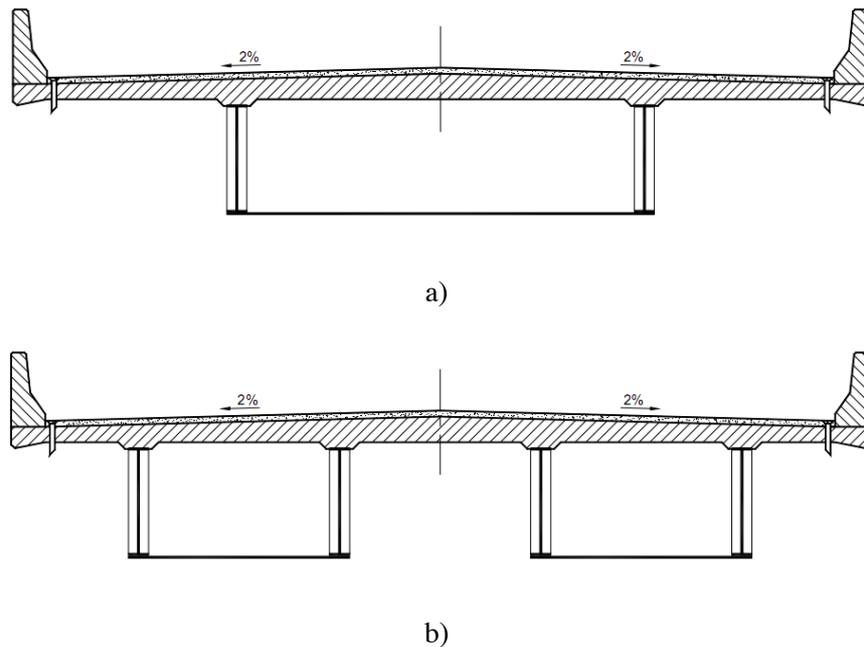


Figura 2.5: Secção transversal em: a) monocelular; b) duplo-caixão.

### 2.1.3 Treliça mista

A treliça mista apresenta um funcionamento semelhante ao das vigas de alma cheia e caixões, mas em que a alma é constituída por um sistema triangulado. Esta solução confere um bom comportamento estrutural, evidenciando elevada rigidez à torção e flexão, resistência à encurvadura em ambas as direções e uma elevada relação da resistência / peso próprio, devido ao seu peso relativamente reduzido.

Os tabuleiros em treliça mista aço-betão são, de todos os que conduzem a um menor consumo de aço por  $m^2$  de tabuleiro. No entanto o seu custo vem agravado pelo custo de mão-de-obra e de manutenção. As treliças podem apresentar uma tipologia clássica, com tabuleiro superior ou inferior, ou serem treliças tridimensionais de secção transversal

triangular. A tipologia preferível para as treliças, mesmo para tabuleiros a dois níveis e grandes vãos, acima dos 100 m, é a treliça Warren com cordas ou cordas e diagonais de secção tubular.

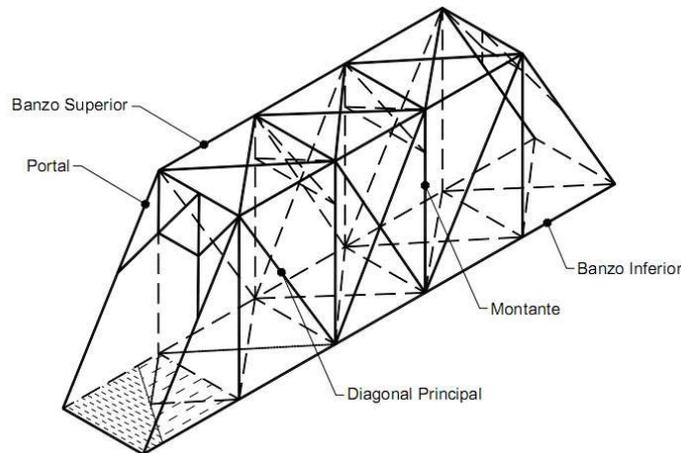


Figura 2.5: Sistema estrutural de uma ponte de um vão em treliça.

#### 2.1.4 Arcos

As pontes em arco têm sido construídas desde a antiguidade até aos dias de hoje. A sua forma é escolhida de modo a minimizar os momentos fletores sobre a ação das cargas permanentes, procurando-se que a estrutura em arco funcione sob compressões apenas. O arco pode ser superior ou inferior em relação ao tabuleiro, ou numa posição intermédia, sendo a solução mais adequada condicionada pela topografia do local de implantação. Pode também ser desligado ou ligado do tabuleiro, o que neste caso, lhe confere maior rigidez.

O conceito de arco invertido, na sua forma mais simples, consiste no traçado que um cabo assume quando suspenso apenas pelas suas extremidades e sujeito ao seu peso próprio. Neste caso só haverá forças tangentes ao cabo (de tração) e não haverá momentos fletores. Invertendo a catenária obtém-se um arco ideal, em que a força resultante das tensões normais em cada secção permanece no núcleo central, não se verificando trações, característica que faz deste, um sistema estrutural de eleição para ser executado em materiais com fraca resistência à tração, como betão ou pedra. Podem atingir 300m de vão.

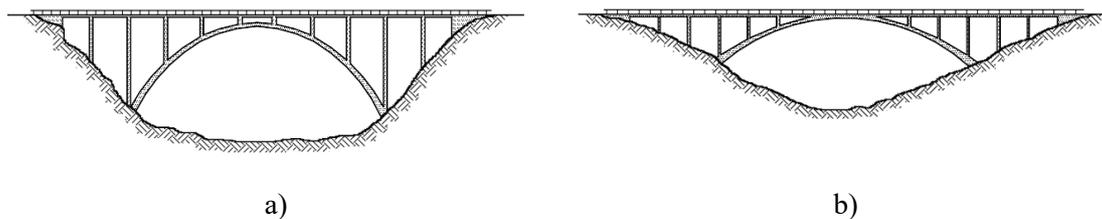


Figura 2.6: Soluções de pontes em arco: a) elevado com tabuleiro superior; b) abatido.

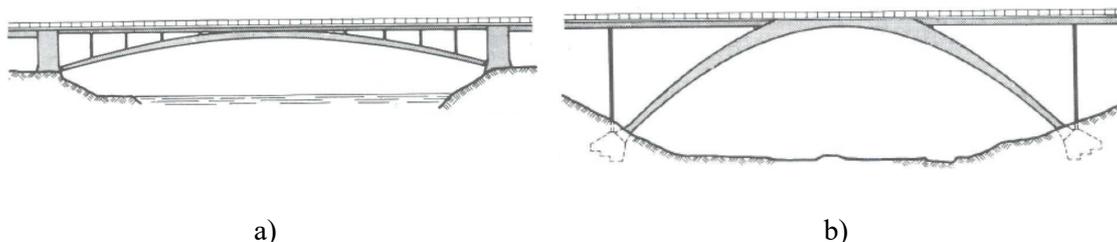


Figura 2.7: Soluções de pontes em arco: a) biarticulado abatido; b) livre.

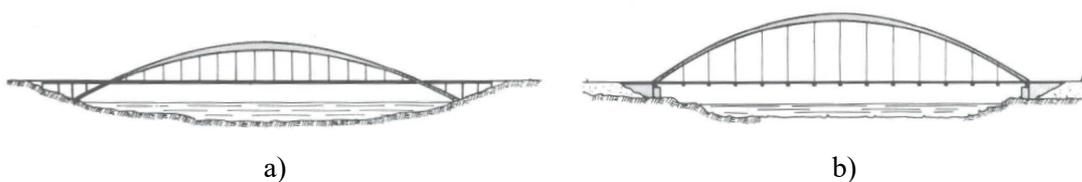
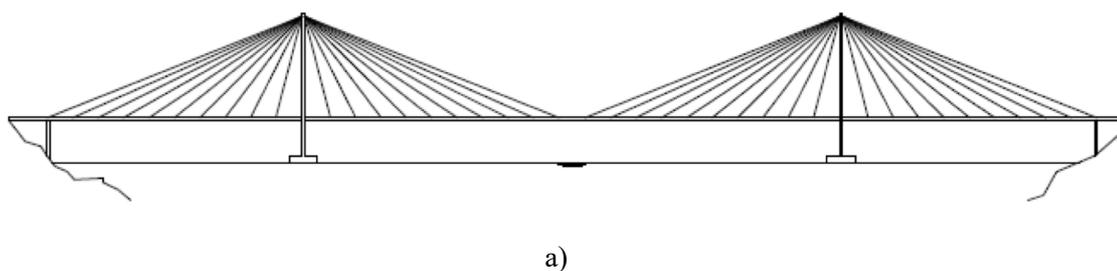


Figura 2.8: Soluções de pontes em arco: a) para grandes vãos com tabuleiro intermediário; b) com tabuleiro inferior funcionando como tirante.

### 2.1.5 Atirantado

Este tipo de ponte têm uma grande faixa de utilização, geralmente dos 100 aos 500m de vão. Os tirantes podem ser dispostos em harpa, em leque e em semi-leque e amarram diretamente no tabuleiro. A estrutura equilibra-se por si só, não estando dependente de boas condições de fixação a blocos de ancoragem nas extremidades. Mas o tabuleiro deve ser dimensionado para o esforço axial de compressão introduzido pelos cabos, que é significativo e tanto maior quanto menor a sua inclinação.



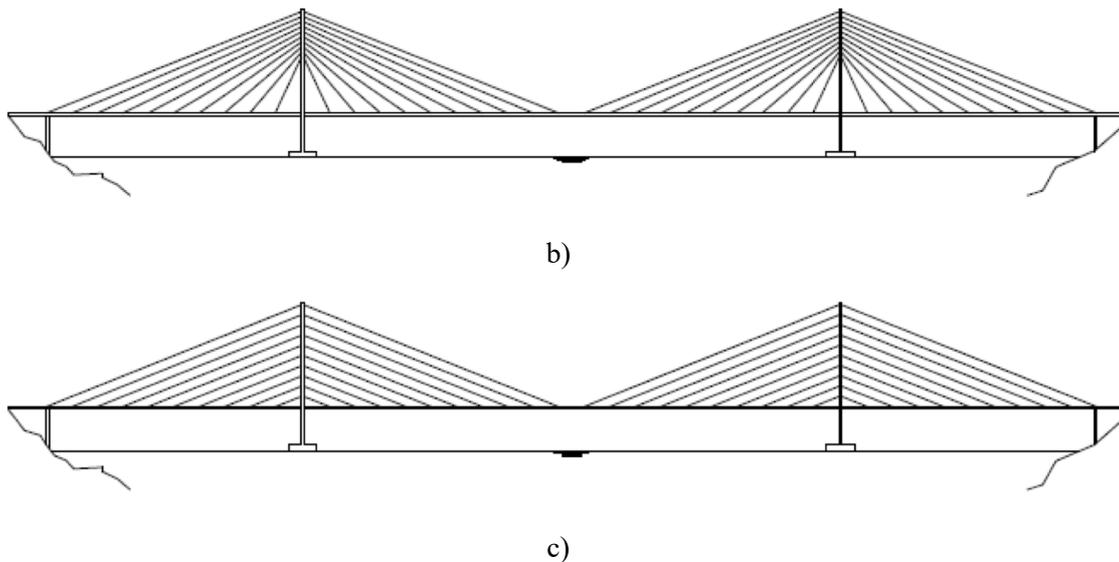


Figura 2.9: Disposição dos tirantes, pontes com duas torres: a) leque; b) semi- leque; c) harpa.

### 2.1.6 Suspenso

A ponte suspensa só começa a ser economicamente rentável a partir dos 500m e pode ir até mais de 1500m de vão. Esta solução é normalmente adotada quando a execução de pilares intermédios não é possível. Os cabos deste tipo de ponte ficam sujeitos a elevadas tensões, sendo fixos ao chão, o que exige boas condições geotécnicas.

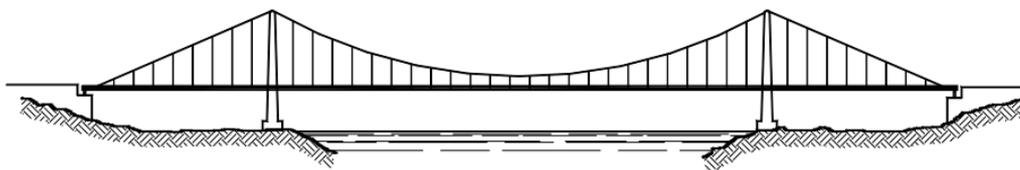


Figura 2.10: Ponte suspensa.

## 2.2 Análise de secções transversais de vigas mistas

As vigas mistas aço/betão resultam da combinação da laje de betão com um perfil em aço, funcionando como um único elemento. As formas que as secções transversais das vigas mistas podem ter são bastante diversificadas. A laje de betão pode ser nervurada ou maciça e o perfil metálico pode ser laminado, soldado ou tubular, betonado ou não.

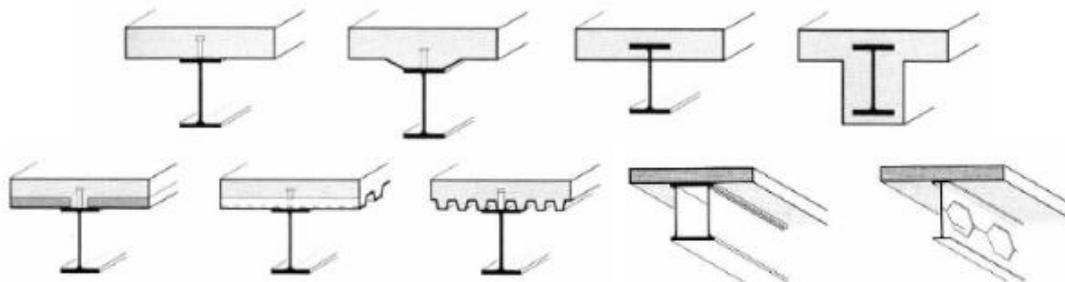


Figura 2.11: Exemplos de secções transversais de vigas mistas.

### 2.2.1 Largura efetiva do banzo de betão

O conceito de largura efetiva está associado à distribuição de tensões variável ao longo da largura da secção, quando atua uma força longitudinal no banzo de betão. As tensões são máximas junto à ligação do banzo de betão com o perfil de aço.

Porém, a distribuição das tensões longitudinais no banzo de betão não é uniforme, se a distância entre as vigas for grande, devido ao efeito de “shear lag”, ou seja, à deformabilidade por corte do banzo de betão. Este efeito é contabilizado no modelo através da consideração de uma largura efetiva do banzo ou largura colaborante,  $b_{eff}$ , onde se assume uma distribuição uniforme de tensões de forma a se obter um funcionamento equivalente ao da distribuição real.

A EN 1994-1-1 propõe que a largura efetiva do banzo de betão,  $b_{eff}$ , na zona do meio-vão e dos apoios internos, seja calculada através da expressão:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei} \quad (2.1)$$

Onde  $b_0$ , representa a distância entre os centros dos conectores extremos; e  $b_{ei}$ , o valor da largura efetiva do banzo de betão de cada lado da alma.

$$b_{ei} = \min\left(\frac{L_e}{8}; b_i\right) \quad (2.2)$$

O valor  $b_i$  deverá ser igual à distância entre o conector extremo e um ponto situado a meia distância entre almas adjacentes, medida a meia altura do banzo de betão, exceto para um bordo livre em que  $b_i$  é a distância ao bordo livre. O vão equivalente  $L_e$ , deverá ser considerado igual à distância aproximada entre pontos de momento fletor nulo. Para vigas simplesmente apoiadas,  $L_e$  é igual ao vão, enquanto para vigas contínuas,  $L_e$  pode ser determinado com base nos valores indicados na Figura 2.12, EN 1994-1-1, 5.4.1.2.

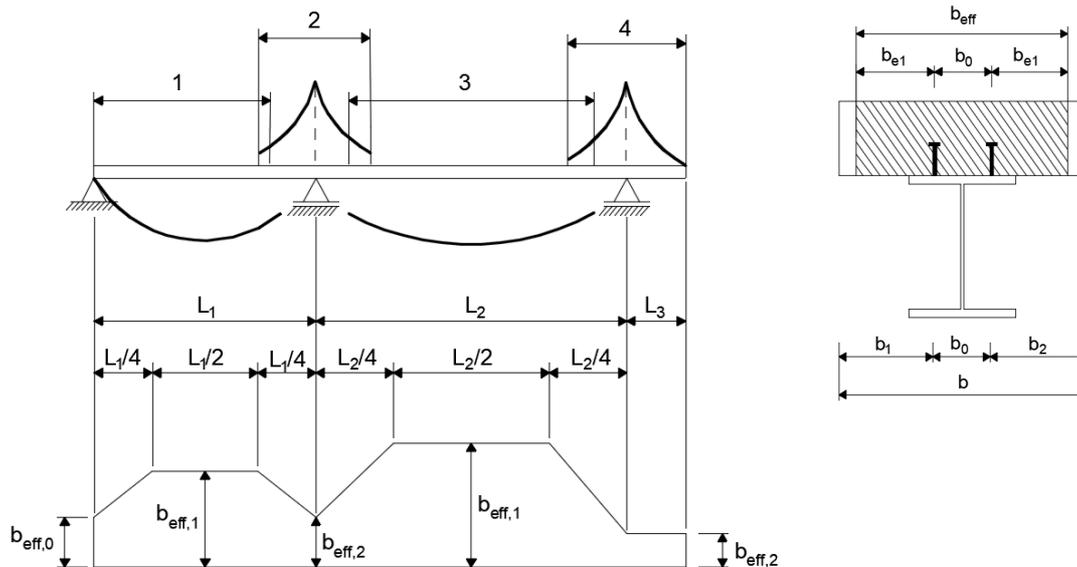
Nos apoios de extremidade, a largura efetiva pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i b_{ei} \quad (2.3)$$

com

$$\beta_i = 0,55 + \frac{0,025L_e}{b_{ei}} \leq 1,0 \quad (2.4)$$

onde  $b_{ei}$  representa o valor da largura efetiva do banço de betão de cada lado da alma; e  $L_e$  a distância entre pontos de inflexão consecutivos no diagrama de momentos fletores.



#### Legenda:

- 1-  $L_e = 0,85L_1$  para  $b_{eff,1}$
- 2-  $L_e = 0,25(L_1 + L_2)$  para  $b_{eff,2}$
- 3-  $L_e = 0,70L_2$  para  $b_{eff,1}$
- 4-  $L_e = 2L_3$  para  $b_{eff,2}$

Figura 2.12: Vãos equivalentes para a largura efetiva do banço de betão (adaptada da figura 5.5, EN 1994-1-1, 5.4.1.2).

### 2.2.2 Classificação da secção transversal

A classificação das secções transversais dos elementos estruturais traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciadas por fenómenos de encurvadura local.

Este fenómeno ocorre em elementos de aço constituídos por chapas finas carregadas à compressão no seu próprio plano, como é o caso de se utilizarem perfis soldados com chapas esbeltas ou perfis enformados a frio, enquanto que numa secção compacta as zonas comprimidas podem plastificar completamente.

Segundo a EN 1994-1-1 e EN 1993-1-1, a encurvadura local é considerada através da classificação da secção transversal, que tem por objetivo identificar em que medida este fenómeno limita a resistência e a capacidade de rotação da viga.

São definidas quatro classes de secções transversais, ver Figura 2.13: *i)* as secções transversais de Classe 1 são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação superior à mínima exigida para uma análise plástica, sem redução da sua resistência. As secções pertencentes a esta classe são designadas por secções plásticas; *ii)* as secções transversais de Classe 2, são aquelas em que é possível atingir o momento plástico, mas que possuem uma capacidade de rotação limitada. As secções pertencentes a esta classe são designadas por secções compactas; *iii)* as secções transversais de Classe 3, são aquelas em que a tensão na fibra extrema mais comprimida do elemento de aço, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que o momento plástico poderá não ser atingido, devido à encurvadura local. As secções pertencentes a esta classe são designadas por secções semi-compactas; e/ou *iv)* as secções transversais de Classe 4, são aquelas onde a encurvadura local impede que seja atingida a tensão de cedência nas zonas mais comprimidas da secção. As secções pertencentes a esta classe são designadas por secções esbeltas.

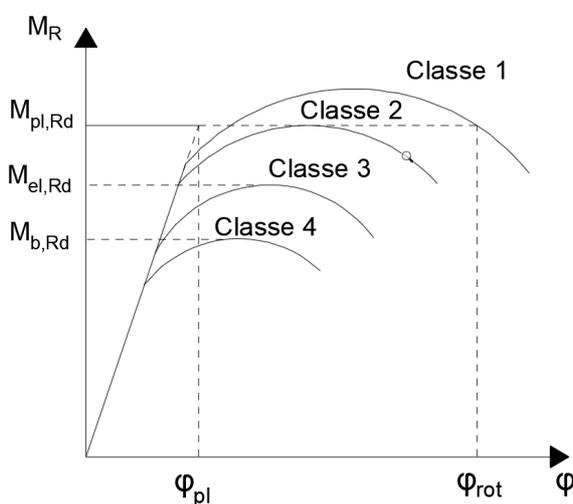


Figura 2.13: Classificação das secções transversais (adaptado de Calado e Santos, 2013).

As secções de Classe 4 são caracterizadas pelo facto de os fenómenos de instabilidade local impedirem que se desenvolva toda a capacidade elástica resistente da secção. Para evitar a consideração explícita destes fenómenos, a EN 1993-1-1 preconiza que a avaliação da resistência seja efetuada com base numa secção efetiva reduzida, deduzindo as zonas da secção suscetíveis de instabilizar localmente.

Uma secção transversal mista é classificada de acordo com a classe mais elevada (menos favorável) dos seus elementos de aço comprimidos, refira-se que os elementos comprimidos incluem todas as partes da secção transversal que se encontrem total ou parcialmente comprimidas sob carregamento considerado. A classe de uma secção mista depende do sinal do momento fletor atuante (positivo ou negativo) ao nível dessa secção, atendendo a que a secção não é simétrica em relação ao eixo neutro da flexão.

Os valores limites da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 são indicados nas tabelas 5.1 e 5.2 da EN 1993-1-1. Nestas tabelas, as colunas referem-se aos diversos tipos de esforços atuantes no componente em causa (alma ou banzo); a classe do aço é tida em conta através do parâmetro  $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ , sendo  $f_y$  a tensão de cedência.

Um elemento que não satisfaça os limites da Classe 3 deverá ser considerado como sendo da Classe 4. A classificação de uma secção é efetuada com base na relação entre o comprimento e a espessura ( $c/t$ ) dos componentes total ou parcialmente comprimidos (alma e banzos), nos esforços atuantes (esforço axial e momento fletor) e na classe do aço, segundo os procedimentos contidos na cláusula 5.5 da EN 1993-1-1.

Na Cláusula 5.5.2(1) da EN 1994-1-1, poderá admitir-se que um banzo comprimido de aço, cuja encurvadura é impedida por meio de uma ligação efetiva por conectores a um banzo de betão, pertence à Classe 1 se o espaçamento dos conectores estiver de acordo com 6.6.5.5.

Para a classificação da secção mista deverá se utilizar a distribuição plástica de tensões, exceto para o limite entre as Classes 3 e 4, em que deverá ser utilizada a distribuição elástica de tensões. Com efeito, a classe da alma depende da posição do eixo neutro de flexão, e esta depende do tipo de distribuição de tensões (elástica ou plástica) que se está a utilizar, não sendo óbvio qual a distribuição de tensões que se deve utilizar quando se está no limite entre as Classes 2 e 3. Utilizando uma distribuição elástica, poder-se-ia classificar a alma como sendo da Classe 2 quando na realidade era da Classe 3. Ao utilizar-se a distribuição plástica de tensões, tem-se a certeza quanto à classificação da alma. É por isso que a EN 1994-1-1, 5.5.1 (4) indica que se deve utilizar a distribuição plástica para classificar as almas até à Classe 3.

As secções mistas com perfis não betonados e que possuam almas da Classe 3 e os banzos de Classe 1 ou 2, podem ser tratadas globalmente como uma secção de Classe 2, se for utilizada uma área efetiva reduzida para a alma, segundo a cláusula 6.2.2.4 da EN 1993-

1-1. A parte comprimida da alma deve ser substituída por um elemento de alma de altura igual a  $20\epsilon t_w$ , ( $\epsilon$  fator que depende de  $f_y$  a tensão de cedência e  $t_w$ , espessura da alma) adjacente ao banzo comprimido, e por outro elemento de alma de altura igual a  $20\epsilon t_w$ , adjacente ao eixo neutro plástico da secção transversal efetiva.

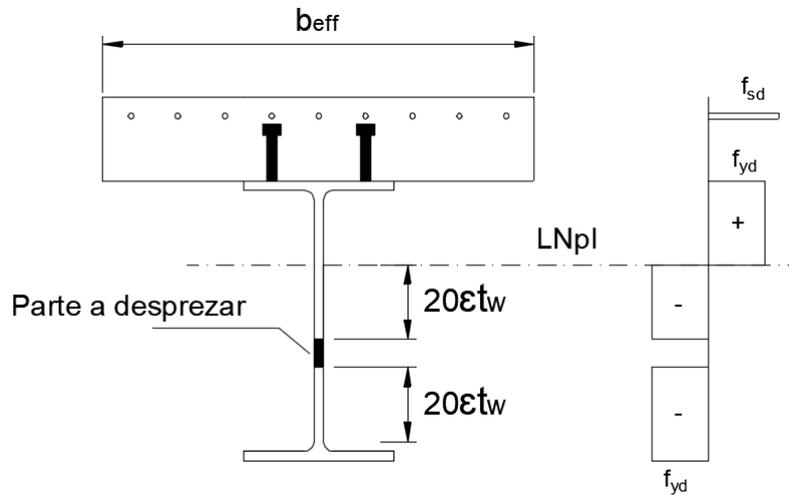


Figura 2.14: Alma efetiva da Classe 2 (adaptado de Calado e Santos, 2013).

As secções de classe 4 são caracterizadas pelo facto de os fenómenos de instabilidade local impedirem que se desenvolva toda a capacidade elástica resistente da secção. Para evitar a consideração explícita destes fenómenos, o EN 1993-1-1 preconiza que a avaliação da resistência seja efetuada com base numa secção efetiva reduzida, deduzindo as zonas da secção suscetíveis de instabilizar localmente.

Para a classificação da secção transversal, deverão utilizar-se os valores de cálculo da resistência dos materiais, o betão tracionado deverá ser desprezado, e a distribuição das tensões deverá ser calculada, considerando a totalidade da secção da alma e a largura efetiva dos banzos, ver a EN 1994-1-1, 5.5.1 (4).

Para as secções transversais das Classes 1 e 2, os varões de armadura tracionados localizada na largura efetiva deverão ser da Classe de ductilidade B ou C, ver EN 1994-1-1, 5.5.1 (5). Para além disso, deverá ser adotada uma área mínima de armadura,  $A_s$ , na largura efetiva do banzo de betão satisfazendo a seguinte condição:

$$A_s \geq \rho_s A_c \quad (2.5)$$

com

$$\rho_s = \delta \frac{f_y}{235} \frac{f_{ctm}}{f_{sk}} \sqrt{k_c} \quad (2.6)$$

onde  $A_c$  corresponde à área efetiva do banzo de betão;  $f_y$  ao valor nominal da tensão de cedência do aço das armaduras;  $f_{sk}$  ao valor característico da tensão de cedência do aço das armaduras;  $f_{cm}$  ao valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples; e  $k_c$  coeficiente menor do que 1,0 e dado no artigo 7.4.2. Neste caso,  $\delta$ , que representa, a relação da contribuição do aço é igual a 1,0 para as secções da Classe 2 e igual a 1,1 para as secções da Classe 1 nas quais é necessária uma rótula plástica.

A justificação para a imposição de uma armadura mínima em secções da Classe 1 ou 2 deve-se ao facto de ser necessário garantir a capacidade de rotação da secção mista sem que a armadura colapse quando a laje de betão se fendilha devido às tensões de tração originadas pelo momento fletor negativo. É por este facto que em secções da Classe 1 e 2 está impedida a utilização de armaduras da classe de ductilidade A, que é menor.

### 2.2.3 Análise Plástica - secções de Classe 1 e 2

A análise plástica de uma estrutura mista implica que as secções dos elementos sejam suficientemente compactas, em geral de Classe 1, possuam elevada capacidade de rotação, sejam simétricas e contraventadas lateralmente, sendo todos estes critérios preconizados pelo EN 1994-1-1.

Para o cálculo do momento fletor resistente plástico  $M_{pl,Rd}$ , de uma secção mista, deverão admitir-se as seguintes hipóteses, 6.2.1.2 (1):

- existe interação total entre o aço estrutural, as armaduras e o betão;
- a secção efetiva do elemento de aço estrutural resiste a uma tensão igual à sua tensão de cedência de cálculo  $f_{yd}$ , em tração ou em compressão;
- as secções efetivas das armaduras longitudinais tracionadas e comprimidas resistem a uma tensão igual à sua tensão de cedência de cálculo  $f_{yd}$ , em tração ou em compressão. Para as secções das Classes 1 e 2, com varões da armadura tracionados, a armadura localizada na largura efetiva deverá ser da Classe de ductilidade B ou C de acordo com a EN 1994-1-1, 5.5.1 (5). Em alternativa, a armadura comprimida de uma laje de betão poderá ser desprezada;
- a secção efetiva de betão comprimido equilibra uma tensão de rotura à compressão igual a  $0,85f_{cd}$ , em que  $f_{cd}$  é o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão, constante em toda a altura entre o eixo neutro plástico e a fibra mais comprimida do betão;

- a resistência do betão à tração não é considerada.

A determinação do valor do momento fletor resistente plástico,  $M_{pl,Rd}$ , depende da posição do eixo neutro plástico,  $LN_{pl}$ . Esta pode ser calculada, dividindo a secção transversal em blocos e aplicando o equilíbrio entre as forças de tração e compressão. A obtenção do valor do momento fletor resistente plástico consiste na multiplicação da força resultante,  $F_i$ , em cada bloco pelo braço,  $z_i$ .

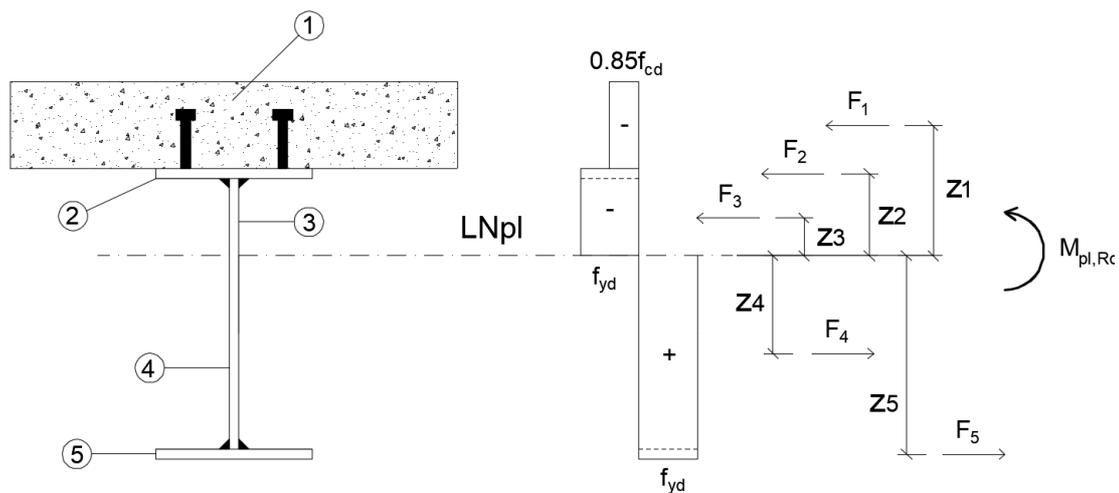


Figura 2.15: Esquema representativo do método de cálculo do valor do momento fletor resistente plástico,  $M_{pl,Rd}$  (adaptado de Calado e Santos, 2013).

#### 2.2.4 Análise Elástica

Numa estrutura mista, os esforços e deslocamentos podem ser obtidos, tal como numa estrutura metálica, através de uma análise elástica. Esta análise assume grande importância dado que as secções metálicas podem possuir dimensões consideráveis e não terem capacidade para desenvolver a resistência plástica.

O cálculo do momento fletor resistente elástico,  $M_{el,Rd}$ , de uma secção mista, é realizado considerando a largura efetiva do banzo de betão, os efeitos da fluência e da retração, a secção efetiva do perfil de aço, caso se trate de uma secção da Classe 4, e o processo construtivo.

Importa referir que em vigas com secções de Classe 1 ou 2, os efeitos da retração e da fluência podem simplificarmente ser desprezados na verificação dos estados limites últimos, desde que a resistência não seja condicionada pela encurvadura lateral.

Relativamente ao efeito da fluência, o artigo 6.2.1.5 (4) do EN 1994-1-1, permite que seja considerado através de um coeficiente de homogeneização  $n_L$ , artigo 5.4.2.2 (2) do EN 1994-1-1.

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} \quad (2.7)$$

em que  $E_a$  é o módulo de elasticidade do aço e  $E_{cm}$  o módulo de elasticidade do betão.

A EN 1994-1-1, na generalidade dos casos, para ter em conta os efeitos de fluência e de retração do betão, obriga a que o coeficiente de homogeneização,  $n_0$ , seja multiplicado por um fator dado por  $(1 + \Psi_L \phi t)$ .

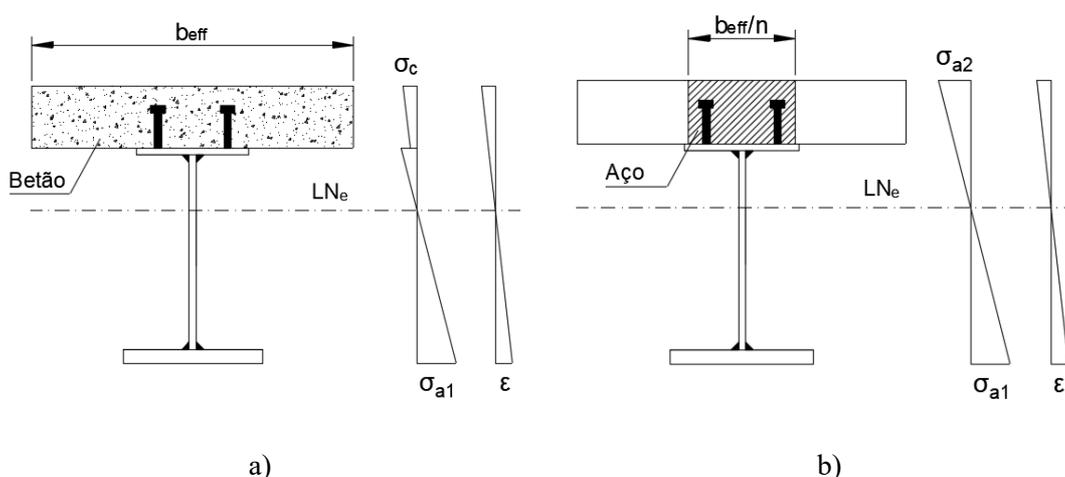


Figura 2.16: Comparação entre secção real e secção homogeneizada: a) secção real de aço-betão; b) secção homogeneizada em aço (adaptado de Calado e Santos, 2013).

## 2.3 Ações específicas de pontes rodoviárias e ferroviárias

No presente item são quantificadas as ações diretamente relacionadas com o tráfego rodoviário e ferroviário, isto é, sobrecargas.

### 2.3.1 Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes

Nas pontes rodoviárias deve se considerar, nas faixas de rodagem, a atuação separada dos dois tipos de sobrecargas definidos nas aléias seguintes e cujos valores característicos são também indicados:

- Veículo de três eixos equidistantes, cada um de duas rodas, com a disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 2.17.

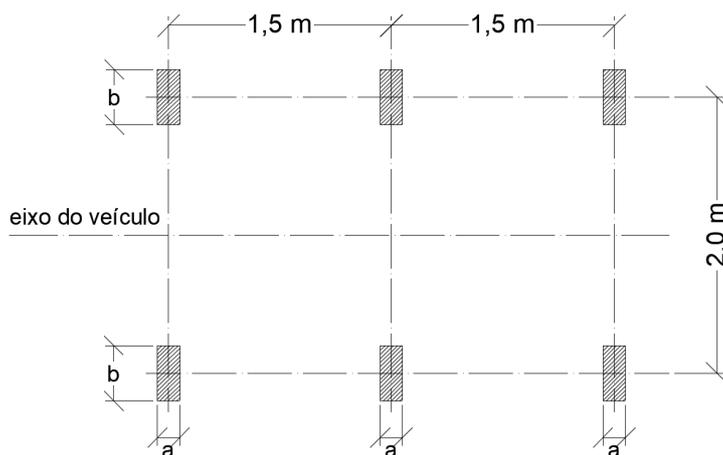


Figura 2.17: Esquema representativo com a disposição e dimensões.

As cargas  $Q$  transmitidas por cada eixo e as dimensões,  $a$  e  $b$ , das superfícies de contacto das rodas são, consoante a classe a que a ponte pertence, as seguintes:

Tabela 2.1: Dimensões das rodas e pesos do veículo tipo.

Classe da ponte	$Q$ (kN)	$a$ (m)	$b$ (m)
I	200	0,20	0,60
II	100	0,20	0,40

- b) Sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída,  $q_1$ , e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme,  $q_2$ , cujos valores, em função da classe da ponte, são os seguintes:

Tabela 2.2: Valores das sobrecargas linear e uniforme.

Classe da ponte	$q_1$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_2$ (kN/m <sup>2</sup> )
I	4	50
II	3	30

Os valores reduzidos das sobrecargas indicadas nas alíneas anteriores devem ser obtidos através dos seguintes coeficientes:  $\psi_1=0,4$ ;  $\psi_2=0,2$ . No caso de a ação sísmica ser a ação de base da combinação, deverá considerar-se  $\psi_2=0$ .

As sobrecargas referidas anteriormente devem ser consideradas atuando, tanto longitudinalmente como transversalmente, na posição mais desfavorável para o elemento em estudo. No que se refere ao veículo, este deverá ser localizado em qualquer posição da

faixa de rodagem, mas sempre com o seu eixo paralelo ao eixo da ponte; no caso de pontes dotadas de duas faixas de rodagem, destinadas cada uma a um sentido único de tráfego, o veículo deve ser aplicado em cada uma das faixas, ou em ambas simultaneamente, desde que cada faixa possa comportar duas ou mais vias de tráfego.

Para efeitos de aplicação do estipulado anteriormente, devem ser considerados como pertencentes à Classe I as pontes que servem vias de comunicação suscetíveis de terem tráfego intenso ou pesado, nomeadamente estradas nacionais, vias urbanas e certas estradas municipais e florestais; e na Classe II devem incluir-se as pontes situadas em vias de comunicação com tráfego ligeiro e pouco intenso, que é o caso dos caminhos e passagens agrícolas e de certas estradas municipais e florestais.

### **2.3.2 EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes**

As normas europeias são compostas por vários documentos, ou partes, e pelos respetivos Anexos Nacionais. As ações do tráfego rodoviário e ferroviário em pontes estão descritas na EN 1991- Parte 2.

#### **2.3.2.1 Tráfego Rodoviário**

A norma europeia EN 1991-2-2003 define quatro modelos de sobrecarga rodoviária independentes, já incluindo os efeitos de amplificação dinâmica, para o estado limite último de resistência. Previamente à aplicação dos modelos de sobrecarga rodoviária, a norma europeia requer a divisão da plataforma de rodagem em notional lanes (vias carregadas ou fictícias). A plataforma de rodagem é definida como a distância entre lancis, ou entre o lancil e o separador físico, ou seja, a área suscetível de ser carregada e que não está impedida fisicamente à passagem de veículos.

##### **2.3.2.1.1 Modelo de carga LM1**

O primeiro modelo definido pela norma europeia, designado LM1, abrange a maioria dos efeitos causados pelo tráfego corrente (situações de tráfego fluído, congestionado e parado) composto por veículos ligeiros e veículos pesados. É o modelo de referência da EN 1991-2 e é utilizado em análises globais e locais dos esforços.

O modelo LM1 consiste na aplicação de uma carga uniformemente distribuída aplicada na área de cada via (subsistema UDL) e por cargas concentradas (subsistema tandem TS), aplicadas por um veículo tipo de dois eixos de duas rodas centrado em cada via fictícia (ver Figura 2.18).

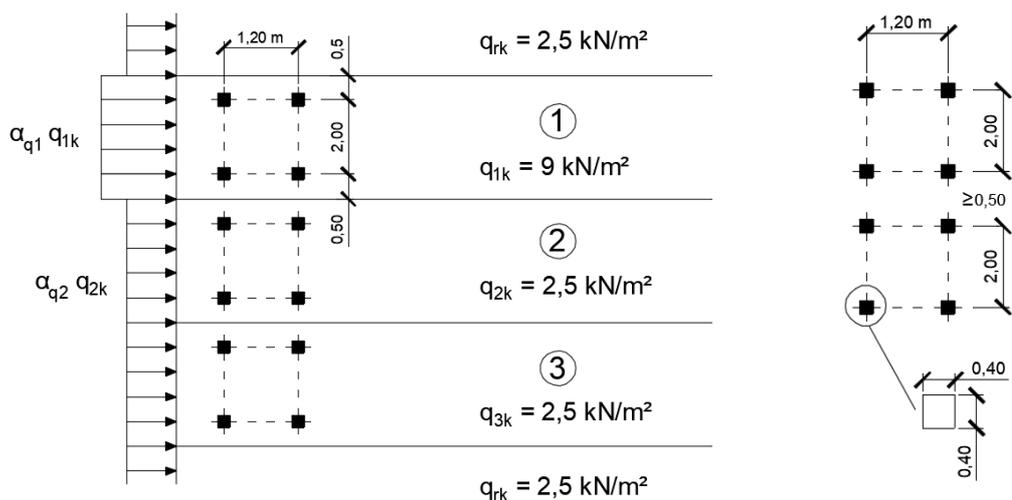


Figura 2.18: Aplicação do modelo LM1.

Na Tabela 2.3 apresentam-se os valores característicos da intensidade das cargas de cada subsistema do modelo LM1 consoante o número da via carregada, incluindo os efeitos de amplificação dinâmica

Tabela 2.3: Valores característicos dos subsistemas UDL e TS.

Número da via $i$	Subsistema UDL	Subsistema TS
	$q_{ik}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$Q_{ik}$ (kN)
Via 1	9,0	300
Via 2	2,5	200
Via 3	2,5	100
Outras vias	2,5	0
Área excedente	2,5	0

### 2.3.2.1.2 Modelo de carga LM2

O segundo modelo de sobrecarga rodoviário definido na EN 1991-2 consiste num veículo de um único eixo de duas rodas, afastadas de 2,00 metros, cada uma com a intensidade de 200 kN (ver Figura 2.19). Este carregamento pretende simular os efeitos dinâmicos locais de um tráfego normal em pontes de pequeno vão. Este modelo pode ser aplicado em qualquer zona das faixas de rodagem e bermas.

O subsistema TS do modelo principal (LM1) da norma europeia não abrange todos os efeitos locais de veículos de vários tipos. Assim, para algumas verificações locais, como por exemplo a verificação do punçoamento em lajes, o modelo LM1 é completado com um modelo adicional designado LM2.

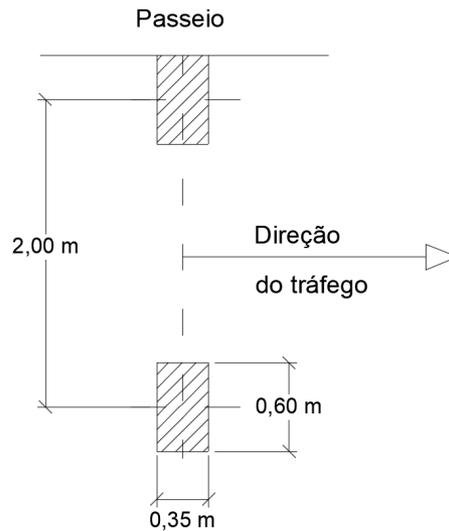


Figura 2.19: Disposição e dimensões do modelo de carga LM2.

### 2.3.2.1.3 Modelo de carga LM3

O terceiro modelo de sobrecarga rodoviário, designado por LM3, representa os efeitos de veículos de transportes especiais cuja circulação necessita de autorização específica. O anexo A da EN 1991-2 define 17 veículos especiais padronizados constituídos por cargas concentradas numa série de eixos (4 a 15 eixos) que dependem da carga total do veículo.

### 2.3.2.1.4 Modelo de carga LM4

O último modelo de sobrecarga referido na EN 1991-2 destina-se a representar os efeitos de cargas de multidão e é relevante em pontes localizadas em zonas urbanas onde eventos desportivos ou culturais possam ocorrer. Estes efeitos podem ser modelados por uma carga uniformemente distribuída, de valor igual a  $5,0 \text{ kN/m}^2$ , em qualquer zona do tabuleiro (inclui a amplificação causada pelos efeitos dinâmicos). Porém, apenas é utilizado quando o modelo LM1 não cobre o seu efeito ou caso não se consiga aplicá-lo.

### 2.3.2.2 Tráfego Ferroviário

Os efeitos estáticos resultantes do tráfego ferroviário são definidos na EN1991-2 através de quatro modelos de carga distintos: o modelo de carga LM71, os modelos de carga SW/0 e SW/2 e o modelo referente ao comboio sem carga (“unloaded train”).

Seguidamente, serão caracterizados cada um dos modelos de carga referidos e indicados os seus campos de aplicação específicos.

### 2.3.2.2.1 Modelo de carga LM71

Este modelo representa os efeitos estáticos do tráfego ferroviário normal, constituindo uma enorme simplificação dos cálculos, já que com apenas um único esquema de cargas consegue-se traduzir os efeitos estáticos de um conjunto de comboios reais considerados representativos do tráfego ferroviário nas pontes.

O modelo de cargas LM71 é constituído por quatro cargas concentradas ( $Q_{vk}$ ) de 250 kN e cargas uniformemente distribuídas ( $q_{vk}$ ) de 80 kN/m, de acordo com o esquema representado na Figura 2.20. Este modelo pretende simular os efeitos das cargas ferroviárias em elementos de pequeno vão através das cargas concentradas, e em elementos de grande vão através das cargas uniformemente distribuídas.

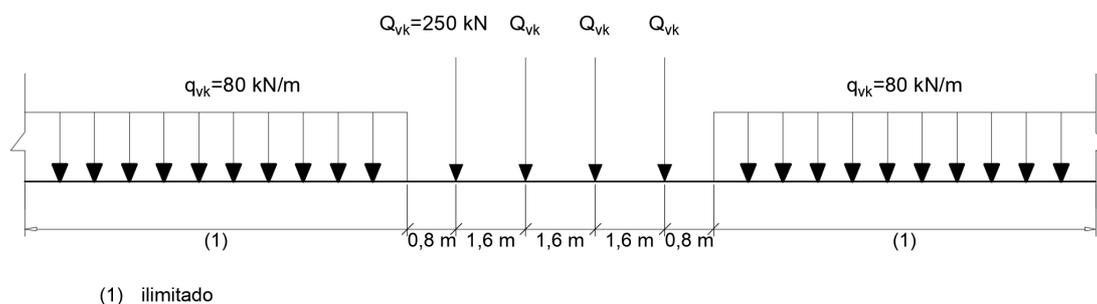


Figura 2.20: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71.

Os valores característicos das cargas indicadas na Figura 2.20 devem ser multiplicados por um fator  $\alpha$  em linhas cujo tráfego seja predominantemente mais pesado ou mais leve em relação ao tráfego considerado normal, passando a ser designado por modelo de cargas classificadas. Este fator pode tomar valores de 1,10, 1,21, 1,33 ou 1,46 no caso de o tráfego ser mais pesado e de 0,75, 0,83 ou 0,91 no caso de o tráfego ser mais leve.

### 2.3.2.2.2 Modelo de carga SW/0 e SW/2

Estes modelos são uma alternativa ao modelo de cargas LM71, em que SW/0 representa os efeitos estáticos do tráfego ferroviário normal a atuar em pontes de tabuleiro contínuo, e o modelo de cargas SW/2 simula os efeitos estáticos do tráfego ferroviário pesado. O valor das cargas distribuídas deste modelo deverá ser multiplicado pelo fator  $\alpha$ , em conformidade com o tipo de tráfego pesado previsto para a linha onde se insere a ponte.

Os esquemas de carga referentes a estes modelos estão representados na Figura 2.21. Os valores característicos das cargas verticais e os parâmetros geométricos estão indicados na Tabela 2.4.

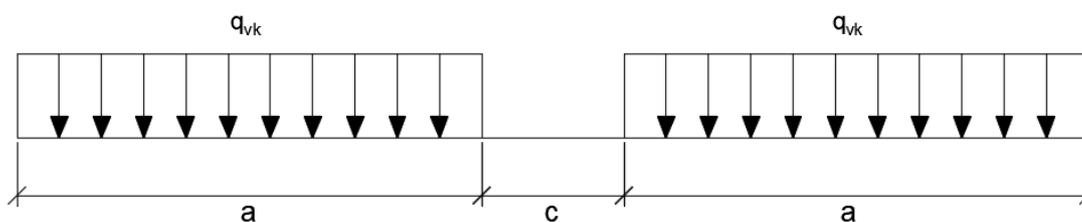


Figura 2.21: Modelos de carga SW/0 e SW/2.

Tabela 2.4: Valores característicos da carga vertical e dos parâmetros geométricos dos modelos SW/0 e SW/2.

Modelo de carga	$q_{vk}$ (kN)	a (m)	c (m)
SW/0	133	15	5,3
SW/2	150	25	7,0

### 2.3.2.2.3 Modelo do comboio sem carga (“unloaded train”)

Este modelo consiste numa carga vertical uniformemente distribuída com um valor característico de 10 kN/m. A sua aplicação é restrita a algumas verificações específicas, como por exemplo, a verificação da estabilidade lateral de uma ponte quando sujeita a ações laterais, como a ação do vento.

## 2.4 Exemplos de pontes e viadutos mistos em Portugal

Neste capítulo será feita uma abordagem a alguns exemplos de aplicação de estruturas mistas em pontes rodoviárias e ferroviárias em Portugal, enumerando algumas obras e descrevendo as suas principais características.

### 2.4.1 Ponte sobre o Rio Sousa

A Ponte sobre o Rio Sousa integrada na A43 – Gondomar/Aguiar de Sousa, apresenta um comprimento total, entre eixos de apoio extremos, de 202,0 m. Com vãos de 44+44+44+44+26 m, o tabuleiro é constituído por uma laje de betão armado de espessura variável entre 0,25 m e 0,4 m, suportada por duas longarinas metálicas de 2,0 m de altura do tipo “I” em aço S355. As longarinas são perfis soldados constituídos a partir de chapas individuais, possuem banzos superiores de 700 mm e espessuras entre 20 e 100 mm, e banzos inferiores de 840 mm de largura e espessuras entre 25 mm e 110 mm. A alma

espessura varia entre 14 e 20 mm, com reforços verticais afastados, entre eixos de 5,5 m nos vãos de 44 m e, de 5,2 m no vão extremo de 26 m.



a)

b)

Figura 2.22: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da secção da ponte.

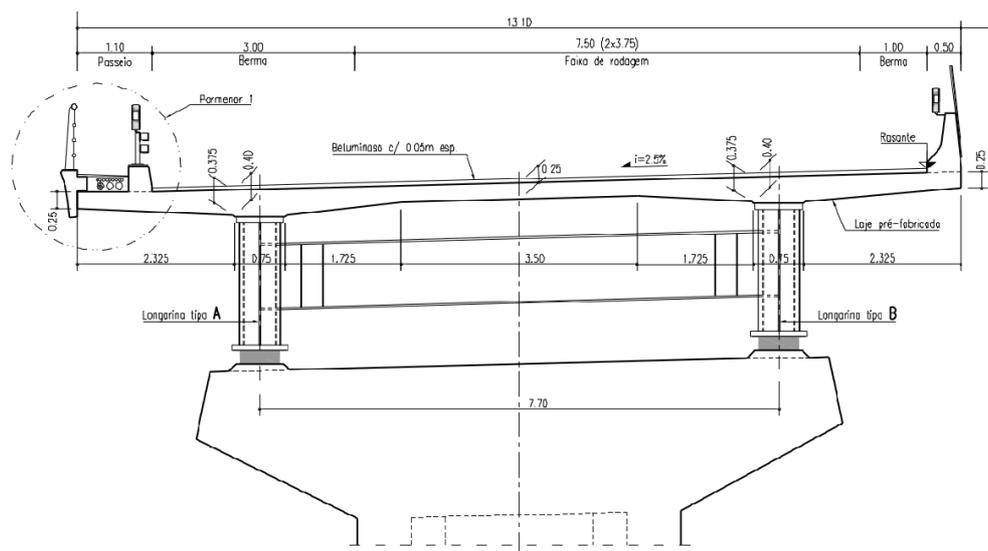


Figura 2.23: Secção transversal do tabuleiro.

#### 2.4.2 Viaduto sobre o IC19, Lisboa

O viaduto rodoviário sobre o IC19 é uma solução mista em caixão, tem um desenvolvimento total de 156 m, composto por quatro vãos de 24m, 45m, 54m e 33m e o tabuleiro possui uma largura de 11,5 m. A estrutura principal é constituída por uma viga caixão com uma largura total de 4,0 m, para permitir o seu transporte em troços de secção transversal única. O tabuleiro é constituído por um banzo inferior de 3500 mm, duas almas verticais com espessuras de 16 a 20 mm e dois banzos superiores de 600 mm de

largura e espessuras variáveis de 40 a 60 mm. O banzo inferior, em chapa de espessura variável de 16 a 35 mm, possui 4 reforços longitudinais constituídos por 1/2 HEA 400. As consolas da laje de tabuleiro são suportadas parcialmente por nervuras metálicas transversais afastadas de 3,0 m entre si.



a)

b)

Figura 2.24: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da secção da ponte.

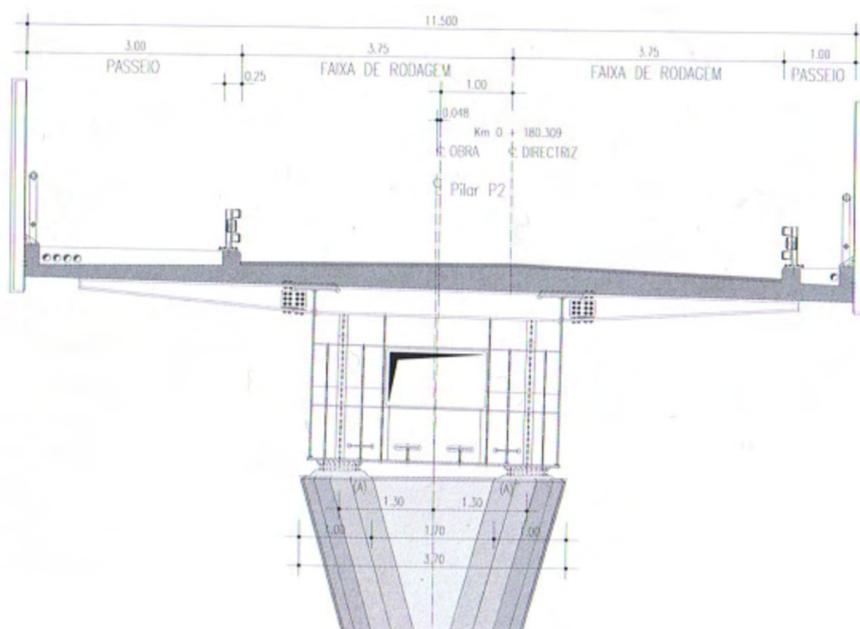


Figura 2.25: Secção transversal do tabuleiro.

### 2.4.3 Ponte Edgar Cardoso (Figueira da Foz)

A Ponte da Figueira da Foz tem uma extensão total de 1421 m distribuído pelo encontro esquerdo com 25 m, o viaduto da margem esquerda com 630 m, a ponte com 405 m, o

viaduto da margem direita com 315 m, e o encontro direito com 46 m. O tabuleiro é misto de aço e de betão, é suportado por duas torres auto-estáveis, dois pilares de transição e 12 tirantes em cada torre com continuidade sobre estas. A Ponte de tirantes tem um vão central de 225 m e vãos laterais de 90 m. O tabuleiro é constituído por uma estrutura metálica com duas vigas principais de 2 m de altura, sendo cada viga constituída por duas vigas metálicas de alma cheia, interligadas por carlingas da mesma altura afastadas de 10 m, as quais por sua vez suportam as longarinas afastadas de 3,2 m. Sobre essa grelha apoia uma laje de betão armado de espessura variável de 0,13 m no vão a 0,20 m de espessura sobre as longarinas.

O perfil transversal envolve uma plataforma com 20,00 m de largura, constituída por duas faixas de rodagem de 7,50 m cada, dois passeios de 2,00 m e um separador central de 1,00 m.



a)

b)

Figura 2.26: a) vista geral da ponte; b) vista inferior da ponte

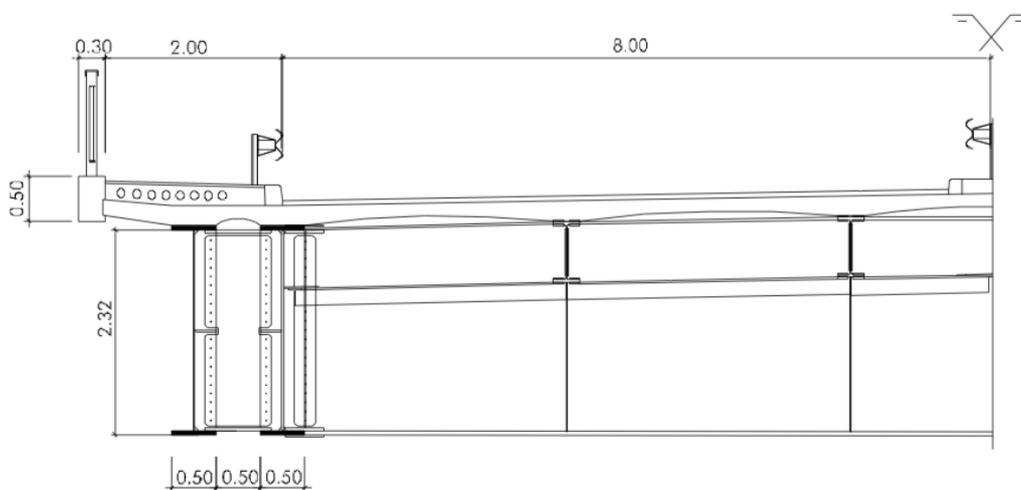
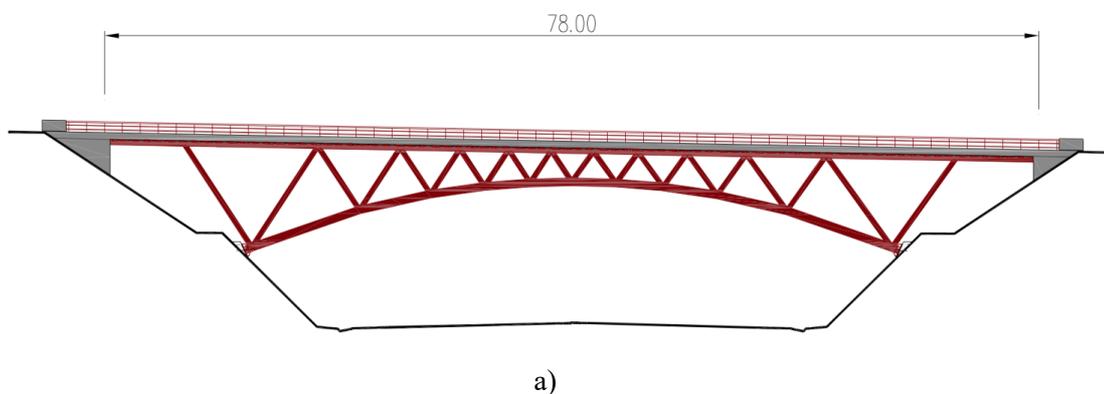
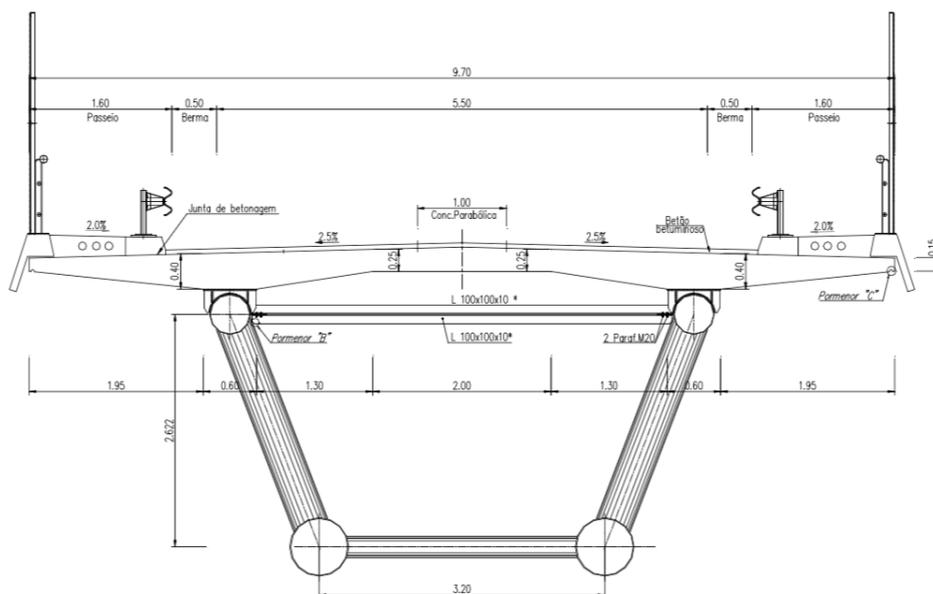


Figura 2.27: Corte transversal a meio vão

#### 2.4.4 Passagem superior à A3-Porto/Valença

A passagem superior à auto-estrada A3 – Porto/Valença, sublanço Maia/Santo Tirso – com localização no concelho da Maia, permitindo a ligação às zonas das Furnas e do Outeiro é uma solução em arco metálico treliçado com tabuleiro em betão, tem um desenvolvimento de 78 m e o tabuleiro possui uma largura de 9,7 m. No que respeita à estrutura metálica, esta é constituída por perfis circulares ocos de aço. Os elementos que compõem a treliça metálica são ligados entre si por cordões de soldadura, à exceção das ligações efetuadas entre a corda superior e a carlinga do encontro e entre a corda superior e chapa de ancoragem, as quais são efetuadas por uniões aparafusadas. O tabuleiro da ponte é constituído por lajes pré-fabricadas de betão armado, compostas por placas em toda a largura da ponte e com 2 metros no sentido longitudinal desta. As placas de betão são solidarizadas às cordas superiores da estrutura metálica por meio de conectores circulares de cabeça, todos eles com 22 mm de diâmetro. Estes estão soldados a chapas, as quais estão afastadas de 1 metro no sentido longitudinal da ponte e, que por sua vez, estão soldadas aos perfis das cordas superiores da treliça.





b)

Figura 2.28: a) alçado longitudinal da solução; b) corte transversal do tabuleiro sobre meio vão.

#### 2.4.5 Viaduto misto Maia Norte

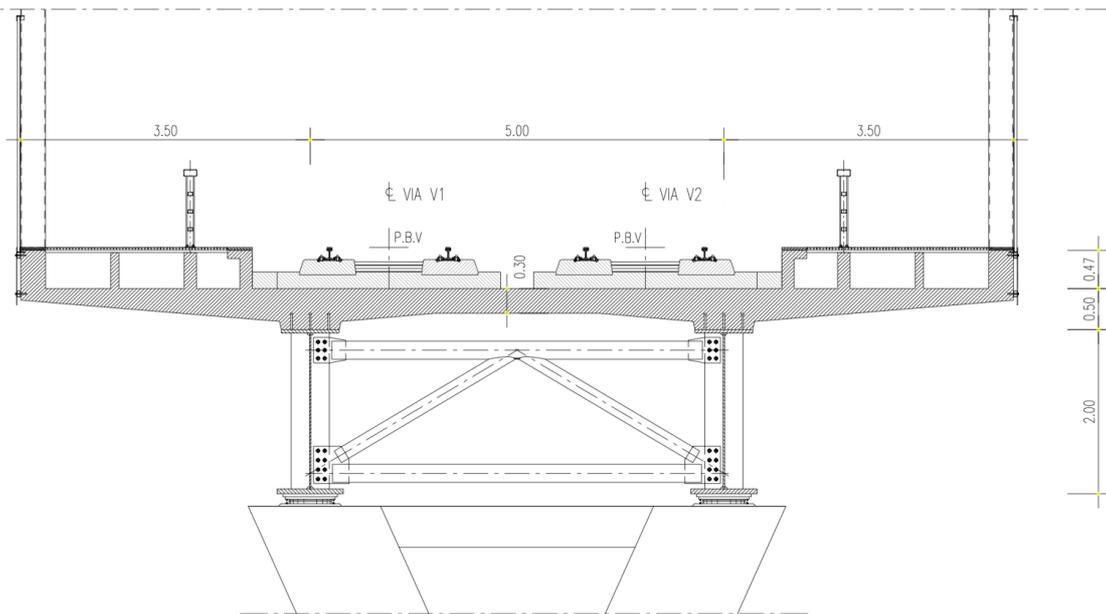
O viaduto misto Maia Norte insere-se na linha C da rede do Metro do Porto e estabelece a ligação entre o Estádio do Dragão e Instituto Superior da Maia (ISMAI).

O viaduto tem uma superestrutura de altura constante de 2,5 m e um comprimento total entre juntas de dilatação nos encontros de 524,4 m. Este integra 15 tramos de comprimentos variáveis com a seguinte modelação de norte para sul, 22,8 m + 34,2 m + 2x39,9 m + 45,60 m + 2x39,9 m + 7x34,2 m + 22,8 m. O viaduto é constituído por um tabuleiro do tipo bi-viga constituída por duas vigas de alma cheia, em estrutura mista aço e betão, apoiado em 14 pilares de betão armado. A laje do tabuleiro tem uma largura total de 12,0 m, incluindo passeios pedonais com guarda corpos de proteção da via férrea, tal como se pode visualizar no esquema da Figura 2.29. A espessura da laje é variável transversalmente entre 0,20m na extremidade das consolas e 0,30m entre as vigas.

As vigas possuem uma altura de 2000 mm, entre faces externas de banzos, estas possuem almas de espessura de 14 mm a 20 mm com reforços transversais, em forma de nervuras, afastados em geral cerca de 5,70 m. O banzo superior tem uma largura de 700 mm e o banzo inferior de 800 mm, constantes em toda a extensão do viaduto. As chapas dos banzos têm espessura variável entre 40 mm e 80 mm.



a)



b)

Figura 2.29: a) vista geral do viaduto; b) Secção transversal da superestrutura do viaduto.

## 2.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o estado atual do conhecimento no que diz respeito à avaliação da capacidade resistente das secções transversais geralmente utilizadas em pontes mistas aço-betão. Abordaram-se alguns dos aspetos sobre tipologias de tabuleiros mistos utilizados em diversos projetos com secções transversais: *i)* do tipo bi-viga, *ii)* em multi-viga; *iii)* em caixão; e *iv)* em treliça mista. Introduziu-se o conceito da largura efetiva do banzo de betão e as principais regras de classificação da secção transversal responsáveis pela consideração da encurvadura local de partes do perfil de aço. Foram, também, descritos os princípios fundamentais referentes à análise plástica, assim como a

análise elástica linear de secções transversais de vigas mistas utilizada pelos regulamentos atuais.

Relativamente à análise transversal de vigas mistas, apresentaram-se as considerações que permitem calcular os esforços resistentes e os diversos métodos de quantificação dos esforços resistentes. Em relação à análise longitudinal de pontes, apresentaram-se os diversos modelos de sobrecargas preconizados nas normas Europeia e Portuguesa para o dimensionamento de pontes rodoviárias e ferroviárias.

No final do capítulo, referiu-se, de breve modo, a exemplos de estruturas mistas aplicadas em pontes rodoviárias e ferroviárias em Portugal.

## 3 ANÁLISE DE SECÇÃO TRANSVERSAL

### 3.1 Introdução

Este capítulo apresenta os aspetos fundamentais da metodologia implementada na ferramenta de cálculo, com o objetivo de analisar secções transversais mistas.

### 3.2 Apresentação da ferramenta

A ferramenta foi desenvolvida com o objetivo final de avaliar a capacidade de carga de pontes com tabuleiro em secção mista de aço e betão, sendo programada com o recurso ao software de computação numérica *Matlab*. Toda a metodologia considerada no cálculo de secções transversais mistas tem por base as normas EN 1993-1-1 e EN 1994-1-1. A ferramenta é apresentada ao leitor no presente capítulo. Ao utilizador basta introduzir os dados da secção mista para que o cálculo seja efetuado de forma simples e rápida.

Como veremos ao longo deste capítulo, esta ferramenta permite determinar a largura efetiva do banzo de betão nas diferentes zonas de uma viga mista contínua ou simplesmente apoiada, classificar secções transversais e determinar o valor do momento fletor resistente plástico e elástico. Desta forma, a ferramenta é capaz de integrar um grande conjunto de ficheiros de funções, organizados segundo diferentes áreas de cálculo.

A ferramenta permite criar facilmente as formas geométricas das secções transversais das vigas mistas, através da introdução de coordenadas. Tais coordenadas podem ser verificadas através de uma representação gráfica

Outro aspeto importante da ferramenta é a capacidade de dividir a secção transversal em camadas para determinar a posição do eixo neutro, bastando ao utilizador introduzir o número pretendido de divisões para cada elemento da secção transversal. A ferramenta permite criar um leque alargado de formas geométricas que as secções transversais das vigas mistas podem assumir, dos mais diversos tipos, já que resultam da combinação da laje de betão com o perfil de aço. Outro aspeto aliciante da ferramenta é o facto de permitir adicionar reforços de chapas de aço nos banzos e na alma do perfil metálico, e em seguida classificar as secções transversais e determinar o valor do momento fletor resistente.

A ferramenta disponibiliza ainda uma função que permite determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. A ferramenta também permite verificar a capacidade resistente de secções da classe 4, tendo programada uma metodologia que permite aplicar o “método aproximado” para considerar flexão composta em torno do eixo de maior inércia.

### 3.3 Estrutura da ferramenta

O desenvolvimento da ferramenta de cálculo em ambiente *Matlab* para avaliação da capacidade de carga de secções mistas em aço e betão foi organizado da seguinte forma:

- Criação do ficheiro de introdução de dados relativos à secção transversal, através do ficheiro `inputFile_Cross_section.m`;
- Definição dos parâmetros da secção transversal no ficheiro de entrada de dados criado no tópico anterior;
- Introdução dos ficheiros de dados relativos à secção transversal criados no tópico anterior a partir do ficheiro `inputFile_PS.m`;
- Inicialização da ferramenta a partir da janela de comandos (Command Window) do Matlab escrevendo `mainCalculoVigasMistas`, sem extensão `‘.m’`.
- Definição do nome do arquivo de entrada a partir da linha de comandos do Matlab escrevendo `‘inputFile_PS.m’`;
- Introdução do valor da opção de cálculo (0: Exit, 1: Help, 2: Effective Web, 3: Plastic Moment, 4: Collapse Load);
- Visualização dos resultados através da janela de comandos;

### 3.4 Métodos de programação

A ferramenta foi desenvolvida utilizando o software informático *Matlab*. O *Matlab* é uma poderosa ferramenta de computação numérica, com um ambiente de trabalho de fácil utilização e uma potente capacidade para realização de cálculos matemáticos de forma interativa. É uma ferramenta cujo elemento de dados básico é a matriz e para além de incorporar um grande conjunto de funções internas, que permite solucionar problemas computacionais de uma forma mais rápida, simples e compacta do que quando desenvolvidos numa das linguagens de programação mais tradicionais, como C, Fortran ou Pascal (Morais *et al*, 2015).

Cada ficheiro apresentado na ferramenta resulta da criação de um ficheiro-M. Um ficheiro-M é um ficheiro de texto que agrega um conjunto de instruções de código *Matlab*. O *Matlab* permite a criação, manipulação e execução de dois tipos de ficheiros-M, *scripts* e funções. Os *scripts* automatizam uma sequência de instruções de código, sendo muito úteis para realizar tarefas que envolvam a execução de muitas instruções. Para serem invocadas, deve escrever-se o seu nome na janela de comandos, sem a extensão `‘m’`. Ao

contrário dos scripts, as funções aceitam argumentos de entrada e retornam valores de saída depois da sua execução. As variáveis utilizadas são internas à própria função, o que significa que são invisíveis no ambiente de trabalho

A ferramenta desenvolvida possui ficheiros de entrada de dados. Nas secções que se seguem, irão ser apresentados os ficheiros de dados da ferramenta, respeitando a ordem de funcionamento da mesma. Conhecer a forma como esta informação se articula é fundamental para poder usar a ferramenta corretamente.

### **3.4.1 Ficheiro de entrada de dados da secção transversal**

Neste tópico, descreve-se a estrutura organizativa de toda a informação que a ferramenta regista para a definição geométrica da secção transversal.

O ficheiro `inputFile_Cross_section.m` servirá de base à criação do novo ficheiro de dados da secção transversal. Neste ficheiro são introduzidos pelo utilizador dados para a identificação e definição da secção transversal. A especificação das coordenadas na definição das variáveis é sempre efetuada em metros.

A criação de outros ficheiros de dados através do ficheiro `inputFile_Cross_section.m` tem como objetivo proporcionar ao utilizador a opção de calcular várias secções transversais simultaneamente. No anexo 2, exemplifica-se a criação de vários ficheiros input de dados da secção transversal.

A ferramenta disponibiliza várias variáveis para identificar os ficheiros de dados das secções transversais inseridas, de forma que, aquando da saída dos resultados, o utilizador possa optar rapidamente pela mais indicada. Os dados identificadores têm de ser obrigatoriamente preenchidos. Nesse grupo de dados, realça-se a importância destes parâmetros, pois permite atribuir uma identificação às secções transversais.

Em seguida, identifica-se a função de cada um dos parâmetros do ficheiro de dados da secção transversal.

- `inputdata.spanName` – definição da variável para identificação do vão em estudo.
- `inputdata.sectionName` – definição da variável para identificação da secção em estudo.
- `inputdata.sectionType` – definição da variável para escolha de tipo de secção para o estudo. A ferramenta permite o cálculo de secções transversais mistas com perfil em I, bi-viga, multi-viga com três ou quatro vigas, caixão ou em duplo-caixão,

através da introdução da letra I, das letras II, das letras III ou IIII, da letra C e das letras CC, respetivamente.

- `inputdata.effWeb.Stretches` – definição do vetor para identificação dos comprimentos dos vãos longitudinais da ponte, como se ilustra na Figura 3.1. É importante referir que não existe limite no número de vãos a introduzir. A ferramenta permite considerar tramos simplesmente apoiados ou com continuidade, mas não efetua o cálculo de tramos em consola.

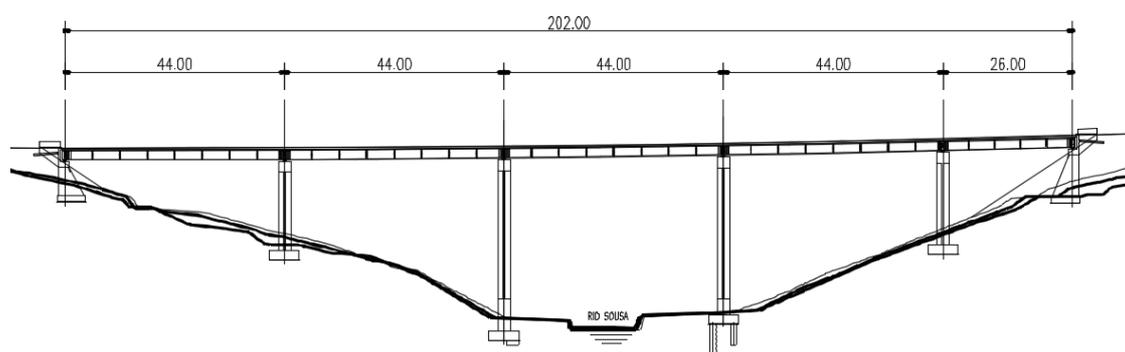


Figura 3.1: Corte longitudinal da Ponte sobre o Rio Sousa integrada na A43 – Gondomar/Aguiar de Sousa.

- `inputdata.effWeb.num.Stretches` – definição da variável para seleção do tramo da ponte a ser estudado, como se ilustra na Figura 3.2. A escolha do tramo é realizada com a introdução do que lhe algoritmo corresponde. Por exemplo, o primeiro tramo da ponte representada na Figura 3.2 corresponde ao algoritmo 1, o segundo tramo corresponde ao algoritmo 2 e assim sucessivamente.

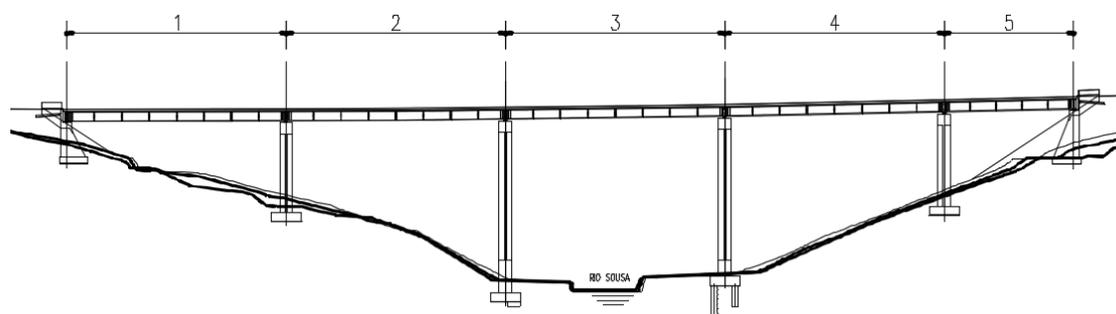


Figura 3.2: Esquema representativo da numeração adotada.

- `inputdata.effWeb.sectionID` – definição da variável para seleção do apoio correspondente ao tramo em estudo, como se ilustra na Figura 3.3. A ferramenta permite o cálculo para o apoio esquerdo, apoio direito e a meio vão do tramo em estudo. Para efetuar o cálculo da secção transversal é necessário inserir um algarismo entre 1 e 3. O algarismo 1 corresponde ao apoio do lado esquerdo, o algarismo 2 ao apoio do lado direito e o algarismo 3 corresponde ao meio vão. É importante referir que no apoio de um vão intermédio existe a numeração do lado esquerdo e do lado direito, mas só é necessário efetuar o cálculo de uma das situações, porque o resultado será o mesmo para os dois tramos.

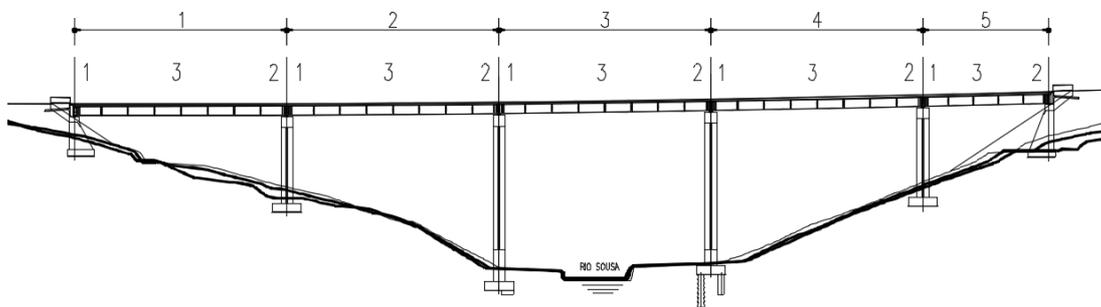


Figura 3.3: Esquema representativo da numeração adotada.

Descreve-se, de seguida, as principais propriedades que caracterizam a secção transversal.

- `inputdata.section.concreteSlab.props` – definição do vetor das propriedades da laje de betão,  $E_c$  (módulo de elasticidade do betão) e  $f_{cd}$  (valor de cálculo da tensão de rotura do betão á compressão).
- `inputdata.section.steelCrossSection.props` – definição do vetor das propriedades do perfil metálico,  $E_a$  (módulo de elasticidade do aço estrutural) e  $f_{yd}$  (valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural).
- `inputdata.section.steelReinf.props` – definição do vetor das propriedades das armaduras ordinárias,  $E_s$  (módulo de elasticidade do aço para betão armado) e  $f_{sd}$  (valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado).
- `inputdata.section.concrete.coord` – definição da matriz das coordenadas da laje de betão, tendo por base um conjunto de pontos que permitem definir completamente a sua geometria. Esse conjunto de pontos e as suas coordenadas estão previamente estabelecidos de forma genérica, permitindo que o utilizador especifique a sua

secção. As coordenadas são definidas a partir de variáveis  $x$  e  $y$ , em que  $x$  define a posição horizontal e  $y$  define a posição vertical. Para definição de matrizes na ferramenta existem duas formas equivalentes: escrever as diferentes linhas da matriz separadas por ponto e vírgula (;) ou escrever as linhas com os elementos separados por espaços ou vírgulas. Também podem ser definidas matrizes separando linhas consecutivas com a tecla *Enter*. Para obter corretamente a matriz das coordenadas da laje de betão, dever-se-á especificar as coordenadas no sentido adequado, de acordo com a regra exibida pela Figura 3.5 e pela Figura 3.7. Como a secção transversal é uma secção simétrica optou-se por dividir a secção em duas partes iguais para facilitar a introdução das coordenadas da secção, como se ilustra na Figura 3.4.

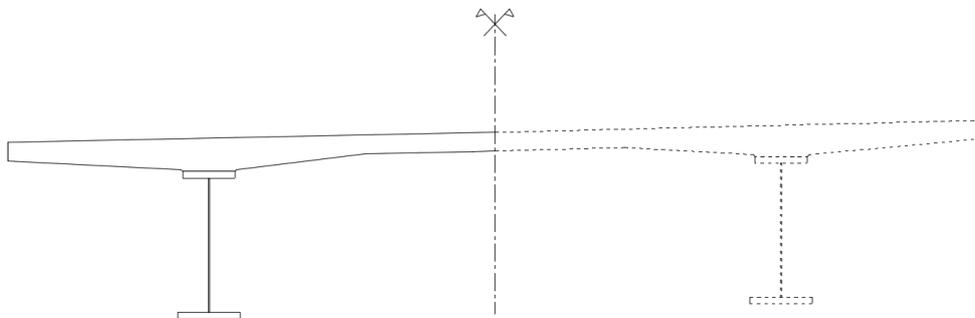


Figura 3.4: Esquema representativo.

Caso se pretenda calcular a largura efetiva do banzo de betão e classificar a secção transversal, é importante definir coordenadas para as posições dos conetores extremos e a coordenada média entre conetores, como se ilustra na Figura 3.5.

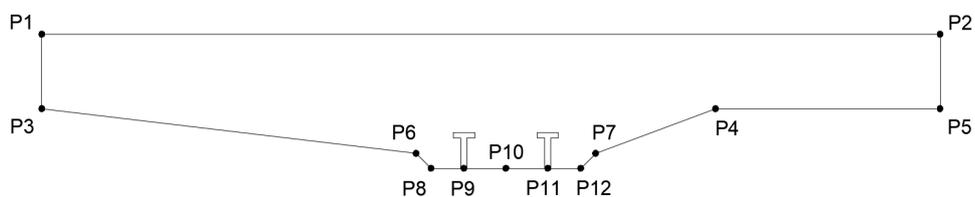


Figura 3.5: Esquema representativo da definição das coordenadas.

No caso de as coordenadas da laje de betão não serem introduzidas corretamente, será emitida uma mensagem de erro para informar dessa situação (ver Figura 3.6).

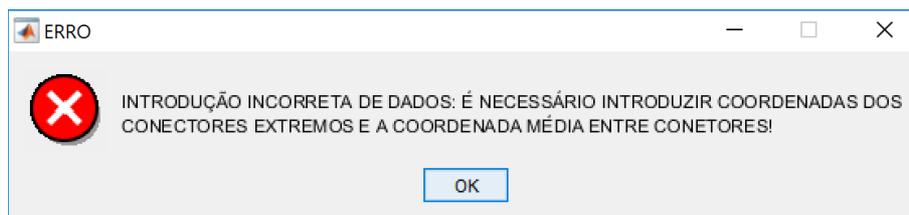


Figura 3.6: Mensagem de informação do erro relativo às coordenadas.

Quando não se pretender calcular a largura efetiva do banzo de betão, é importante definir a coordenada da laje de betão coincidente com o eixo de simetria do perfil metálico. A Figura 3.7 exemplifica essa situação.

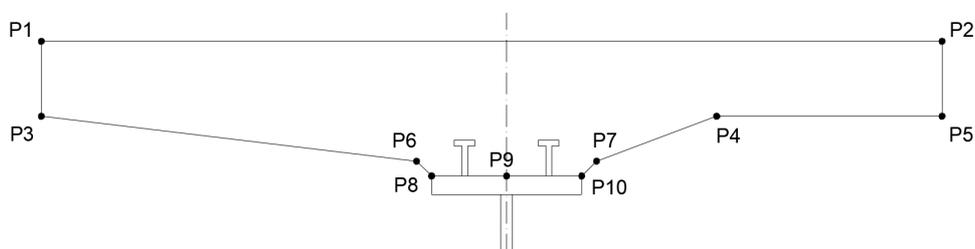


Figura 3.7: Esquema representativo da definição das coordenadas.

Se as coordenadas da laje de betão não forem introduzidas corretamente, será apresentada uma mensagem de erro correspondente (ver Figura 3.8).

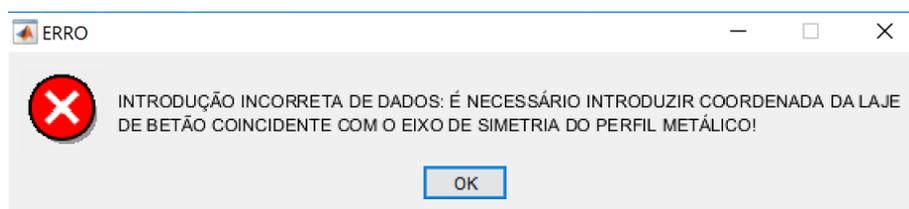


Figura 3.8: Mensagem de informação do erro.

- `inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr` – definição da matriz das coordenadas para a divisão da laje de betão em camadas. A ferramenta disponibiliza uma função denominada *lerccord* (ver Anexo 2), que ao definir a ordenação das coordenadas da laje de betão, usa os valores da coluna do  $y$ , que representa as alturas da laje de betão, e associa a diferença de alturas como sendo camadas. Cada camada pode ser subdividida em camadas mais pequenas, de forma que seja determinada com maior precisão a posição do eixo neutro, através do elemento  $z$  que define o número de divisões. A camada é delimitada superiormente pelo

elemento  $y_1$ , e o seu limite inferior é estabelecido pelo elemento  $y_2$ . Há que ter em atenção que as camadas só podem ser subdivididas até a um limite máximo de 10 subcamadas. A definição do limite de camadas corresponde à soma de todas as camadas subdivididas que compõem a laje de betão. Caso se opte por não subdividir a camada é necessário definir essa camada com o algarismo 1 no elemento  $z$ , para garantir o correto funcionamento da ferramenta.

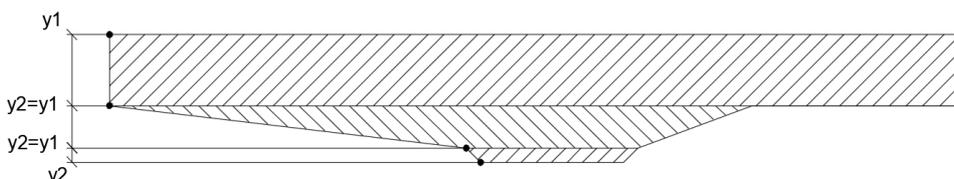


Figura 3.9: Acesso ao navegador de diretorias.

No caso em que o somatório dos elementos da coluna  $z$  é superior a 10 camadas, será emitida uma mensagem de erro.

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa o número máximo de divisões de camadas na laje de betão (ver Figura 3.10).

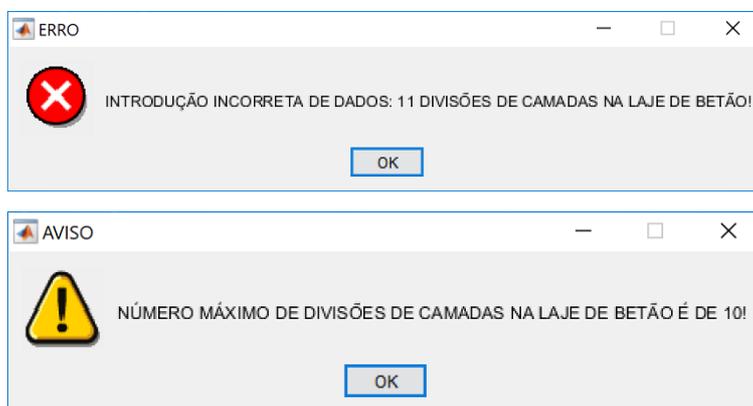


Figura 3.10: Mensagem de informação do erro e informação sobre o número máximo de divisões de camadas na laje de betão.

- `inputdata.section.steelProfile.coord_bs` – definição da matriz das coordenadas do banzo superior do perfil metálico. A criação das coordenadas consiste na especificação das posições  $x$  e  $y$ , em que  $x$  define a medida na horizontal e  $y$  define a medida na vertical. As coordenadas devem ser definidas avançando do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente.

- `inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs` – definição da matriz das coordenadas para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. A ferramenta disponibiliza uma função *lerccord* (ver Anexo 2), que usa os valores da coluna do *y* para definir a ordenação das coordenadas do banzo superior, e associa a diferença de alturas como sendo camadas. Cada camada pode ser subdividida em camadas mais pequenas, de forma que seja determinada com a posição do eixo neutro maior precisão, através do elemento *z* que define o número de divisões. A camada é delimitada superiormente pelo elemento *y1*, e o seu limite inferior é estabelecido pelo elemento *y2*. Há que ter em atenção que as camadas só podem ser subdivididas até a um limite máximo de 5 camadas. A definição do limite de camadas corresponde à soma de todas as camadas subdivididas que compõem o banzo superior. Caso se opte por não subdividir a camada é necessário definir essa camada com o algarismo 1 no elemento *z*, para o correto funcionamento da ferramenta.

No caso de o somatório dos elementos da coluna do *z*, ser superior a 5 camadas, será emitida uma mensagem de erro.

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa sobre o número máximo de divisões de camadas no banzo superior do perfil metálico (ver Figura 3.11).

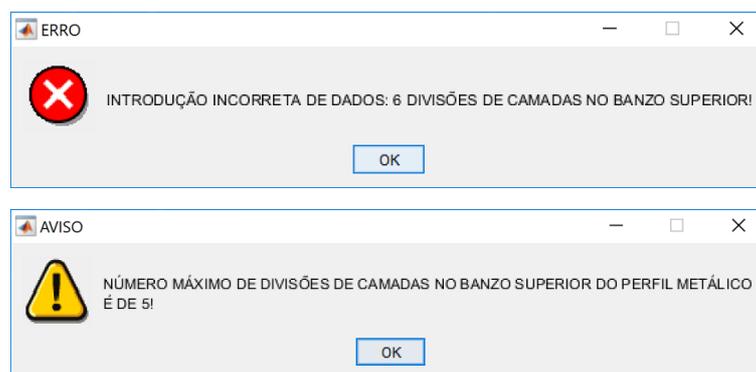


Figura 3.11: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de divisões de camadas no banzo superior do perfil metálico.

- `inputdata.section.steelProfile.coord_hw` – definição da matriz das coordenadas da alma do perfil metálico. A criação das coordenadas consiste na especificação dos elementos *x* e *y*, em que *x* define a posição na direção horizontal e *y* define a posição na direção vertical. As coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente.

- `inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw` – definição da matriz das coordenadas para a divisão da alma do perfil metálico em camadas. A ferramenta disponibiliza uma função *lerccord* (ver Anexo 2), que ao definir a ordenação das coordenadas da alma, usa os valores da coluna do *y*, que representa as alturas da alma, e associa a diferença de alturas como sendo camadas. Cada camada pode ser subdividida em camadas mais pequenas, de forma que seja determinada com maior precisão a posição do eixo neutro, através do elemento *z* que define o número de divisões. A camada é delimitada superiormente pelo elemento *y1*, e o seu limite inferior é estabelecido pelo elemento *y2*. Há que ter em atenção que as camadas só podem ser subdivididas até a um limite de 5. A definição do limite de camadas corresponde à soma de todas as camadas subdivididas que compõem a alma. Caso se opte por não subdividir a camada é necessário definir essa camada com o algarismo 1 no elemento *z*, para o correto funcionamento da ferramenta.

No caso de o somatório dos elementos da coluna do *z*, ser superior a 5 camadas, será emitida uma mensagem de erro.

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa o número máximo de divisões de camadas na alma do perfil metálico (ver Figura 3.12).

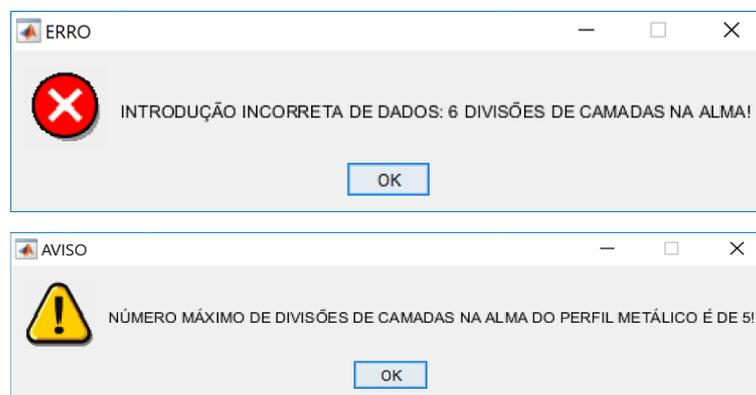


Figura 3.12: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de divisões de camadas na alma do perfil metálico.

- `inputdata.section.steelProfile.coord_bi` – definição da matriz das coordenadas do banzo inferior do perfil metálico. A criação das coordenadas consiste na especificação dos elementos *x* e *y*, em que *x* define a posição medida na direção horizontal e *y* define a posição medida na direção vertical. As coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente.

- `inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi` – definição da matriz das coordenadas para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. A ferramenta disponibiliza uma função *lerccord* (ver Anexo 2), que ao definir a ordenação das coordenadas do banzo inferior, usa os valores da coluna do *y*, que representam as alturas do banzo superior, e associa a diferença de alturas como sendo camadas. Cada camada pode ser subdividida em camadas mais pequenas, de forma que seja determinada com maior precisão a posição do eixo neutro, através do elemento *z* que define o número de divisões. A camada é delimitada superiormente pelo elemento *y1*, e o seu limite inferior é estabelecido pelo elemento *y2*. Há que ter em atenção que as camadas só podem ser subdivididas até a um limite máximo de 5 camadas. A definição do limite de camadas corresponde à soma de todas as camadas subdivididas que compõem o banzo inferior. Caso opte por não subdividir a camada é necessário definir essa camada com o algarismo 1 no elemento *z*, para o correto funcionamento da ferramenta.

No caso de o somatório dos elementos da coluna do *z*, ser superior a 5 camadas, será emitida uma mensagem de erro.

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa o número máximo de divisões de camadas no banzo inferior do perfil metálico (ver Figura 3.13).

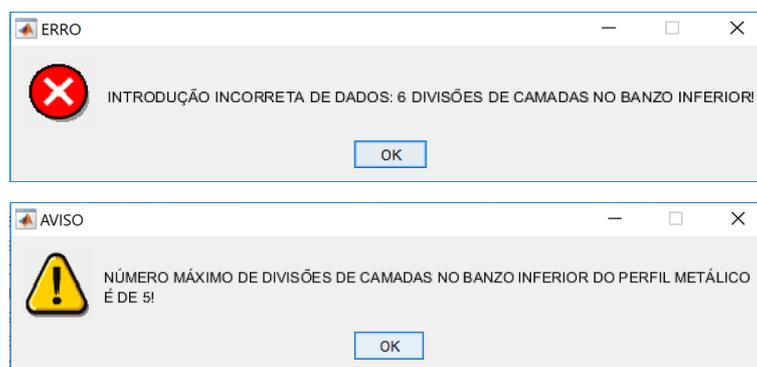


Figura 3.13: Mensagem de informação do erro e aviso informando o número máximo de divisões de camadas no banzo inferior do perfil metálico.

- `inputdata.section.steelProfile.Asl` – definição da variável da área total de todos os reforços longitudinais de uma placa reforçada para seções em caixão e duplo-caixão.
- `inputdata.section.steel.Reinf.dim` – definição da matriz das coordenadas para as armaduras longitudinais da laje de betão. As armaduras longitudinais são

definidas em camadas, até a um máximo de 25 camadas. No caso de se optar por calcular a largura efetiva do banzo de betão, a ferramenta considera automaticamente a armadura localizada no banzo de betão, ao longo da largura efetiva. Na primeira coluna da matriz é definida a distância  $h_{si}$  do centro de gravidade de cada camada de armadura longitudinal à face superior do banzo superior do perfil de aço e na segunda coluna são indicadas as áreas das armaduras longitudinais,  $A_{si}$ . A Figura 3.14 exemplifica essa situação.

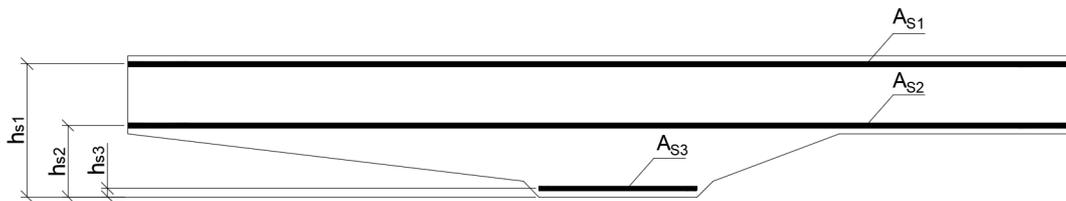


Figura 3.14:Esquema representativo da definição das armaduras longitudinais em camadas.

- `inputdata.section.GraphicCoord` – definição da variável para a verificação da introdução das coordenadas da laje de betão, banzo superior, alma e banzo inferior do perfil metálico, através da representação gráfica das coordenadas, como se ilustra na Figura 3.15. É importante referir que as coordenadas dos elementos da secção transversal são introduzidas individualmente, mas na representação gráfica para a verificação global das coordenadas da secção transversal global é utilizado um novo referencial. Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos 0 ou 1. O algarismo 0 corresponde à não verificação gráfica das coordenadas e o algarismo 1 permite a verificação gráfica das coordenadas pela análise gráfica.

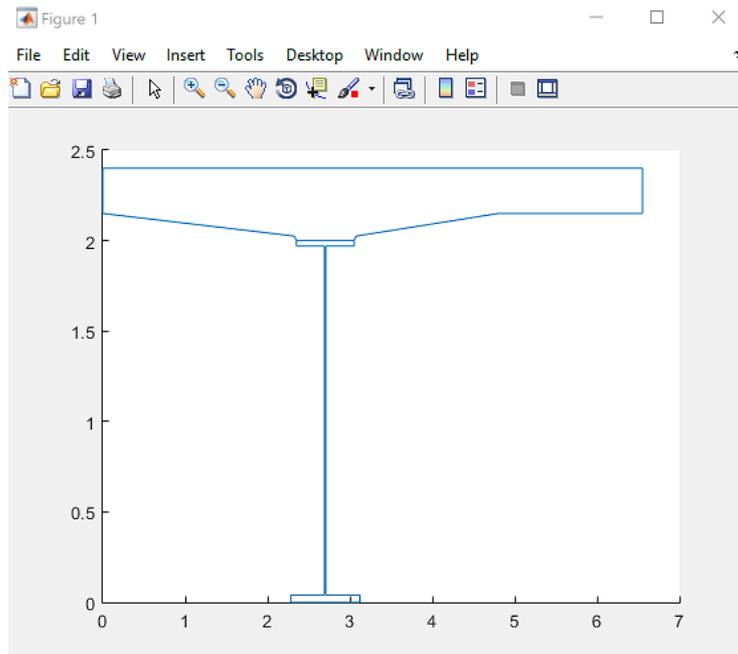


Figura 3.15: Verificação gráfica da geometria da secção transversal.

- `inputdata.section.effortAxial` – definição da variável do esforço axial  $N_{Ed}$ , para a verificação da capacidade resistente de secções transversais de classe 4. A ferramenta tem programada a aplicação do “método aproximado” para situações de flexão composta em torno do eixo de maior inércia.
- `inputdata.section.effWebFlag` – definição da variável para o cálculo da largura efetiva do banzo de betão. Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos 0 ou 1. O algarismo 0 não efetua o cálculo e o algarismo 1 efetua o cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

### 3.4.2 Ficheiro de entrada de dados do caso de estudo

Nesta secção, será abordada a definição das variáveis que formam o ficheiro de input de dados `inputFile_PS.m`. Este ficheiro gere todos os dados, efetuando chamadas do(s) ficheiro(s) de dados das secções transversais descritos no tópico anterior.

- `inputdata.bridgeName` – definição da variável para identificação do nome da ponte em estudo.
- `inputdata.inputfilenames` - definição da variável para a introdução do(s) nome(s) do(s) ficheiro(s) de entrada de dados da secção transversal em estudo, tal como descrito em Ficheiro de entrada de dados da secção transversal. A ferramenta desenvolvida tem a particularidade de calcular várias secções em simultâneo, bastando inserir por ordem de cálculo, os nomes dos ficheiros de entrada de dados

da secção transversal na presente variável. A ferramenta desenvolvida é ilimitada em relação ao número dos ficheiros de dados da secção transversal. No Anexo 2, são exemplificadas várias situações de introdução de ficheiros de dados.

- `inputdata.inputfilecharge` - definição da variável para a introdução do ficheiro de dados relativo ao cálculo da carga de colapso da ponte em estudo. No capítulo 4 será abordada detalhadamente a estrutura deste ficheiro de input.

### 3.5 Largura efetiva do banzo

A metodologia prevista na EN 1994-1-1 para o cálculo da largura efetiva do banzo de betão foi programada nesta ferramenta. Para as secções em caixão, a largura efetiva do banzo não ocorre exclusivamente na laje de betão, mas também no banzo inferior da viga metálica, quando a secção está sujeita a momento fletor negativo (ver Figura 3.16).

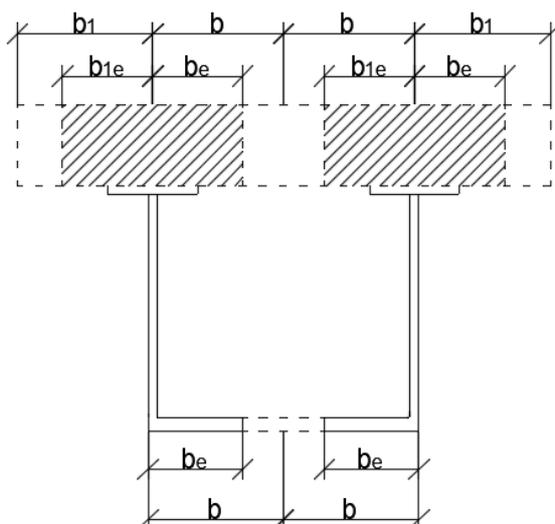


Figura 3.16: Esquema representativo da largura efetiva do banzo inferior de uma secção em caixão.

Para a determinação do shear lag em elementos de aço foi implementada na ferramenta o procedimento de cálculo de acordo com a cláusula 5.2.1(5) da NP EN 1993-1-1 que explicita que os efeitos dos fenómenos de shear lag devem ser considerados de acordo com a NP EN 1993-1-5 se influenciarem significativamente a análise global.

Para o dimensionamento dos elementos, a cláusula 3.1(1) da NP EN 1993-1-5 preconiza que os efeitos de shear lag podem ser desprezados desde que a seguinte condição se verifique:

$$b_0 < \frac{L_e}{50} \quad (3.1)$$

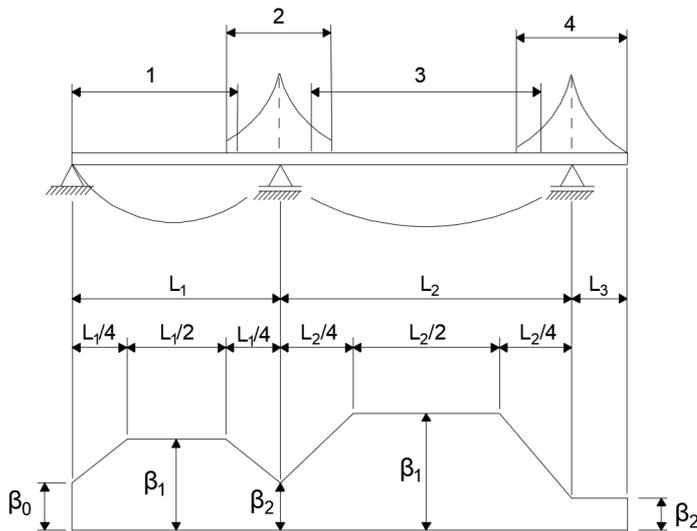
onde  $b_0$  representa a largura de um banzo em consola ou metade da largura de um banzo interior e  $L_e$  o comprimento equivalente do vão;

Quando o limite acima definido de  $b_0$  é excedido, os efeitos de shear lag nos banzos devem ser considerados através de larguras efetivas calculadas de acordo com a cláusula 3.2.1 da NP EN 1993-1-5 para os estados limites de serviço.

Em regime elástico, uma dada largura efetiva é dada por (cláusula 3.2.1(1)):

$$b_{eff} = \beta b_0 \quad (3.2)$$

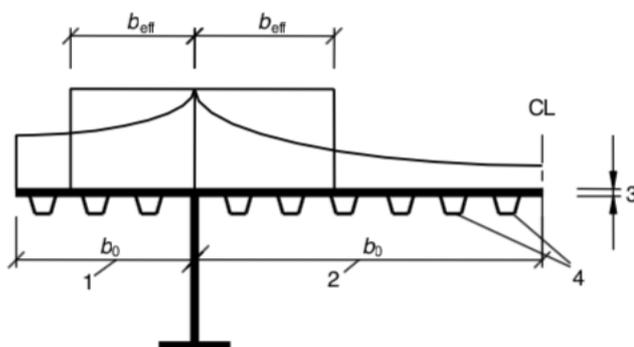
Em que o coeficiente efetivo  $\beta$  é fornecido na Tabela 3.1.



**Legenda:**

- 1-  $L_e = 0,85L_1$  para  $\beta_1$
- 2-  $L_e = 0,25(L_1 + L_2)$  para  $\beta_2$
- 3-  $L_e = 0,70L_2$  para  $\beta_1$
- 4-  $L_e = 2L_3$  para  $\beta_2$

Figura 3.17: Comprimento efetivo  $L_e$  de uma viga contínua e distribuições das larguras efetivas (adaptado da figura 3.1, EN 1993-1-5).



**Legenda:**

- 1- para um banzo em consola
- 2- para um banzo interior
- 3- espessura da chapa  $t$
- 4- reforços com área total

$$A_{st} = \sum A_{sli}$$

Figura 3.18: Notações para o shear lag (adaptada da figura 3.2, EN 1993-1-5).

Tabela 3.1: Coeficiente de largura efetiva  $\beta$  (adaptado do quadro 3.1, EN 1993-1-5)

K	Zona de verificação	Valor de $\beta$
$k \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < k \leq 0,70$	Momentos positivos	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4k^2}$
	Momentos negativos	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left( k - \frac{1}{2500k} \right) + 1,6k^2}$
$k > 0,70$	Momentos positivos	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9k}$
	Momentos negativos	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6k}$
Todos os valores de k	Apoio de extremidade	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/k)\beta_1$ , mas $\beta_0 < \beta_1$
Todos os valores de k	Consola	$\beta = \beta_2$ no apoio e na extremidade livre
$k = \alpha_0/b_0$ com $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}}$		

onde  $A_{sl}$  é a área de todos os reforços longitudinais existentes na largura  $b_0$  e os outros símbolos são definidos nas Figuras 3.17 e 3.18

### 3.6 Determinação da posição do eixo neutro

Neste tópico descrevem-se as metodologias de cálculo usadas na ferramenta para a determinação da posição do eixo neutro plástico e elástico. A EN 1994-1-1 não disponibiliza expressões para a determinação do momento fletor resistente plástico. Porém, nas secções seguintes, são apresentadas expressões para a situação em que a secção do perfil de aço é duplamente simétrica. Para secções só com um eixo de simetria, os princípios para a determinação das expressões são iguais, bastando tal adaptá-las a essa situação.

#### 3.6.1 Eixo neutro plástico

Para a determinação da posição do eixo neutro plástico,  $LN_{pl}$ , foi implementada na ferramenta uma metodologia de cálculo que consiste na divisão da secção transversal em blocos e impondo o equilíbrio entre as forças máximas de tração e compressão associadas às diversas zonas da secção. Em seguida, descrevem-se as expressões que exprimem as forças máximas de tração e compressão associadas às diversas zonas da secção.

- Força máxima de compressão no banzo de betão,  $R_c$ :

$$R_c = h_c b_{eff} 0,85 f_{cd} \quad (3.3)$$

- Força máxima de tração na secção de aço,  $R_a$ :

$$R_a = A f_{yd} \quad (3.4)$$

- Força máxima no banzo do perfil metálico,  $R_f$ :

$$R_f = b t_f f_{yd} \quad (3.5)$$

- Força máxima na alma do perfil de aço,  $R_w$ :

$$R_w = R_a - 2R_f \quad (3.6)$$

- Força máxima de tração na armadura longitudinal,  $R_s$ :

$$R_s = A_s f_{sd} \quad (3.7)$$

Na Figura 3.19 esquematizam-se as diversas opções da posição do eixo neutro plástico,  $LN_{pl}$ , programadas na ferramenta para a situação de momento fletor positivo e negativo.

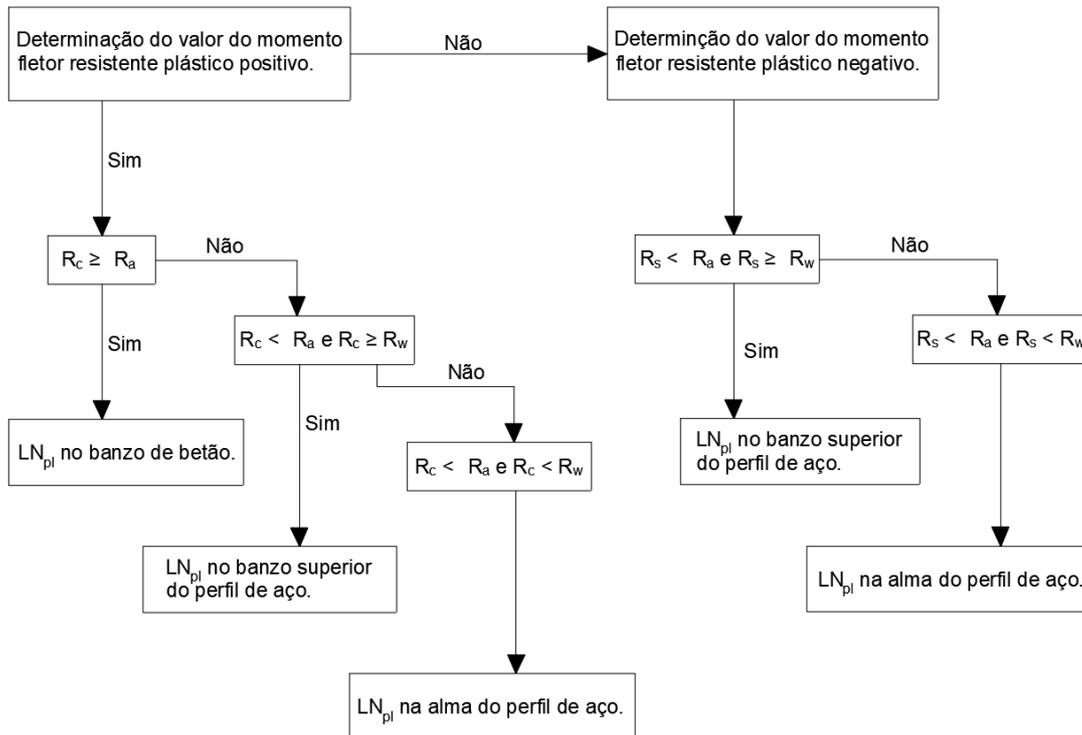


Figura 3.19: Esquema das diversas opções da posição do eixo neutro plástico.

### 3.6.2 Eixo neutro elástico

Para as situações de momento fletor positivo e negativo foi implementado na ferramenta um procedimento de cálculo para quantificar a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ . Considerando que a secção transversal da viga mista apresenta um eixo de simetria que coincide com o eixo de solicitação. No caso de momento fletor positivo utiliza-se o conceito de secção homogeneizada, já no caso de momento fletor negativo não é necessário considerar a secção homogeneizada, visto tratar-se de uma secção de um único material.

#### 3.6.2.1 Momento fletor positivo

Neste caso, a ferramenta permite duas situações para a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do perfil de aço e na zona do banzo de betão, a que correspondem a diferentes expressões.

Para a situação da posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do perfil de aço todo o betão está à compressão, e o eixo neutro elástico passa pelo centro de gravidade da secção homogeneizada, pode ser obtida a partir da resolução da expressão (3.8)

$$z_e = \frac{nAd + b_{eff} \frac{h_c^2}{2}}{nA + b_{eff} h_c} \quad (3.8)$$

Na Figura 3.20 esquematiza-se a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do perfil metálico sob a ação de momento fletor positivo.

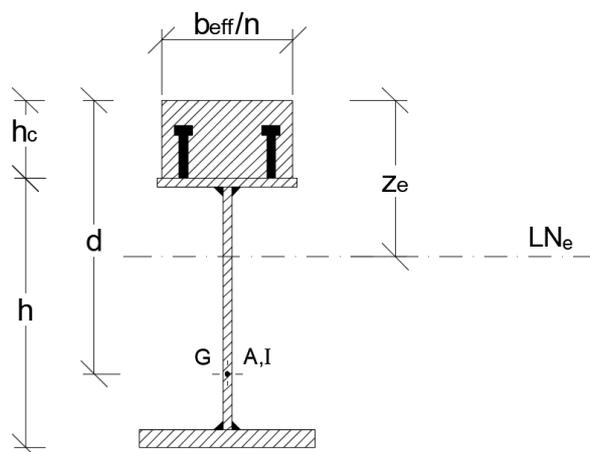


Figura 3.20: Esquema representativo do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do perfil metálico (adaptado de Calado e Santos, 2013).

Para o caso da posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do banzo de betão, sendo necessário desprezar o betão à tração, e o eixo neutro elástico passa pelo centro de gravidade da secção homogeneizada, pode ser obtida a partir da resolução da expressão (3.9).

$$z_e = \frac{nA}{b_{eff}} \left( \sqrt{1 + \frac{2b_{eff}d}{nA}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Na Figura 3.21 esquematiza-se a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do banzo de betão sob a ação de momento fletor positivo.

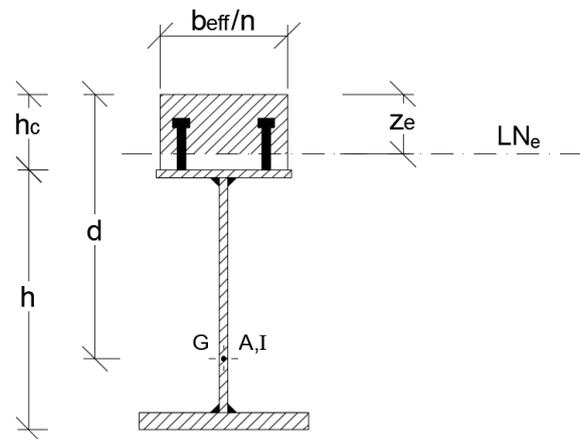


Figura 3.21: Esquema representativo do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do banzo de betão (adaptado de Calado e Santos, 2013).

### 3.6.2.2 Momento fletor negativo

A determinação da posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , para a situação de momento fletor negativo, pode ser obtida através da expressão (3.10)

$$z_e = \frac{Ad + A_s(h_c - h_s)}{A + A_s} \quad (3.10)$$

Na Figura 3.22 esquematiza-se a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , da viga mista sob a ação de momento fletor negativo.

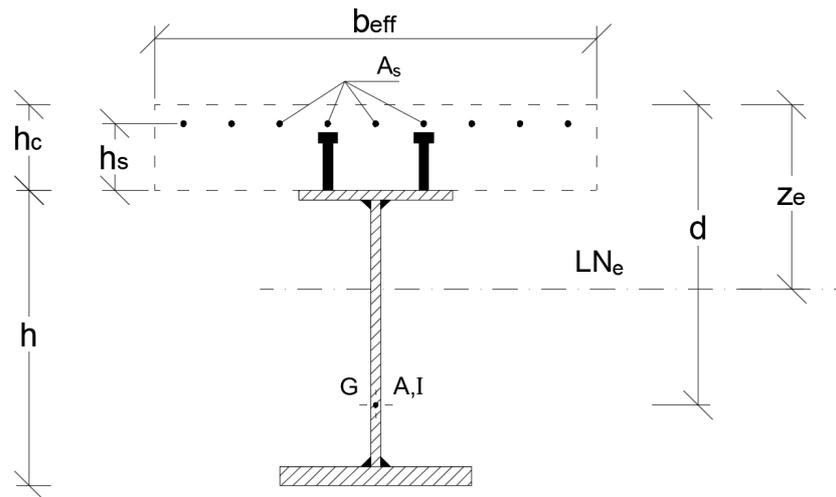


Figura 3.22: Esquema representativo do eixo neutro elástico,  $LNe$ , (adaptado de Calado e Santos, 2013).

### 3.7 Classificação da secção transversal

Neste item, descreve-se o procedimento implementado para a classificação da secção transversal. Na Figura 3.23, esquematiza-se a metodologia programada na ferramenta e prevista na NP EN 1993-1-1 e na NP EN 1994-1-1 para o cálculo de secções transversais mistas.

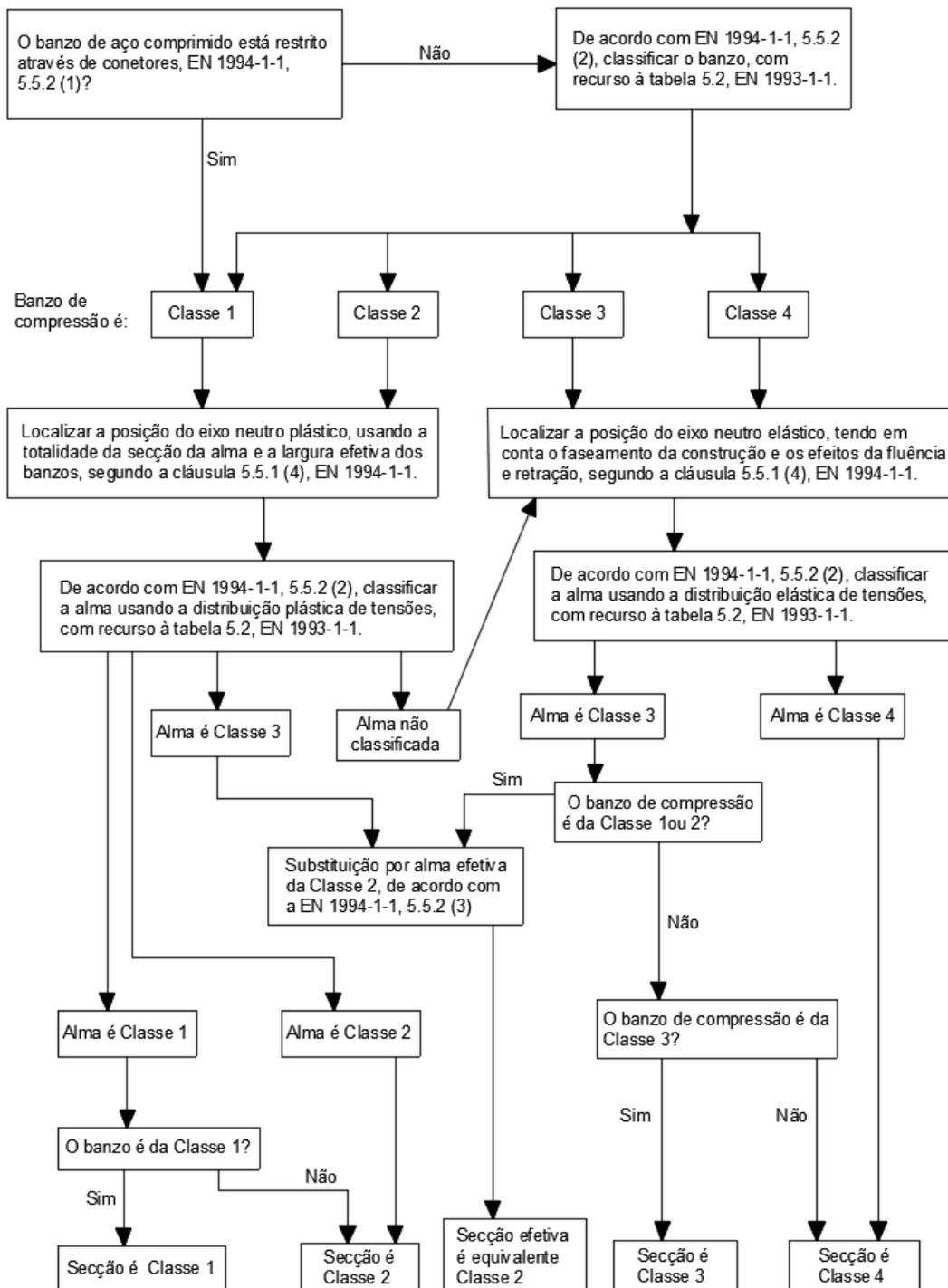


Figura 3.23: Esquema das diversas opções da classificação da secção transversal (adaptado da figura 5.12, EN 1994-2, 5.5).

### 3.8 Determinação da secção efetiva para uma secção de classe 4

Para a determinação da secção efetiva para uma secção de classe 4 foi implementado na ferramenta o procedimento de cálculo de acordo com a NP EN 1993-1-5, a área efetiva de uma secção, ou de uma parte comprimida de uma secção, que é o que normalmente acontece nas pontes mistas, pois os banzos são usualmente dimensionados para serem

totalmente efetivos, sendo alma o único elemento que poderá não ser totalmente efetivo, é determinada da seguinte forma,

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (3.11)$$

Cálculo do fator de redução  $\rho$  de cada elemento através das seguintes expressões:

- Elementos comprimidos internos:

$$\rho = 1,0 \text{ para } \bar{\lambda}_p = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (3.12)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ para } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055\psi} \quad (3.13)$$

- Elementos comprimidos em consola:

$$\rho = 1,0 \text{ para } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \quad (3.14)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ para } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (3.15)$$

Se  $\lambda_p$  não verificar as condições anteriores, o valor de  $\rho$  é unitário e não existe redução ( $b_{eff} = b$ ).

Para a determinação do valor do fator  $\psi$  para cada uma das paredes da secção, com base no diagrama de tensões atuantes. O fator é dado por  $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ , onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões atuantes nas extremidades das paredes. Claro que numa secção submetida a compressão pura, tem-se  $\psi = 1$ . Quando a secção tem elementos paralelos e perpendiculares ao eixo de flexão, devem-se reduzir em primeiro lugar os elementos paralelos ao eixo e recalculer a distribuição de tensões atuantes e, conseqüentemente, o fator  $\psi$ .

Cálculo da esbelteza normalizada  $\lambda_p$  de cada elemento através da expressão,

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (3.16)$$

onde  $\bar{b}$  e  $t$  são a largura e espessura do elemento comprimido,  $\epsilon$  o fator que depende da tensão de cedência do aço  $f_y$  e  $k_\sigma$  é o fator de encurvadura do elemento.

Para a determinação do fator de encurvadura  $k_\sigma$  para cada uma das paredes da secção, depende do fator  $\psi$  e do tipo de elemento (interior ou saliente). As tabelas 3.2 e 3.3 permitem o cálculo do fator de encurvadura da parede  $k_\sigma$ .

Tabela 3.2: Elementos comprimidos interiores (quadro 4.1, EN 1993-1-5).

Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efetiva $b_{eff}$		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6b_{eff}$		
$\psi = \sigma_1/\sigma_2$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coeficiente de encurvadura $k_\sigma$	0,4	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1-\psi)^2$

Tabela 3.3: Elementos comprimidos em consola (salientes) (quadro 4.2, EN 1993-1-5).

Distribuição de tensões (compressão positiva)		Largura efetiva $b_{eff}$			
		$1 > \psi \geq 0$ : $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$ : $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_1 / \sigma_2$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Coefficiente de encurvadura $k_{\sigma}$	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$ : $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$ : $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_1 / \sigma_2$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficiente de encurvadura $k_{\sigma}$	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

### 3.9 Cálculo do momento fletor resistente

Nesta secção, descreve-se a metodologia adotada na ferramenta para o cálculo do momento fletor resistente plástico e elástico.

#### 3.9.1 Momento fletor resistente plástico

Para a determinação do momento fletor resistente plástico,  $M_{pl,Rd}$ , foi adotado o procedimento de cálculo que divide a secção transversal em blocos onde o valor da tensão máxima é constante. Após o conhecimento da posição do eixo neutro plástico, multiplica-se as forças resultantes em cada bloco pelos respetivos braços. Na Figura 3.24, ilustram-se as forças internas na secção mista e os respetivos braços. O somatório dos momentos causados pelas forças em relação à posição do eixo neutro, permite obter o valor do momento fletor resistente plástico,  $M_{pl,Rd}$ .

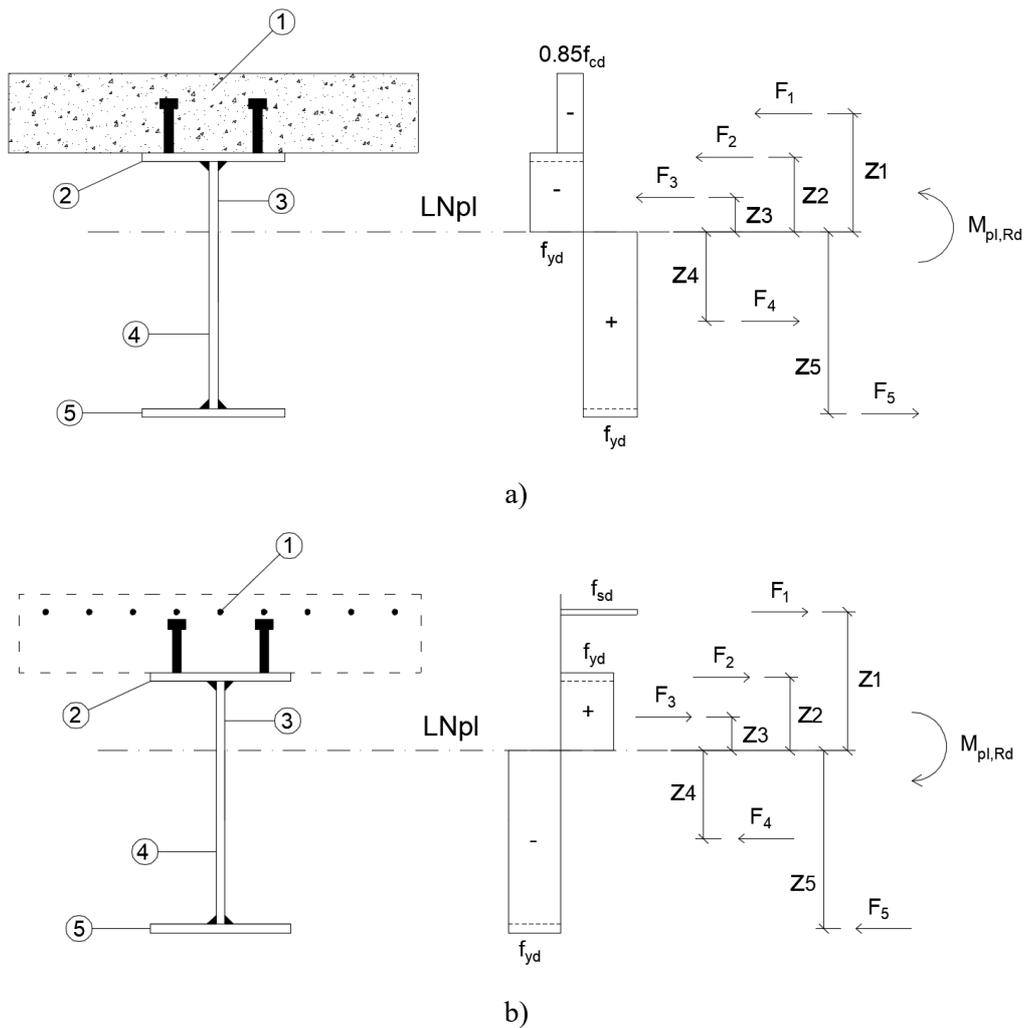


Figura 3.24: Esquema representativo do método de cálculo: a) momento fletor resistente plástico positivo; b) momento fletor resistente plástico negativo (adaptado de Calado e Santos, 2013).

### 3.9.2 Momento fletor resistente elástico

Para a situação de momento fletor elástico  $M_{el,Rd}$ , são apresentadas expressões que permitem calcular as tensões nos diversos materiais para a situação de momento fletor positivo e negativo. Utiliza-se o conceito de secção homogeneizada transformando-se a secção transversal da viga mista numa secção fictícia de aço.

#### 3.9.2.1 Momento fletor positivo

Para a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , na zona do perfil de aço e na zona do banzo de betão, o valor do momento fletor resistente elástico, pode ser obtido a partir das equações (3.17) e (3.18).

- Tensão máxima de tração no perfil de aço:

$$\sigma_{a1} = \frac{M}{I_{eq}} (h_c + h - z_e) \leq f_{yd} \quad (3.17)$$

- Tensão máxima de compressão no betão:

$$\sigma_c = \frac{M}{I_{eq} n} z_e \leq f_{cd} \quad (3.18)$$

Na Figura 3.25 define-se a geometria transversal da viga mista em sob a ação de momento fletor positivo.

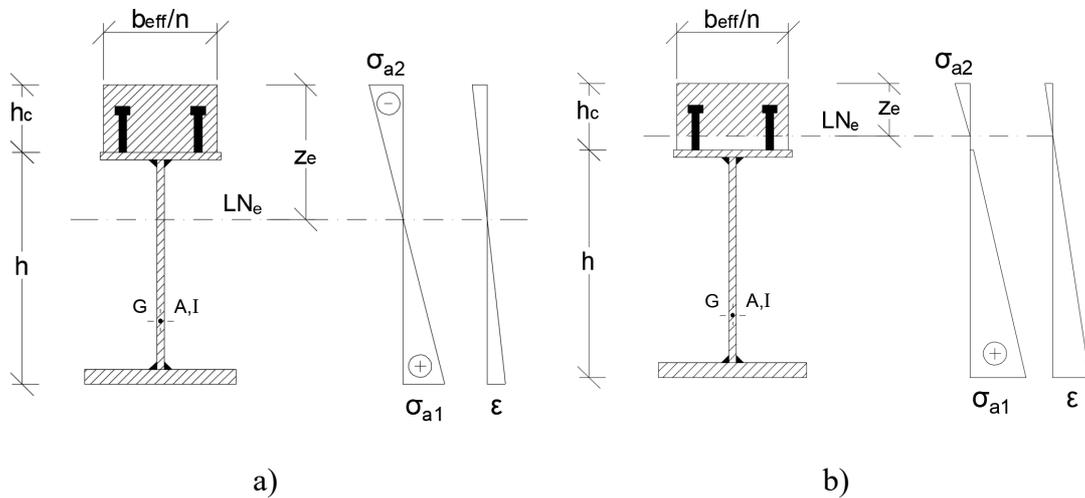


Figura 3.25: Definição da geometria da secção transversal da viga mista para a posição do eixo neutro elástico, LNe: a) na zona do perfil metálico; b) na zona do banzo de betão (adaptado de Calado e Santos, 2013).

### 3.9.2.2 Momento fletor negativo

O momento fletor negativo pode ser obtido a partir das expressões seguintes. No cálculo do momento de inércia da secção, não se considera o momento de inércia das armaduras longitudinais em relação ao seu centro de gravidade.

- Tensão máxima de compressão no perfil de aço:

$$\sigma_{a1} = \frac{M}{I_{eq}} (h_c + h - z_e) \leq f_{yd} \quad (3.19)$$

- Tensão máxima de tração no perfil de aço:

$$\sigma_{a2} = \frac{M}{I_{eq}} (h_c - z_e) \leq f_{yd} \quad (3.20)$$

- Tensão máxima de tração nas armaduras:

$$\sigma_{s1} = \frac{M}{I_{eq}} (z_e - h_c + h_s) \leq f_{sd} \quad (3.21)$$

Na Figura 3.26 define-se a geometria transversal da viga mista sob a ação de momento fletor negativo.

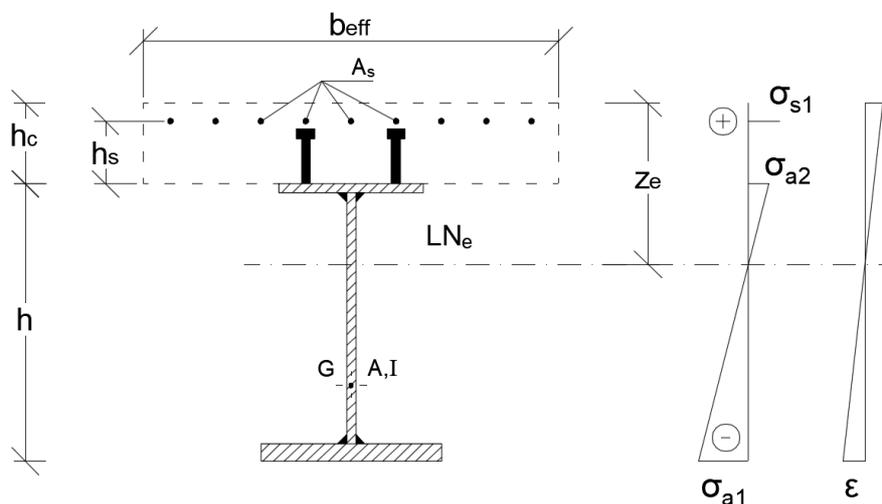


Figura 3.26: Definição da geometria da secção transversal da viga mista sob a ação de momento fletor negativo (adaptado de Calado e Santos, 2013).

### 3.10 Funcionamento da ferramenta

Para se usar adequadamente a ferramenta, é necessário saber como manipular os vários ficheiros de trabalho.

Após iniciada a sessão do *Matlab*, deve-se alterar a diretoria de trabalho para o local onde se encontra a ferramenta desenvolvida. Qualquer ficheiro que se pretenda executar deverá residir na diretoria atual ou, então, numa diretoria existente no caminho do *Matlab*. Será possível verificar e alterar o caminho da sessão acedendo, por exemplo, ao menu *Home/Set Path*. Por omissão, o caminho do *Matlab* inclui todos os ficheiros que acompanham o *Matlab* e as *toolboxes*.

A diretoria corrente no ambiente de trabalho pode ser alterada através do navegador do sistema de ficheiros a que o ambiente de trabalho permite aceder, tal como se ilustra na Figura 3.27.

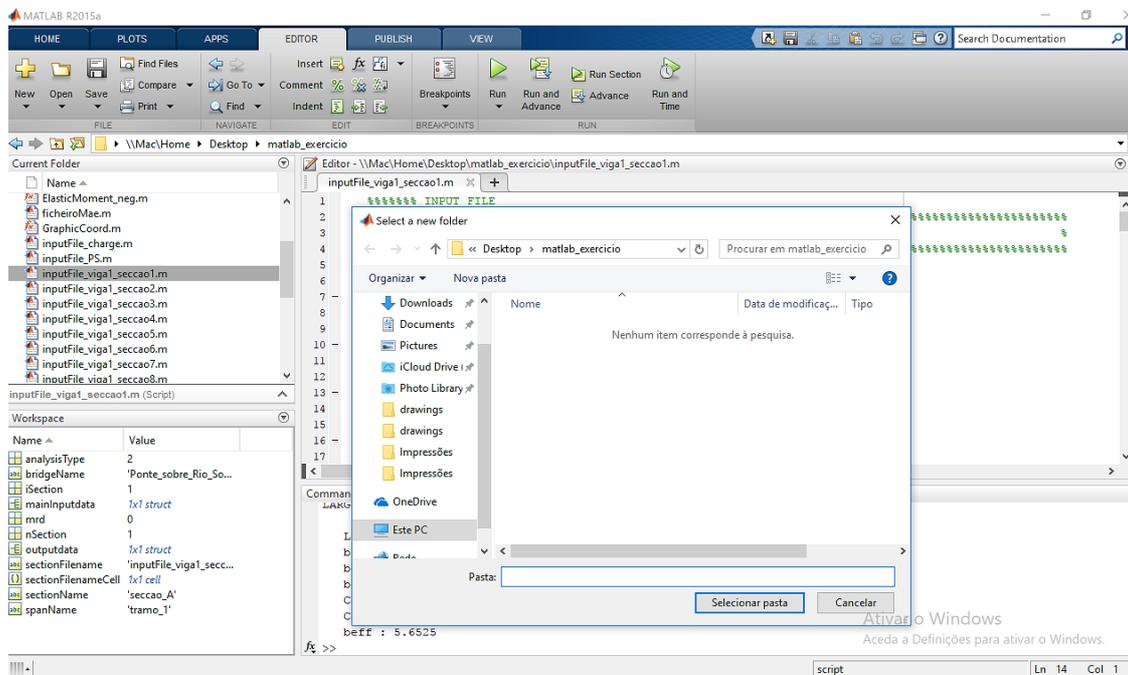


Figura 3.27: Navegador para a seleção da diretoria corrente.

O acesso a este navegador é realizado clicando no ícone *Browse For Folder*, ilustrado na Figura 3.28.

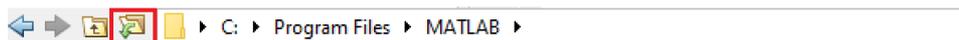


Figura 3.28: Acesso ao navegador de diretorias.

Outro método para a alteração da diretoria corrente consiste na invocação dos comandos *path* ou *cd*. O comando *path* apresenta a sintaxe *path (path, 'caminho do diretório')*, enquanto o comando *cd* apresenta a sintaxe *cd <caminho do diretório>*. A ferramenta tem programado o comando *cd* que permite alterar a diretoria, no ficheiro *mainCalculoVigasMistas.m*.

Inicialização da ferramenta a partir da janela de comandos (Command Window) do Matlab escrevendo *mainCalculoVigasMistas*, sem extensão *'m'*. É nesta janela que o utilizador pode introduzir variáveis, comandos e funções Matlab, bem como executar ficheiros-M. Note-se que, quando a janela está preparada para receber comandos, apresenta o símbolo *>>*. De modo a facilitar a introdução de comandos previamente

utilizados o *Matlab* proporciona ao utilizador, através das teclas de direção do teclado, uma fácil navegação pelo histórico dos comandos executados. Através da tecla ↑, é possível aceder ao último comando utilizado, devendo repetir a operação uma outra vez. Quando pretender revistar o historial de comandos na ordem inversa, deverá recorrer à tecla ↓.

### 3.11 Validação da ferramenta desenvolvida

De forma a validar os resultados obtidos pela ferramenta, escolheu-se realizar uma comparação entre os resultados obtidos pela mesma e os resultados apresentados em exemplos de cálculo apresentados em Calado *et al.* (2013).

#### 3.11.1 Exemplo 1

Pretende determinar-se o valor do momento fletor resistente plástico positivo,  $M_{Rd}$ , de uma secção transversal de uma viga mista, constituída por um banzo de betão e um perfil monossimétrico de aço, com as dimensões definidas na Figura 3.29. As propriedades dos materiais usados são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades dos materiais usados no Exemplo 1.

Material	Aço estrutural	Betão
Classe	S420	C30/37
$f_{yd}$ (MPa)	420	-
$f_{cd}$ (MPa)	-	20

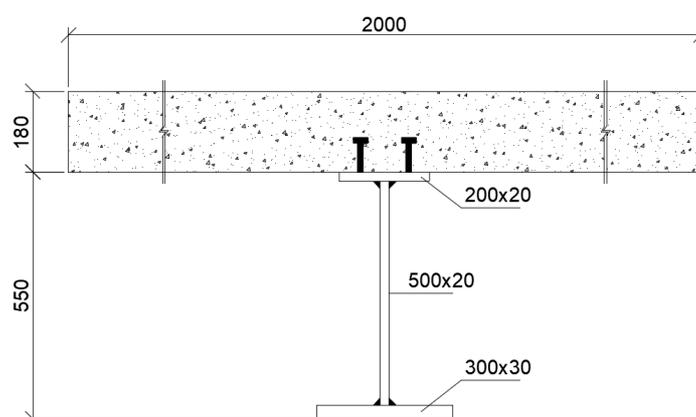


Figura 3.29: Dimensões da secção transversal em mm, do Exemplo 1 (exemplo 5.6 em Calado *et al.* (2013)).

Na Tabela 3.5 são apresentados os valores obtidos por Calado *et al.* (2013) e pela ferramenta.

Tabela 3.5: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab.

Parâmetro	Publicação	Ferramenta	Erro relativo (%)
$z_{pl}$ (m)	0,2107	0,2107	0,0
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	3685,9	3685,74	0,0045

A diferença de valores obtida com as duas metodologias é de 0,0045%, o que mostra a validade da ferramenta.

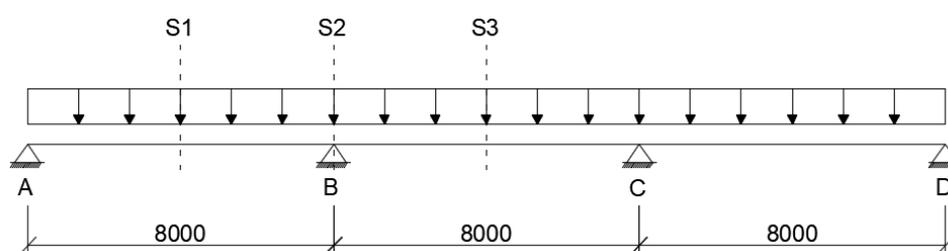
### 3.11.2 Exemplo 2

Pretende-se, neste exemplo, determinar o momento fletor resistente,  $M_{Rd}$ , de secções transversais mistas em diferentes zonas de uma viga contínua, identificadas na Figura 3.30. A Tabela 3.6 apresenta as propriedades dos materiais usados.

Tabela 3.6: Características dos materiais usados no Exemplo 2.

Material	Aço estrutural	Betão	Aço das armaduras
Classe	S420	C30/37	A500
$f_{yd}$ (MPa)	275	-	-
$f_{cd}$ (MPa)	-	16,7	-
$f_{sd}$ (MPa)	-	-	434,8
$E$ (GPa)	210	31	210

Na Figura 3.30 ilustra-se a viga mista contínua com a identificação das diferentes zonas de estudo e o pormenor da secção transversal.



a)

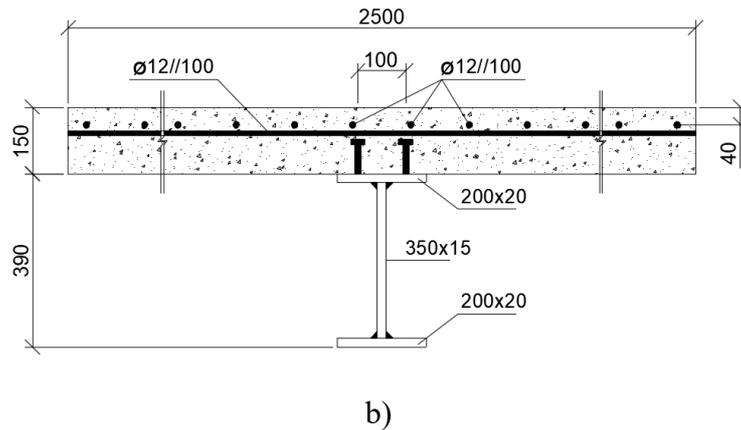


Figura 3.30: Definição das dimensões em mm (exemplo 6.2 em Calado et al. (2013)): a) viga mista contínua; b) pormenor da secção transversal.

Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados da classificação da secção transversal S1, obtidos em Calado *et al.* (2013) e na ferramenta.

Tabela 3.7: Comparação da classificação da secção transversal entre em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1.

Classificação	Publicação	Ferramenta
Banzo	Classe 1	Classe 1
Alma	Classe 1	Classe 1
Secção	Classe 1	Classe 1

Na Tabela 3.8 são apresentados os valores necessários à obtenção da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momento fletor resistente na zona S1 da viga.

Tabela 3.8: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1.

Parâmetro	Publicação	Ferramenta	Erro relativo (%)
$L_e$ (m)	6,80	6,80	0,0
$b_0$ (m)	0,10	0,10	0,0
$b_{ei}$ (m)	0,85	0,85	0,0
$b_{eff}$ (m)	1,80	1,80	0,0
$z_{pl}$ (m)	0,1429	0,1426	0,21
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	996,8	997,28	0,05

A maior diferença de valores obtida com as duas metodologias é de 0,21%, o que mostra a validade da ferramenta.

Na Tabela 3.9 são apresentados os resultados da classificação da secção transversal S2, obtidos em Calado *et al.* (2013) e na ferramenta.

Tabela 3.9: Comparação da classificação da secção transversal entre Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S2.

<b>Classificação</b>	<b>Publicação</b>	<b>Ferramenta</b>
Banzo	Classe 1	Classe 1
Alma	Classe 1	Classe 1
Secção	Classe 1	Classe 1

Na Tabela 3.10 são apresentados os valores necessários à obtenção da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momento fletor resistente na zona S2 da viga.

Tabela 3.10: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S2.

<b>Parâmetro</b>	<b>Publicação</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Erro relativo (%)</b>
$L_c$ (m)	4,00	4,00	0,0
$b_0$ (m)	0,10	0,10	0,0
$b_{ei}$ (m)	0,50	0,50	0,0
$b_{eff}$ (m)	1,10	1,10	0,0
$z_{pl}$ (m)	0,2795	0,2794	0,036
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	-680,5	-680,58	0,012

A maior diferença de valores obtida com as duas metodologias é de 0,036%, o que mostra a validade da ferramenta.

Na Tabela 3.11 são apresentados os resultados da classificação da secção transversal S3, obtidos em Calado *et al.* (2013) e na ferramenta.

Tabela 3.11: Comparação da classificação da secção transversal entre em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S3.

Classificação	Publicação	Ferramenta
Banzo	Classe 1	Classe 1
Alma	Classe 1	Classe 1
Secção	Classe 1	Classe 1

Na Tabela 3.12 são apresentados os valores necessários à obtenção da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momento fletor resistente na zona S3 da viga.

Tabela 3.12: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S3.

Parâmetro	Publicação	Ferramenta	Erro relativo (%)
$L_e$ (m)	5,60	5,60	0,0
$b_0$ (m)	0,10	0,10	0,0
$b_{ei}$ (m)	0,70	0,70	0,0
$b_{eff}$ (m)	1,50	1,50	0,0
$z_{pl}$ (m)	0,1541	0,1541	0,0
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	948,7	949,15	0,047

A diferença de valores obtida com as duas metodologias é de 0,047%, o que mostra a validade da ferramenta.

### 3.11.3 Exemplo 3

Considere a viga simplesmente apoiada representada na Figura 3.31. Pretende-se calcular o momento fletor resistente,  $M_{Rd}$ , de uma secção transversal, constituída por um banzo de betão e um perfil monossimétrico de aço. A Tabela 3.13 apresenta as propriedades dos materiais usados.

Tabela 3.13: Características dos materiais usados no Exemplo 3.

Material	Aço estrutural	Betão
Classe	S235	C25/30
$f_{yd}$ (MPa)	355	-
$f_{cd}$ (MPa)	-	16,7
$E$ (GPa)	210	31

Na Figura 3.31 ilustra-se a viga simplesmente com a identificação da zona de estudo e o pormenor da secção transversal.

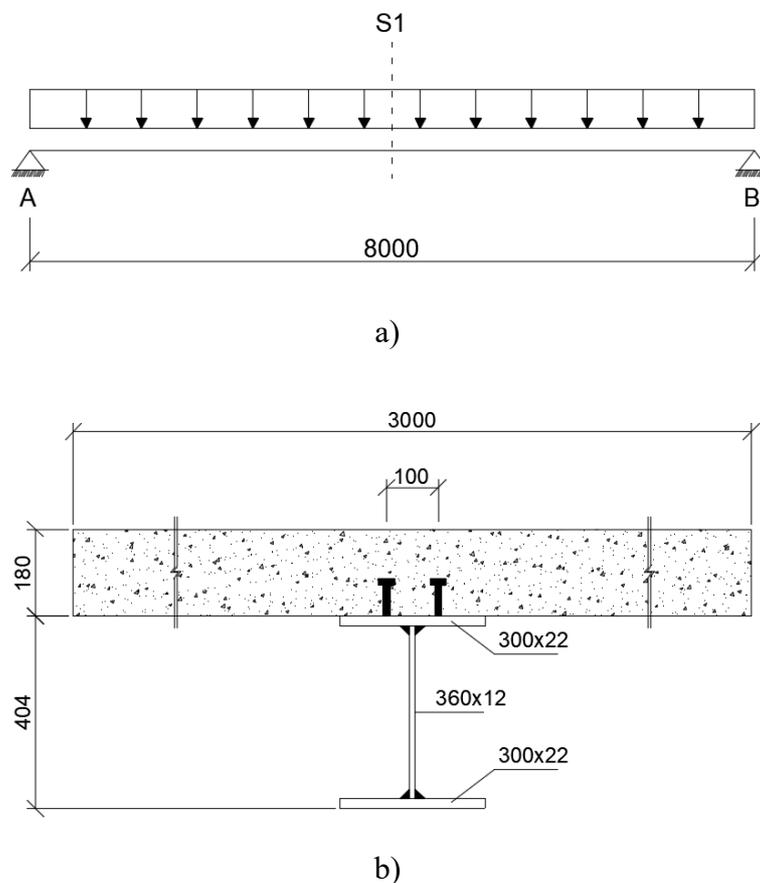


Figura 3.31: Definição das dimensões em mm (exemplo 6.4 em Calado et al. (2013)): a) viga simplesmente apoiada; b) pormenor da secção transversal.

Na Tabela 3.14 são apresentados os valores necessários à obtenção da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momento fletor resistente na zona S1 da viga.

Tabela 3.14: Comparação entre os resultados em Calado et al. (2013) e a ferramenta desenvolvida em Matlab da secção S1

Parâmetro	Publicação	Ferramenta	Erro relativo (%)
$L_c$ (m)	8,00	8,00	0,0
$b_0$ (m)	0,10	0,10	0,0
$b_{ei}$ (m)	1,00	1,00	0,0
$b_{eff}$ (m)	2,10	2,10	0,0
$z_{pl}$ (m)	-	0,13812	-
$M_{pl,Rd}$ (kN.m)	-	1288,443	-

Não existe diferença de valores obtida com as duas metodologias, o que comprova a validade da ferramenta.

### **3.12 Conclusões**

Neste capítulo foi apresentada a ferramenta desenvolvida e quais os recursos utilizados para tal, estabelecendo uma estrutura e descrevendo todas as funcionalidades da ferramenta. Posteriormente apresentam-se os resultados obtidos pela ferramenta, assim como a validação da ferramenta desenvolvida para o cálculo de secções transversais mistas.

Descreveram-se detalhadamente as funções de cada uma das variáveis do ficheiro de dados da secção transversal. Também foram apresentadas as metodologias de cálculo usadas na programação da ferramenta, em particular o conceito da largura efetiva do banzo de betão e as principais regras de classificação da secção transversal responsáveis pela consideração da encurvadura local de partes do perfil de aço. Foram, também, descritos os princípios fundamentais referentes à análise plástica, assim como a análise elástica linear de secções transversais de vigas mistas utilizada pelos regulamentos atuais. Descreveram-se as considerações que permitem calcular os esforços resistentes e os diversos métodos de quantificação dos esforços resistentes.

Ainda neste capítulo foi descrito o *software Matlab*, visto ter sido usado para a conceção da ferramenta. Foi ainda descrita uma introdução ao ambiente de trabalho do *Matlab*, onde se exploram os conceitos básicos necessários para as primeiras experiências com a ferramenta.

De forma a validar a ferramenta desenvolvida, procedeu-se à sua aplicação a uns exemplos. Estes exemplos permitiram a comparação dos valores da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momentos fletores resistentes, determinados a partir da ferramenta desenvolvida, concluindo-se que as diferenças eram insignificantes.

## **4 ANÁLISE LONGITUDINAL**

### **4.1 Introdução**

Este capítulo aborda os aspetos fundamentais da metodologia implementada na ferramenta de análise longitudinal de tabuleiros mistos em aço e betão.

### **4.2 Apresentação da ferramenta**

A ferramenta desenvolvida para realizar a análise longitudinal do tabuleiro considera a deslocação do veículo/comboio-tipo, tendo em consideração incrementos de distância pré-definidos. A ferramenta oferece flexibilidade na quantificação das ações relacionadas com o tráfego rodoviário e ferroviário, pois cada modelo de sobrecarga pode ser ajustado pelo utilizador de forma independente. A ferramenta permite a especificação de vários modelos de veículos-tipo, de forma que, o utilizador possa optar rapidamente pelo mais indicado, em função do tipo de projeto em causa. A ferramenta apresenta várias capacidades que a tornam muito útil, como por exemplo, faz a distribuição das cargas através do cálculo de linhas de influência.

Outro aspeto importante do funcionamento da ferramenta é o facto de permitir analisar tabuleiros com diferentes esquemas estruturais (viga mista contínua ou simplesmente apoiada). Como se verá neste capítulo, a ferramenta permite também estimar o custo do tabuleiro da ponte, recorrendo a dados introduzidos na análise da secção transversal, bastando ao utilizador introduzir os dados dos custos unitários dos materiais utilizados na secção mista, para que o cálculo seja efetuado de forma simples e rápida.

### **4.3 Ficheiro de entrada de dados para análise longitudinal**

No presente tópico apresenta-se a estrutura organizativa de toda a informação que a ferramenta regista relativamente às ações relacionadas com o tráfego rodoviário e ferroviário que atua sobre a ponte.

A partir do ficheiro `inputFile_charge.m`, o utilizador insere os dados necessários à análise longitudinal da ponte. A especificação de comprimentos na definição das variáveis é sempre efetuada em metros.

Os parâmetros descritos em seguida são específicos na definição das variáveis do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) para tráfego rodoviário:

- `inputdata.colapsoRsa` – ativação da análise longitudinal de pontes rodoviárias segundo o regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes (RSA). Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos 0 ou 1. O algarismo 0 não efetua o cálculo e o algarismo 1 efetua a análise longitudinal de pontes rodoviárias.
- `inputdata.section.colapsoRsa.Q` – definição do vetor das cargas concentradas,  $Q$ , transmitidas por um veículo de três eixos equidistantes, cada um destes com duas rodas, com disposição e dimensões indicadas, em planta, na Figura 4.1. Tenha em atenção que as cargas podem ser reguladas pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoRsa.q` – definição do vetor da sobrecarga, constituída por uma carga uniformemente distribuída,  $q_1$ , e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme,  $q_2$ , consoante a classe a que a ponte pertence. Tenha em presente que a sobrecarga pode ser regulada pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoRsa.l1` – definição da variável da distância transversal em relação ao eixo do veículo de eixos equidistantes,  $l_1$ , cada um de duas rodas, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.1. Tenha em atenção que a distância pode ser regulada pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoRsa.l2` – definição do vetor da distância longitudinal em relação ao eixo do veículo de eixos equidistantes, cada um de duas rodas,  $l_2$ , com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.1. Tenha em presente que a distância pode ser regulada pelo utilizador .
- `inputdata.section.colapsoRsa.a_b` – definição do vetor das dimensões,  $a$  e  $b$ , das superfícies de contacto das rodas, consoante a classe a que a ponte pertence, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.1. Tenha em presente que as dimensões,  $a$  e  $b$  podem ser reguladas pelo utilizador .

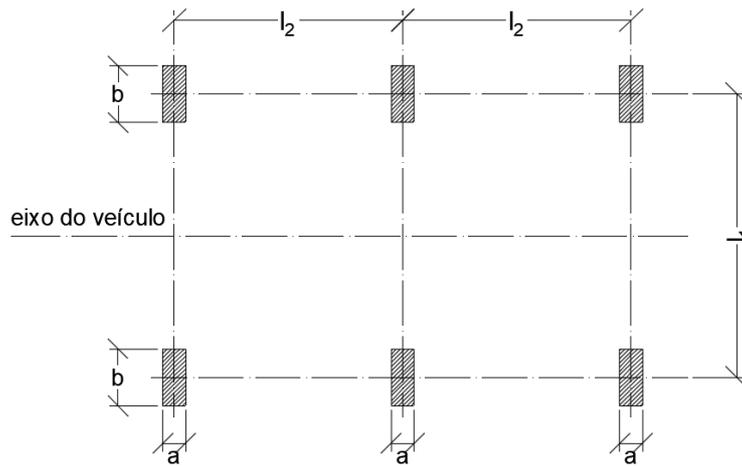


Figura 4.1: Disposição e dimensões do veículo de três eixos equidistantes, cada um de duas rodas.

- `inputdata.section.colapsoRsa.Qn` – definição do número de eixos equidistantes longitudinais considerados para o veículo-tipo, cada um de duas rodas. Por predefinição, a ferramenta permite até um máximo de 10 eixos equidistantes para o veículo-tipo.

Caso o número de cargas longitudinais para o veículo-tipo seja superior a 10, surgirá uma caixa de diálogo a avisar desse facto (ver Figura 4.2).

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa o número máximo de eixos longitudinais para o veículo-tipo (ver Figura 4.2).

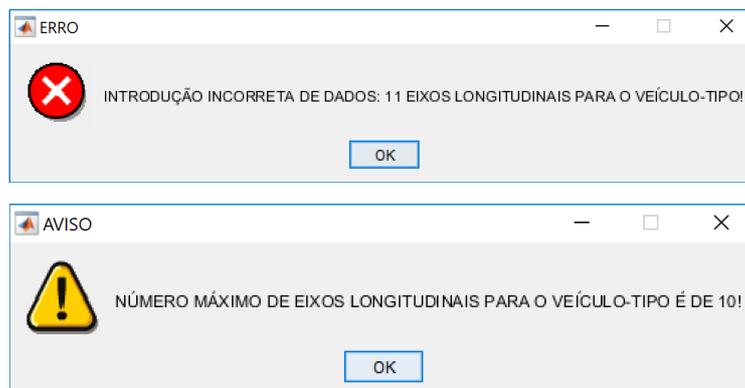


Figura 4.2: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de eixos longitudinais para o veículo-tipo.

Este parâmetro está dependente das distâncias longitudinais entre eixos. Caso existam dados introduzidos incorretamente, a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada (ver Figura 4.3).

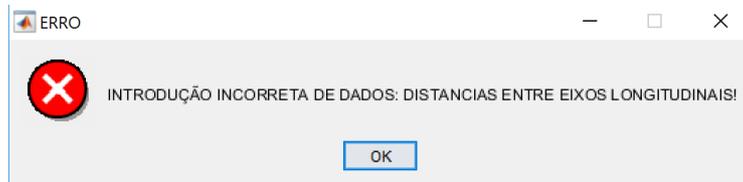


Figura 4.3: Mensagem com informação de erro.

Posteriormente, surge uma janela de aviso que informa o número de distâncias entre eixos longitudinais para o veículo-tipo, em função do número de cargas pretendido.

- `inputdata.section.colapsoRsa.n` – definição da variável de incremento da distância para a deslocação do veículo-tipo sobre o tabuleiro da ponte.

Descreve-se, de seguida, os principais parâmetros da definição das variáveis, de acordo com as disposições da norma EN 1991-2 para o tráfego rodoviário:

- `inputdata.colapsoEC1` – definição da variável para a análise longitudinal de pontes rodoviárias, segundo o modelo de carga LM1, definido na parte 2 do Eurocódigo 1. Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos entre 0 ou 1. O algarismo 0 define que a ferramenta não efetua o cálculo e o algarismo 1 efetua análise longitudinal de pontes rodoviárias.
- `inputdata.section.colapsoEC1.Q` – definição do vetor das cargas concentradas,  $Q$ , correspondentes a um veículo-tipo de dois eixos equidistantes, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.4. Tenha em presente que as cargas concentradas podem ser reguladas pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoEC1.q` – definição do vetor das sobrecargas constituídas por cargas uniformemente distribuídas,  $q_{ik}$ . Tenha em presente que as sobrecargas podem ser reguladas pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoEC1.l1` – definição da variável da distância transversal em relação ao eixo do veículo de dois eixos equidistantes, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.4. Tenha em atenção que a distância pode ser regulada pelo utilizador.

- `inputdata.section.colapsoEC1.a` – definição da variável da distância que os veículos terão de estar afastados, no caso de duas vias adjacentes, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.4. Tenha em atenção que a distância pode ser regulada pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoEC1.l2` – definição da variável da distância longitudinal em relação ao eixo do veículo de dois eixos equidistantes, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.4. No estabelecimento de eixos equidistantes, todas as dimensões devem referir-se a distâncias entre cargas,  $Q$ , pois estas são passíveis de serem ajustadas até a um máximo de 10 eixos equidistantes para o veículo-tipo.

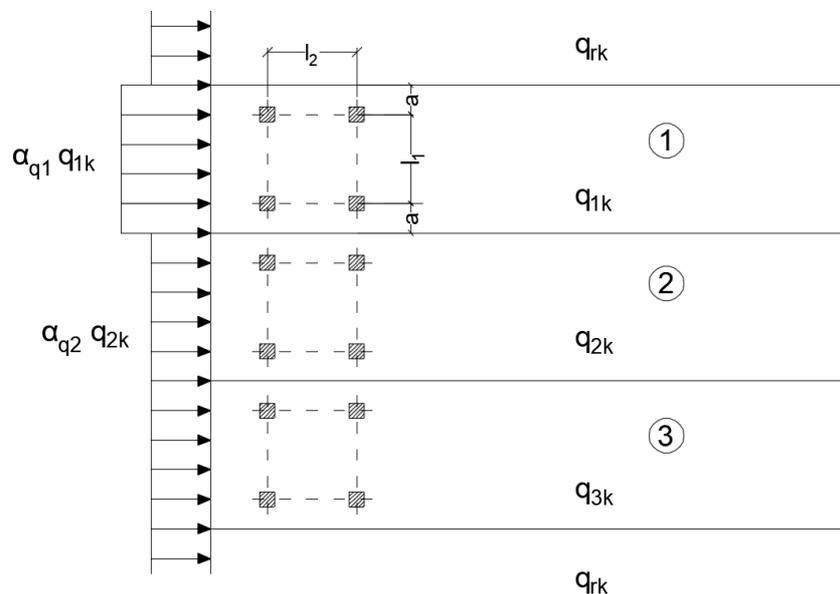


Figura 4.4: Disposição e dimensões do veículo de dois eixos equidistantes, cada um de duas rodas.

- `inputdata.section.colapsoEC1.Qn` – definição da variável do número de eixos equidistantes longitudinais considerados para o veículo-tipo, cada um de duas rodas. Por predefinição, a ferramenta permite até a um máximo de 10 eixos equidistantes para o veículo-tipo. No caso de o número de eixos equidistantes ultrapassar o limite estabelecido, surgem caixas de diálogo que informam sobre a irregularidade (Figura 4.2). Será também apresentada uma janela de aviso a chamar a atenção para a existência de um número máximo de eixos longitudinais para o veículo-tipo (Figura 4.2).

Este parâmetro está dependente das distâncias longitudinais entre eixos. Caso exista dados introduzidos incorretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada (ver Figura 4.3).

Depois, surge uma janela de aviso que informa sobre o número de distâncias entre eixos longitudinais para o veículo-tipo, em função do número de cargas pretendido.

- `inputdata.section.colapsoEC1.n` – definição da variável de incremento da distância para a deslocação do veículo-tipo sobre o tabuleiro da ponte.

Para definir as variáveis previstas na norma EN 1991-2 relativas ao tráfego ferroviário, há que considerar a descrição seguinte:

- `inputdata.colapsoLM71` – definição da variável para a análise longitudinal de pontes ferroviárias segundo o modelo de carga LM71 previsto no Eurocódigo 1. Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos 0 ou 1. O algarismo 0 não efetua o cálculo e o algarismo 1 efetua a análise longitudinal de tabuleiros ferroviários.
- `inputdata.section.colapsoLM71.Q` – definição do vetor das cargas concentradas,  $Q$ , aplicadas por um comboio-tipo, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.5. Tenha em presente que as sobrecargas podem ser reguladas pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoLM71.q` – definição do vetor da sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída,  $q$ . Tenha em presente que a sobrecarga pode ser regulada pelo utilizador .
- `inputdata.section.colapsoLM71.l1` – definição do vetor da distância entre a carga uniformemente distribuída,  $q$ , e a carga concentrada,  $Q$ , com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.5. Tenha em atenção que as distâncias das sobrecargas podem ser reguladas pelo utilizador.
- `inputdata.section.colapsoLM71.l2` – definição do vetor da distância entre cargas concentradas, com disposição e dimensões indicadas em planta na Figura 4.5. No estabelecimento de cargas concentradas, todas as dimensões devem referir-se a distâncias entre cargas,  $Q$ , pois estas são passíveis de serem ajustadas até a um máximo de 10 cargas para o comboio-tipo. Tenha em atenção que as distâncias entre as cargas concentradas podem ser reguladas pelo utilizador.

- `inputdata.section.colapsoLM71.a` – definição da variável do fator  $\alpha$ , os valores característicos das cargas indicados na Figura 4.5 devem ser multiplicados por um fator  $\alpha$ , para atender ao tipo de tráfego que circula na linha em consideração, seja predominantemente mais pesado ou mais leve em relação ao tráfego considerado normal.

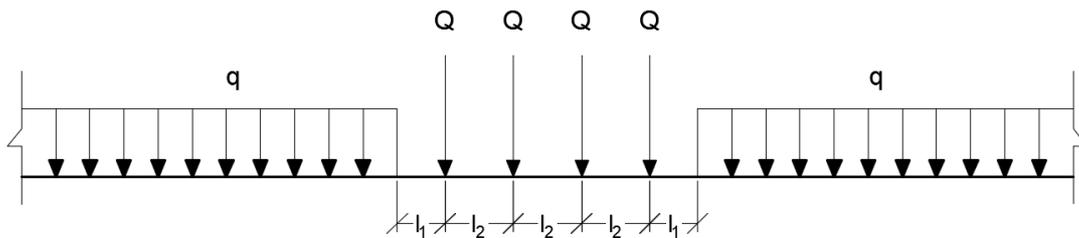


Figura 4.5: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71.

- `inputdata.section.colapsoLM71.Qn` – definição da variável do número de eixos longitudinais considerados para o comboio-tipo, cada uma de duas rodas. Por predefinição, a ferramenta permite até a um máximo de 10 eixos longitudinais para o comboio-tipo.

No caso de o número de eixos longitudinais ultrapassar o limite estabelecido, surge uma caixa de diálogo que informa sobre a irregularidade (ver Figura 4.6).

A seguir, surge uma janela de aviso que informa o número máximo de eixos longitudinais para o comboio-tipo (ver Figura 4.6).

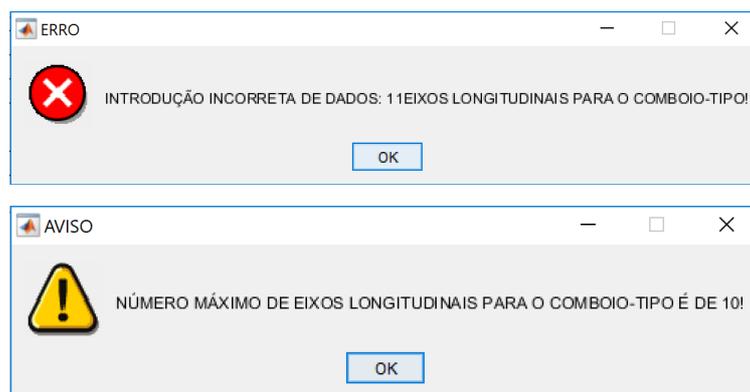


Figura 4.6: Mensagem de informação do erro e aviso sobre o número máximo de eixos longitudinais para o comboio-tipo.

Este parâmetro está dependente das distâncias longitudinais entre eixos. Caso existam dados introduzidos incorretamente, a execução da função é abortada, produzindo uma

mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada (ver Figura 4.3).

Em seguida, surge uma janela de aviso que informa o número de distâncias entre eixos longitudinais para o comboio-tipo em função do número de eixos pretendido.

- `inputdata.section.colapsoLM71.n` – definição da variável de incremento da distância para a deslocação do comboio- tipo sobre o tabuleiro da ponte.

A ferramenta disponibiliza também uma função que permite estimar o custo do tabuleiro da ponte. O processo tem por base o uso de dados introduzidos na análise da secção transversal e a definição de custos unitários dos materiais utilizados na secção mista, cujas variáveis se descrevem em seguida:

- `inputdata.section.CostBrigde` – definição da variável para estimar o custo dos elementos do tabuleiro da ponte. Para o funcionamento da ferramenta é necessário inserir os algarismos 0 ou 1. O algarismo 0 não efetua o cálculo e o algarismo 1 efetua a estimativa do custo do tabuleiro.
- `inputdata.section.CostConcr` – definição da variável do valor unitário do custo do betão (cm<sup>3</sup>).
- `inputdata.section.CostSteel` – definição da variável do valor unitário do custo do aço estrutural (kg).
- `inputdata.section.CostReinf` – definição da variável do valor unitário do custo das armaduras longitudinal da laje de betão (kg).

A ferramenta tem programada uma função que verifica a existência de diferentes secções transversais inseridas na mesma ponte para a análise longitudinal. Esta verificação foi criada para garantir a uniformização das secções transversais usadas na análise longitudinal. A interligação de dados das várias secções em estudo é um dos aspetos fundamentais da dinâmica do programa. Se o programa detetar que o parâmetro não foi devidamente inserido, surgirá uma mensagem a avisar desse facto e a identificar a secção condicionante (Figura 4.7).

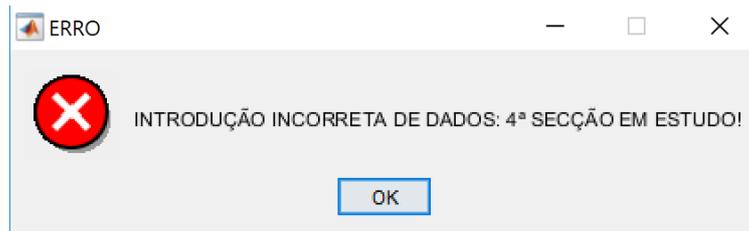


Figura 4.7: Mensagem com informação de erro.

Para tornar a análise longitudinal mais eficiente, a ferramenta dispõe de uma função que verifica a existência de diferentes comprimentos de vãos na ponte em estudo, introduzidos através dos ficheiros de entrada de dados das secções transversais. Esta verificação foi criada para garantir que não exista diferentes comprimentos introduzidos nos ficheiros de entrada de dados. Quando os comprimentos dos vãos da ponte forem introduzidos incorretamente, o programa afixa um aviso nesse sentido, como se ilustra na Figura 4.7.

Em seguida, surge uma caixa de diálogo que informa da irregularidade detetada nos comprimentos vãos da ponte (Figura 4.8).

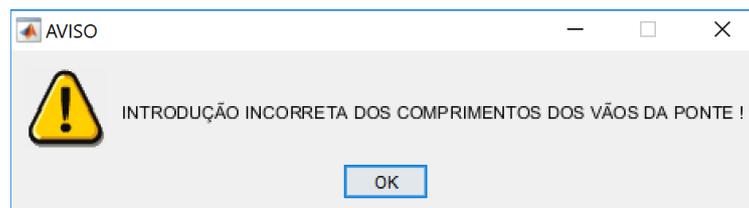


Figura 4.8: Aviso informando da irregularidade nos comprimentos vãos da ponte.

#### 4.4 Determinação da carga de rotura

Neste tópico, aborda-se a determinação da carga de rotura através da aplicação do teorema cinemático. Em rigor, a aplicação do teorema cinemático, dado tratar-se de uma forma de análise global plástica, só pode ser utilizada quando a estrutura tem uma capacidade de rotação suficiente nos locais reais das rótulas plásticas, quer seja nos elementos quer seja nas ligações. No contexto da presente dissertação, nomeadamente na análise comparativa que se apresenta no capítulo seguinte, faz-se um uso indiferenciado deste tipo de análise com o intuito de avaliar de uma forma simplificada o desempenho técnico-económico das diversas soluções estudadas.

A ferramenta efetua uma análise do efeito da alternância de sobrecargas, com base no cálculo de linhas de influência de momentos fletores, de forma a determinar a colocação da sobrecarga na posição (ou posições) mais desfavorável para maximizar o efeito (ou esforço) que se pretende analisar.

A determinação do parâmetro de carga associado a um mecanismo cinematicamente admissível é efetuada recorrendo à aplicação do princípio dos trabalhos virtuais (PTV), igualando o trabalho das forças exteriores,  $W$ , à energia de deformação da estrutura,  $U$ . Considera-se que a deformação global da estrutura resulta da deformação associada à existência de rótulas plásticas. Deste modo, a energia de deformação da estrutura,  $U$ , é dada pelo produto entre os momentos plásticos que se mobilizam nas rótulas plásticas e as correspondentes rotações, sendo positiva a contribuição de todas as rótulas plásticas uma vez que, por aplicação das condições de paridade, o momento plástico e a rotação correspondente têm sempre o mesmo sinal.

Começa-se por estabelecer o número possível de mecanismos independentes, que de um modo geral pode ser obtido pela diferença entre o número de secções potenciais para a formação de rótulas plásticas e o grau de hiperstaticidade designado por  $\alpha$ . A formação de  $(\alpha+1)$  rótulas plásticas é condição suficiente para a existência de um mecanismo de colapso. O valor da carga última de uma estrutura está associado à formação de um mecanismo de colapso que impede a estrutura de suportar incrementos adicionais de carga. O mecanismo de colapso será o que corresponde ao menor de todos os fatores de carga de colapso e que corresponde igualmente a um diagrama de momentos estaticamente admissível. A rotura plástica de qualquer tabuleiro pode ser obtida a partir do estudo do mecanismo de colapso da viga encastrada apoiada para o vão de extremidade, da viga bi-encastrada para um vão interior tipo ou da viga simplesmente apoiada.

A ferramenta considera três modos para quantificar as ações atuantes sobre o tabuleiro: Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), definição do modelo de carga LM1 do Eurocódigo 1 e definição do modelo de carga LM71 do Eurocódigo 1. As metodologias adotadas na determinação da carga de colapso são dependentes do regulamento que é considerado na quantificação de ações sobre o tabuleiro.

#### **4.4.1 Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA)**

A ferramenta divide a atuação das cargas em dois tipos de sobrecarga distintos. Para efeitos de dimensionamento, deverá ser considerado o modelo de sobrecarga que provoque os esforços mais elevados. As sobrecargas devem ser consideradas atuando, tanto longitudinal como transversalmente, na posição mais desfavorável para o elemento em estudo.

#### **4.4.1.1 Veículo-tipo**

A ferramenta estabelece automaticamente que o veículo-tipo é formado por 3 eixos equidistantes, cada um de duas rodas, com a disposição e as dimensões ilustradas na Figura 4.1. A ferramenta assume que o veículo deverá ser localizado em qualquer posição na faixa de rodagem, mas sempre com o seu eixo paralelo ao eixo da ponte. No caso de pontes dotadas de duas faixas de rodagem (cada uma destinada a um único sentido de tráfego), o veículo deve ser aplicado em cada uma das faixas, ou em ambas simultaneamente, desde em que cada faixa de rodagem comporte duas ou mais vias de tráfego. O veículo-tipo apenas pode estar aplicado numa via de uma faixa de rodagem, ou seja, não deve ser colocado nas bermas ou passeios da ponte. Por predefinição cada roda do veículo-tipo transmite uma carga vertical,  $Q$ , ao pavimento, através de uma superfície de contacto retangular de dimensões  $a$  e  $b$  (ver Figura 4.1). Transversalmente, o veículo deve ocupar a posição mais desfavorável para o elemento em estudo.

#### **4.4.1.2 Sobrecarga uniforme e linear**

O modelo de sobrecarga predefinido é constituído por uma carga uniformemente distribuída,  $q_1$ , nas direções longitudinal e transversal e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme,  $q_2$ .

### **4.4.2 EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes**

Nesta secção, descreve-se a metodologia adotada na elaboração da ferramenta para o dimensionamento de tabuleiros com tráfego rodoviário e ferroviário.

#### **4.4.2.1 Tráfego Rodoviário**

Para pontes de tráfego rodoviário, a norma define quatro modelos de carga. A ferramenta tem implementada a metodologia do modelo de carga LM1, que abrange a maioria dos efeitos causados pelo tráfego comum (carros e camiões). É o sistema de sobrecarga destinado ao caso geral, constituído por cargas concentradas e uniformemente distribuídas. Representa situações de tráfego fluído, congestionado e parado com percentagem elevada de camiões pesados.

##### **4.4.2.1.1 Número de vias**

Um dos aspetos mais importantes do funcionamento da ferramenta é a capacidade de proceder à divisão das zonas de circulação da ponte em vias de cálculo, de acordo com a norma europeia. A largura da faixa de rodagem é definida como a distância entre lancis ou entre guardas exteriores incluindo a largura do separador central, exceto quando este é de natureza fixa. Tenha presente que a largura e posição das vias não têm que

corresponder à marcação física das vias no pavimento, mas é segundo estas que o carregamento é feito. Nessas vias fictícias atuam até três veículos-tipo alinhados transversalmente com valores de carga variáveis em função da via na qual atuam, conforme o esquema representado na Figura 4.9. Tal consideração leva a crer que foi tida em conta a redução da probabilidade da circulação de camiões lado a lado, à medida que o número de vias de tráfego no mesmo sentido aumenta. O número de vias é determinado consoante a largura da faixa de rodagem ( $w$ ), de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Número e largura das vias segundo a norma europeia (EN 1991-2).

Largura da faixa de rodagem $w$	Número de vias	Largura das vias $w_1$	Largura da faixa remanescente
$w < 5,4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$w / 2$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}(w/3)$	3 m	$w - 3 \times n_1$

Por predefinição, o número de vias que se considerarão carregadas, a posição de cada via na faixa de rodagem e a numeração das mesmas devem ser tais que os efeitos da aplicação do modelo de carga sejam os mais desfavoráveis. A via que produza os efeitos mais desfavoráveis é numerada como via número 1, a via que produza os segundos efeitos mais desfavoráveis é numerada como via número 2 e assim sucessivamente. O modelo de carga LM1 deve ser aplicado em cada via dedicada e na área remanescente.

Quando a plataforma de rodagem se encontra dividida em duas partes separadas do mesmo tabuleiro, a numeração é comum às duas partes. Quando a plataforma de rodagem se encontra dividida em duas partes separadas de tabuleiros independentes, deve considerar-se a existência de duas plataformas de rodagem e a numeração é feita para cada uma das partes.

#### 4.4.2.1.2 Definição do modelo de carga LM1

A ferramenta define automaticamente o modelo de sobrecarga (LM1), que consiste na aplicação simultânea de uma carga uniformemente distribuída (UDL) na área de cada via do tabuleiro e de um veículo (TS) de dois eixos colocado no centro da via.

Em cada roda deverá ser considerada uma superfície de contacto com o pavimento de  $0,40 \text{ m} \times 0,40 \text{ m}$  e o valor destas cargas deverá ser multiplicado por fatores de correção ( $\alpha_Q$  e  $\alpha_q$ ), que têm em conta o tipo de ponte em análise bem como a influência do tráfego

da região, o número médio de veículos por ano, etc. Os veículos devem ocupar a posição transversal mais desfavorável da respetiva via. No caso de duas vias adjacentes, os veículos terão de estar afastados num mínimo de 50 cm, conforme o esquema representado na Figura 4.9.

A EN 1991–2 representa a múltipla presença veículos diretamente nos valores das cargas características, socorrendo-se da divisão da faixa de rodagem em vias dedicadas nas quais aplica cargas de diferente valor: a primeira via dedicada tem um carregamento mais intenso, do que as restantes, a segunda via dedicada está sujeita a um carregamento mais intenso do que a terceira, etc.

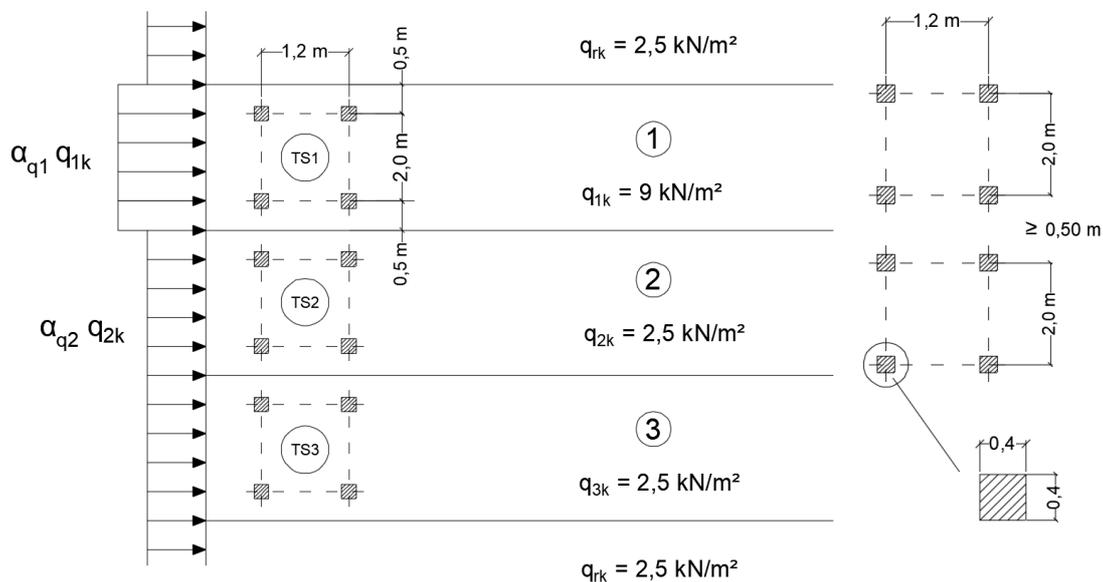


Figura 4.9: Aplicação do modelo LM1.

#### 4.4.2.2 Tráfego Ferroviário

Para pontes com tráfego ferroviário, a norma define quatro modelos de carga distintos. A ferramenta tem programada a metodologia do modelo de carga LM71, que através de um único esquema de cargas consegue traduzir os efeitos estáticos de um conjunto de comboios reais considerados representativos do tráfego ferroviário nas pontes.

##### 4.4.2.2.1 Definição do modelo de carga LM71

A ferramenta tem implementada a metodologia do modelo de cargas LM71 constituído por quatro cargas concentradas ( $Q_{vk}$ ) de 250 kN e cargas uniformemente distribuídas ( $q_{vk}$ ) de 80 kN/m, conforme o esquema representado na Figura 4.10. Este modelo pretende simular os efeitos das cargas ferroviárias em elementos de pequeno vão através das cargas

concentradas, e em elementos de grande vão através das cargas uniformemente distribuídas.

Por predefinição, os valores característicos das cargas indicados na Figura 4.10 devem ser multiplicados por um fator  $\alpha$ , para atender ao tipo de tráfego que circula na linha em consideração, seja predominantemente mais pesado ou mais leve em relação ao tráfego considerado normal, passando nesse caso a designar-se por cargas classificadas. Este fator poderá ser tomado igual a 0,75, 0,83 ou 0,91 no caso de o tráfego ser mais leve, e a 1,10, 1,21, 1,33 ou 1,46 no caso de o tráfego ser mais pesado.

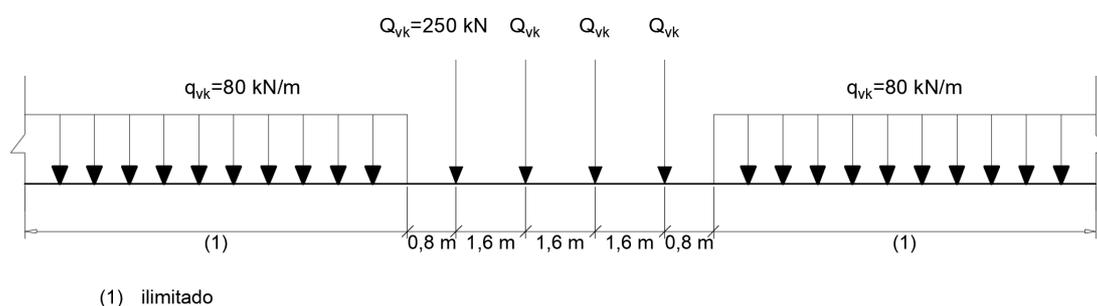


Figura 4.10: Disposição e dimensões do modelo de carga LM71.

#### 4.4.2.3 Disposição das ações

Para a determinação dos efeitos mais desfavoráveis das ações em tabuleiros ferroviários, foi implementado o procedimento de cálculo que adequa a disposição das cargas nas diversas vias de tráfego. Em seguida, descrevem-se os efeitos mais desfavoráveis que são obtidos com o modelo de carga LM71: *i*) em pontes com uma única via, aplicam-se quatro cargas pontuais ( $Q_{vk}$ ), e um qualquer número de troços com carga uniformemente distribuída ( $q_{vk}$ ). *ii*) em pontes com duas vias, considera-se o carregamento de cada uma das vias, ou de ambas as vias em simultâneo; *iii*) em pontes com três ou mais vias, considera-se o carregamento de qualquer uma das vias, ou o carregamento de duas, três ou mais vias, sendo que para este último caso, os valores das cargas podem ser reduzidos de 25%.

#### 4.5 Linhas de influência

Dado que as sobrecargas rodoviárias, relacionadas com o veículo-tipo, podem ser aplicadas em qualquer posição que vai ser mais desfavorável para a estrutura. A ferramenta tem programada a metodologia das linhas de influência que descrevem a

variação de um determinado efeito, por exemplo a reação em apoios, o esforço transversal ou momento fletor numa secção, em função da posição de uma carga que se passeia sobre a estrutura. Deste modo é possível fazer passear pela estrutura a sobrecarga do veículo-tipo e determinar a posição que irá provocar maiores esforços na estrutura. Assim, o estudo centra-se na determinação da posição do veículo que provoca o esforço máximo em cada um dos apoios e nos vãos.

#### 4.6 Validação da ferramenta desenvolvida

De forma a validar os resultados obtidos pela ferramenta, escolheu-se realizar uma comparação dos efeitos estruturais induzidos pelos modelos de sobrecargas rodoviárias dos dois regulamentos abordados neste capítulo, selecionou-se o caso de estudo de tabuleiros com altura da viga limitada entre 800 e 1100 mm e perfis laminados.

A solução do tabuleiro da ponte é composta por três vigas longitudinais. As vigas são do tipo I e as soluções estudadas têm entre 800 a 1100 m de altura para todos os vãos (Figura 4.11). A secção das vigas mantém-se constante ao longo do seu desenvolvimento.

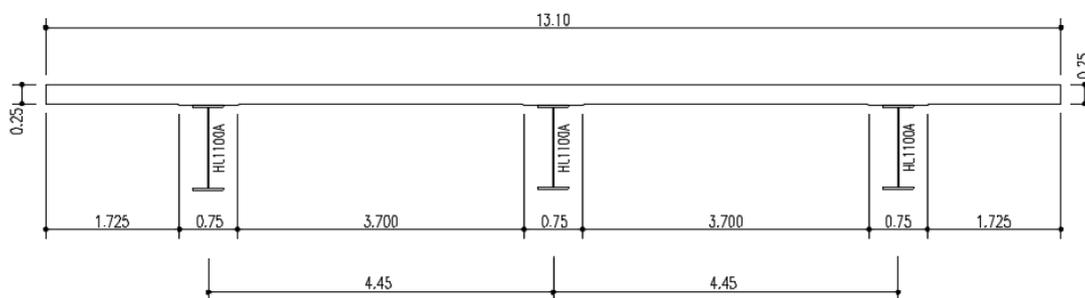


Figura 4.11: Detalhe da secção transversal do tabuleiro em secção multi-viga de três vigas.

A plataforma do tabuleiro (Figura 4.11) é constituída por uma laje de betão armado com uma espessura constante de 0,25 m.

Na Figura 3.30 ilustra-se o esquema longitudinal da solução adotada para a validação da ferramenta.

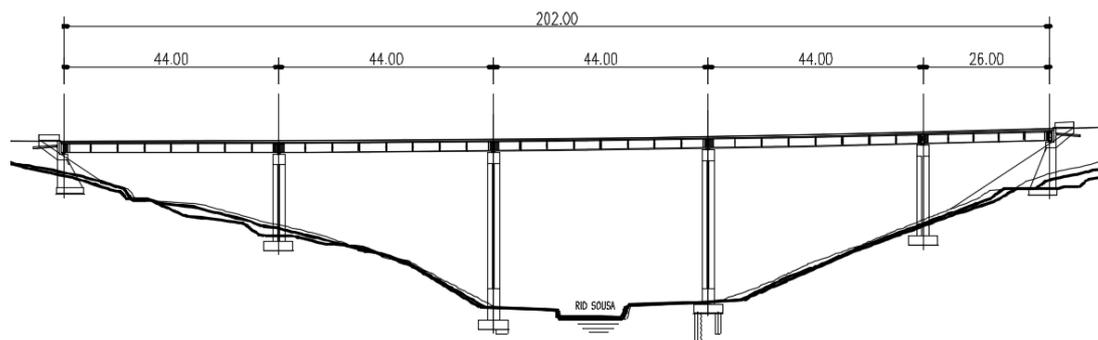


Figura 4.12: Corte longitudinal da solução adotada.

Na Tabela 4.2 indicam-se as cargas máximas obtidas em tabuleiros mistos de secção multi-viga composta por três vigas.

Tabela 4.2: Cargas máximas obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal multi-viga.

Perfil metálico	Regulamento/Norma	Modelo de sobrecarga rodoviária	Carga máxima
HL1100A	RSA	VT	5,4
		SCU+SCL	13,0
	EN 1991-2	VT+SCU	4,4
HE900A	RSA	VT	3,5
		SCU+SCL	8,0
	EN 1991-2	VT+SCU	2,7
HE800A	RSA	VT	2,9
		SCU+SCL	6,7
	EN 1991-2	VT+SCU	2,2

Sendo,

VT – Veículo tipo;

SCU – Sobrecarga uniformemente distribuída;

SCL – Sobrecarga linearmente distribuída;

Os valores apresentados na Tabela 4.2 indicam que o aumento da altura do perfil metálico acentua a diferença entre o valor das cargas máximas que é possível aplicar com cada um dos modelos de sobrecarga rodoviários considerados, o que comprova a validade da ferramenta.

#### 4.7 Conclusões

Neste capítulo descreveu-se o desenvolvimento e implementação da ferramenta do módulo de análise longitudinal de tabuleiros mistos em aço e betão, justificando-se as diversas opções tomadas e apresentando-se exemplos de verificação para validação dos resultados obtidos. Este módulo é baseado na determinação da carga de rotura através da aplicação do teorema cinemático. Foi programada na ferramenta uma análise do efeito da alternância de sobrecargas, com base no cálculo de linhas de influência de momentos fletores, de forma a determinar a colocação da sobrecarga na posição (ou posições) mais desfavorável para maximizar o efeito (ou esforço) que se pretende analisar.

Os modos de rotura destas estruturas refletem o comportamento mecânico dos materiais e a interação entre os diferentes elementos da ponte, em função dos quais se podem distinguir os modos de rotura associados ao funcionamento na direção longitudinal, determinados essencialmente pelos mecanismos de rótulas.

Ao nível das ações, apresentaram-se os diversos modelos de sobrecargas preconizados nas normas para o dimensionamento de novas estruturas utilizadas no processo de determinação da carga de rotura.

A validação da ferramenta desenvolvida para a análise longitudinal da ponte envolveu a comparação dos efeitos estruturais induzidos pelos modelos de sobrecargas rodoviárias dos dois regulamentos abordados neste capítulo, selecionou-se o caso de tabuleiros com altura da viga limitada entre 800 e 1100 mm e perfis laminados, concluindo-se que o aumento da altura do perfil metálico acentua a diferença entre o valor das cargas máximas, o que comprova a validade da ferramenta.

Aborda-se, também, a capacidade de a ferramenta permitir estimar o custo do tabuleiro da ponte, recorrendo a dados introduzidos na análise da secção transversal, bastando ao utilizador introduzir os dados dos custos unitários dos materiais utilizados na secção mista, para que o cálculo seja efetuado de forma simples e rápida.

## 5 ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, é realizada uma análise comparativa de diferentes soluções para o viaduto sobre o rio Sousa, recorrendo ao programa desenvolvido. As análises comparativas de diferentes soluções de tabuleiros foram realizadas com base em situações de carregamento previstas de acordo com o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) e com o Eurocódigo 1 (EN 1991-2-2003), ambos pertinentes no dimensionamento estrutural de pontes.

Apresentam-se as cargas de rotura originadas por cada modelo de sobrecarga previsto em ambos os regulamentos. Essas cargas de rotura são obtidas a partir da análise longitudinal do tabuleiro e considerando as diferentes secções transversais existentes.

É importante referir que este estudo é focado nos aspetos relacionados com o dimensionamento do tabuleiro da ponte de referência, ou seja, as questões relacionadas com os pilares e encontros (mesoestrutura) e com as fundações (infraestrutura) não serão abordadas.

### 5.2 Características geométricas e estruturais da ponte de referência

A ponte sobre o rio Sousa, localizada na A43, que realiza a ligação entre Gondomar e Aguiar de Sousa (IC24), é uma estrutura mista em aço e betão, constituída por quatro vãos de 44 m e um vão extremo de 26 m, perfazendo uma extensão total de 202 m, como pode ser observado na Figura 5.1.

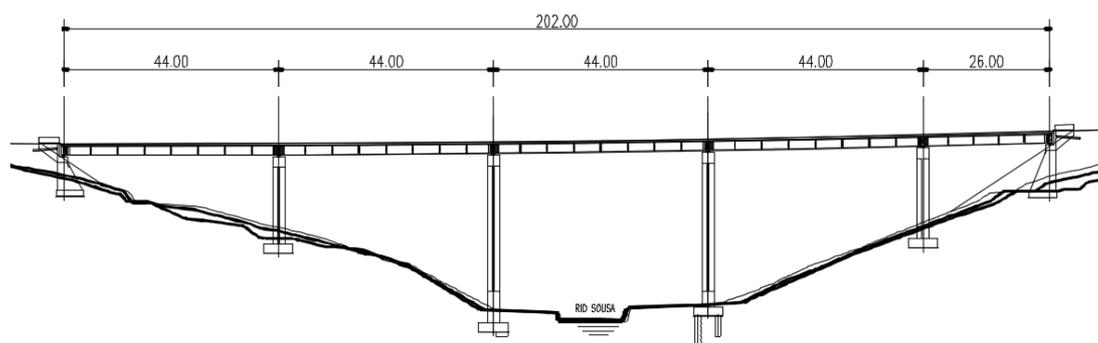


Figura 5.1: Corte longitudinal da Ponte sobre o Rio Sousa integrada na A43 – Gondomar/Aguiar de Sousa.

### 5.3 Características da secção transversal do tabuleiro da ponte de referência

O tabuleiro, contínuo em toda a sua extensão, é constituído por uma laje de betão armado de 13,1 m de largura suportada por duas longarinas metálicas de 2000 mm de altura e tipo “I”. A conexão entre as duas peças, realizadas com materiais distintos, é conseguida com a aplicação de conetores metálicos soldados ao perfil metálico. As longarinas são perfis reconstituídos soldados, sendo as larguras dos seus banzos superior e inferior, constantes ao longo de todo o seu desenvolvimento, de respetivamente, 700 mm e 840 mm. A espessura dos banzos e da alma das longarinas varia, longitudinalmente, face a critérios de rotura, de resistência à fadiga e de não instabilidade.

Assim, a espessura do banzo superior varia entre 20 e 100 mm e a espessura do banzo inferior varia entre 25 e 110 mm. A espessura da alma varia entre 14 e 20 mm.

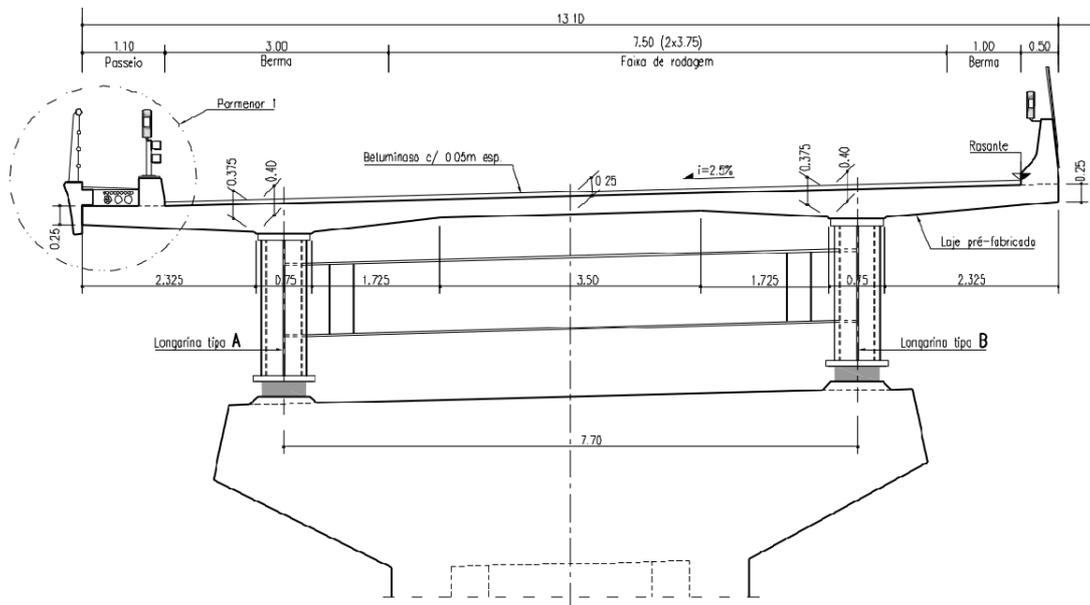


Figura 5.2: Corte transversal do tabuleiro da ponte de referência.

A plataforma do tabuleiro é constituída por lajes de betão armado, ligadas às longarinas metálicas através de conetores. Existem duas consolas, localizadas no lado exterior das longarinas, e, entre estas, uma laje interior.

As consolas têm 2,7 m de vão, com espessura variável entre 375 mm junto ao encastramento e 250 mm na extremidade livre. A laje interior tem 7,7 m de vão e apresenta espessura constante 250 mm na zona de vão. Junto aos encastramentos, a altura é variável entre 375 mm a 250 mm, ao longo de uma distância de 1,725 m.

Existe ainda um espessamento da laje de betão sobre os banzos superiores das longarinas metálicas (com 400 mm de altura) que, conservativamente, não se considerou na análise transversal.

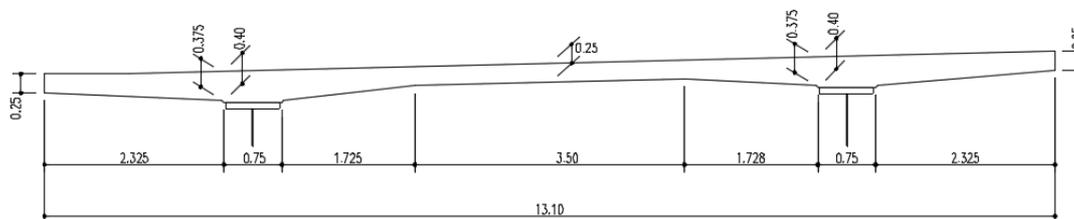


Figura 5.3: Detalhe da secção transversal da laje de betão.

Na análise e verificação da estrutura foram considerados os seguintes materiais estruturais: aço estrutural da classe S355, betão da classe C30/37 e armaduras do tipo A500 NR SD, com recobrimento de 3 cm em relação às faces exteriores da laje.

#### 5.4 Definição dos modelos de sobrecarga, em função do regulamento considerado

Para efeitos de aplicação do RSA, considera-se que o presente caso de estudo se insere nas pontes de classe I que servem vias de comunicação suscetíveis de terem tráfego intenso ou pesado, à semelhança do que acontece com a generalidade das pontes portuguesas. No caso da norma NP EN 1991-2, a ponte analisada neste trabalho será considerada como sendo de Classe II. Será adotado o modelo de sobrecarga rodoviária LM1 porque abrange a maioria dos efeitos causados pelo tráfego corrente (situações de tráfego fluído, congestionado e parado), composto por veículos ligeiros e veículos pesados.

#### 5.5 Dados a comparar

Neste trabalho, compara-se a diferença entre valores da carga de rotura que resultam dos modelos de sobrecarga rodoviária e a diferença de custo entre as várias soluções. A diferença de custo é essencialmente focada no custo da estrutura metálica, uma vez que os outros materiais (betão, etc) terão custos aproximadamente iguais nas diferentes soluções. Optou-se assim por medir a quantidade de aço gasta em cada uma das soluções.

## 5.6 Tabuleiros considerados na análise comparativa

A análise comparativa é realizada considerando tabuleiros em secção bi-viga, multi-viga e caixão. Utiliza-se o modelo de sobrecarga rodoviário definido em cada regulamento e são apresentadas estimativas do custo da estrutura metálica em cada solução.

### 5.6.1 Tabuleiros em secção bi-viga

A geometria da secção transversal do tabuleiro é definida a partir de regras gerais utilizadas no pré-dimensionamento de pontes mistas em aço e betão.

Na Tabela 5.1 apresentam-se valores médios de referência para a esbelteza do tabuleiro, definida como a razão altura/vão, ou seja, a altura das vigas é variável em função do vão a vencer. Não tendo estes valores qualquer carácter normativo, tratam-se, contudo, de dimensões indicativas que, em geral, conduzem a estruturas eficientes e esteticamente agradáveis.

Tabela 5.1: Esbelteza de tabuleiros mistos rodoviários.

Tabuleiro	Viga simplesmente apoiada	Viga contínua
Vigado	20 a 25	17 a 35
Caixão	25 a 30	17 a 35

A Figura 5.4 ilustra algumas regras de pré-dimensionamento de uma laje de betão num tabuleiro misto bi-viga, sendo também válidas para outros tipos de tabuleiros mistos com laje bi-apoiada (tabuleiros em caixão monocelular sem longarinas internas) (Manterola, 2006).

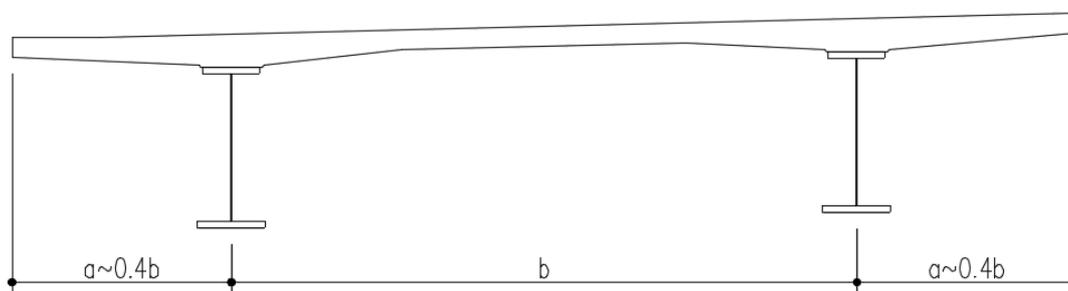


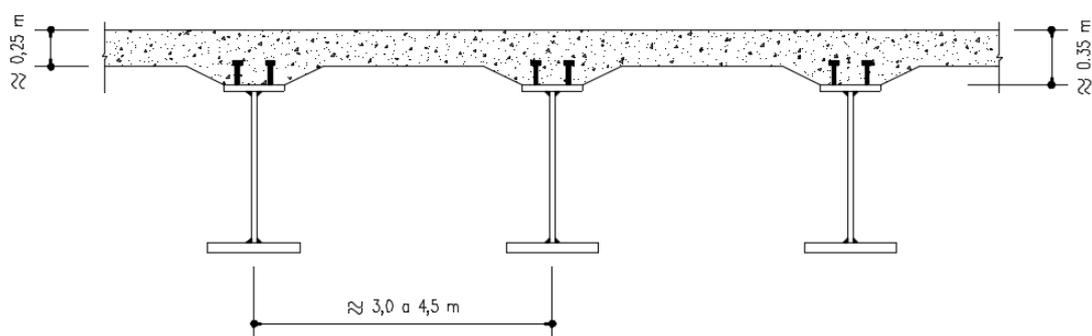
Figura 5.4: Pré-dimensionamento de lajes de betão com espessura variável, em tabuleiros mistos (adaptada de Manterola, 2006).

A Figura 5.5 descreve a relação típica entre as dimensões das consolas e do vão da laje, estabelecidas para evitar grandes desequilíbrios entre os momentos fletores de um e de outro lado dos apoios. Em tabuleiros largos, com consolas superiores a cerca de 5 m, adotam-se normalmente escoras diagonais ou nervuras transversais com afastamento típico de 3 a 4,5 m para sustentar a laje de betão. As consolas são normalmente limitadas a 2,5 m para evitar a necessidade de pré-esforço transversal. Relativamente à distância entre vigas, em tabuleiros multi-viga o afastamento típico é da ordem dos 3 a 4,5 m, enquanto em tabuleiros bi-viga este valor é variável, habitualmente entre 4 e 10 m (Sétra, 2010).

Para a laje de betão armado geralmente adota-se espessuras de 240 mm nas extremidades das consolas, e um máximo de 350 a 450 mm sobre os apoios e um mínimo de 240 mm na laje entre vigas (ver Figura). Para lajes com larguras inferiores a 7 e a 8 m geralmente adota-se uma espessura constante de 250 mm (ver Figura) (Sétra, 2010).

Para este trabalho, os principais dados geométricos a considerar no desenvolvimento da análise comparativa foram os vãos, já definidos, e as secções transversais. No que se refere à secção transversal, o ponto mais importante é o posicionamento das vigas principais.

Quando a distância entre os elementos metálicos é grande, torna-se necessário aumentar a espessura da laje de betão armado, ou em alternativa, adotam-se vigas ou treliças transversais sob o tabuleiro, que dão maior apoio à laje.



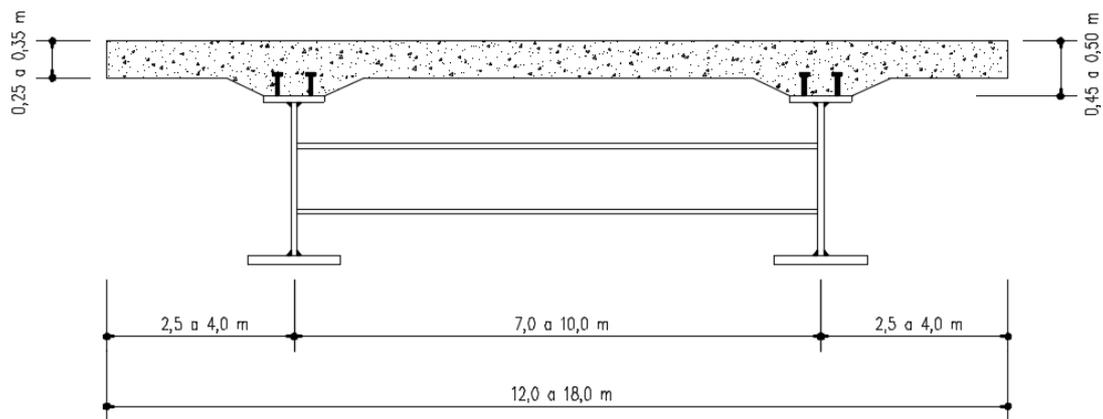


Figura 5.5: Tabuleiro misto em laje vigada de alma cheia: a) multi-viga; b) bi-viga.

O pré-dimensionamento da parte metálica é condicionado pela altura total pretendida para a secção do tabuleiro (a altura da alma depende diretamente deste valor), pelo processo construtivo adotado e pelos fenómenos de instabilidade dos elementos de aço, que limitam, as espessuras das chapas e as suas esbeltezas.

Os banzos são dimensionados para serem totalmente efetivos em estado limite último, sendo de classe 1 ou 2 de acordo com a classificação de secções transversais proposta na norma EN 1993–1-1. Isto conduz à utilização de banzos superiores com espessuras compreendidas entre os 30 mm e os 80 mm e banzos inferiores com espessuras entre 40 e 150 mm. A diferença entre a largura dos banzos é frequente, sendo em geral, o banzo superior constituído por uma chapa com menor área que o banzo inferior. A espessura da alma está condicionada, preponderantemente, pela existência de travamentos longitudinais ou transversais, pelo que não se torna fácil a definição da sua geometria. As almas são dimensionadas para que seja mobilizada a sua resistência de pós-encurvadura. É possível dimensionar estas chapas com esbeltezas da ordem de  $70 < h_w/t_w < 200$ .

Os valores apresentados são indicativos, dada a grande variabilidade de condicionamentos não só ao nível das solicitações, como também ao nível da geometria. No entanto, os limites apresentados são normalmente bastante úteis na conceção inicial de soluções estruturais com tabuleiros mistos.

#### 5.6.1.1 Pré-dimensionamento do tabuleiro

A geometria da secção transversal do tabuleiro é definida a partir de regras de pré-dimensionamento usualmente utilizadas neste tipo de pontes (Sétra, 2010), e que se apresentam a seguir.

- A distância entre o topo das almas aproximadamente a  $0,55L$ , sendo a largura do tabuleiro de  $L = 13,1$  m, ou seja,  $7,205$  m. O valor adotado para a solução foi de  $7,7$  m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

- A altura do perfil metálico está normalmente compreendida entre  $1/24$  e  $1/36$  do respetivo vão sendo o vão máximo, neste caso, igual a  $44$  m. Sendo assim, a altura das almas varia entre  $1,833$  e  $1,222$  m. O valor adotado foi de  $1,8$  m.

- A largura mínima dos banzos inferiores é dada, para tabuleiros de duas vias, pela equação (5.1),

$$b_{inf} = \left(0,25 + \frac{L}{40} + \frac{X}{125}\right) \left(0,92 + \frac{L}{150}\right) \quad (5.1)$$

sendo,

LT – Largura do tabuleiro;

X – Comprimento do vão máximo;

- A largura mínima dos banzos inferiores é de  $0,936$  m, o valor adotado para a solução foi de  $0,94$  m.

- A espessura do banzo inferior está normalmente compreendida entre  $25$  e  $80$  mm. O valor adotado foi de  $40$  mm.

- A largura mínima dos banzos superiores é dada, para tabuleiros de duas vias, pela equação (5.2),

$$b_{sup} = b_{inf} - 0,1 \quad (5.2)$$

sendo,

$b_{inf}$  – Largura dos banzos inferiores;

- A largura mínima dos banzos superiores é de  $0,84$  m, o valor adotado para a solução foi de  $0,7$  m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

- A espessura dos banzos inferiores está normalmente compreendida entre  $25$  e  $80$  mm para tabuleiros de duas vigas. O valor adotado foi de  $30$  mm.

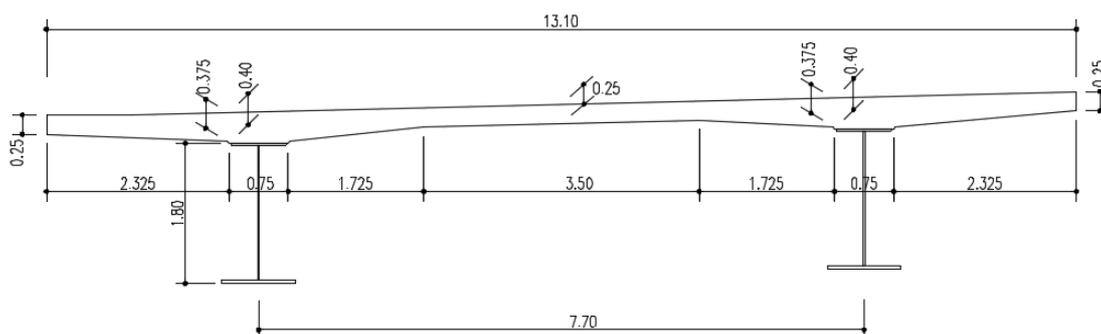


Figura 5.6: Dimensões da secção transversal pré-dimensionada.

### 5.6.1.2 Análise e comparação de resultados

Na Tabela 5.2 indicam-se as cargas de rotura obtidas em tabuleiros mistos de secção bi-viga, para os dois regulamentos considerados, induzidos pela aplicação dos modelos de sobrecarga rodoviária de cada regulamento.

Tabela 5.2: Cargas de rotura obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal bi-viga.

Perfil metálico	Regulamento/Norma	Modelo de sobrecarga rodoviária	Carga máxima
Ponte de referência	RSA	VT	16,7
		SCU+SCL	25,2
	EN 1991-2	VT+SCU	9,9
Ponte com secção pré-dimensionada	RSA	VT	13,8
		SCU+SCL	20,5
	EN 1991-2	VT+SCU	8,3

Sendo,

VT – Veículo tipo;

SCU – Sobrecarga uniformemente distribuída;

SCL – Sobrecarga linearmente distribuída;

Concluiu-se que as soluções mistas em solução bi-viga são competitivas para este tipo de grandeza de vãos. Visto que as soluções bi-viga para viadutos rodoviários, sem limitações especiais de esbelteza  $l/h$ , são em geral vantajosas em custo e facilidade de montagem para uma gama de vãos da ordem dos 40 a 60 m. A generalização a tabuleiros largos,

mesmo para vãos inferiores a 40 m, mas com restrições à altura das vigas pode justificar uma solução multi-viga.

Constata-se, através da Tabela 5.2 que a solução da ponte de referência tem maior capacidade resistente do que a solução de vigas metálicas pré-dimensionadas. Esta diferença é previsível pelo facto de a solução da ponte de referência já ser uma solução otimizada, que inclui verificações à flexão das vigas principais, ao corte, enfunamento, bambeamento e flexão transversal da laje.

Através da análise da Tabela 5.2, constata-se que a carga de rotura originada pelo modelo de sobrecarga rodoviária LM1, definido na EN 1991-2, apresenta um valor mais baixo do que a carga de máxima que resulta da aplicação do modelo de sobrecarga previsto pelo regulamento português. Os valores apresentados na Tabela 5.2 indicam que o aumento da altura do perfil metálico acentua a diferença entre o valor das cargas máximas que é possível aplicar com cada um dos modelos de sobrecarga rodoviários considerados.

## **5.6.2 Tabuleiros em secção multi-viga**

Existem várias formas de fazer um pré-dimensionamento para as vigas metálicas. Aqui optou-se por seguir as dimensões recomendadas por vários projetistas que foram sendo referidos ao longo deste capítulo.

### **5.6.2.1 Solução multi-viga com altura limitada**

Pretende-se tirar o máximo partido da altura das vigas para perceber qual a melhor solução, quando não existem restrições à altura das vigas. Por facilidade de cálculo, a espessura da laje foi considerada constante em toda a largura da secção transversal.

Para realizar a comparação dos efeitos estruturais induzidos pelos modelos de sobrecarga rodoviária resultantes dos dois regulamentos abordados no Capítulo 4, seleccionou-se o caso de estudo de tabuleiros com altura da viga limitada de 1100 mm e perfil laminado. Os perfis laminados podem ser adequados neste tipo de soluções, por comparação com os perfis reconstituídos soldados, devido ao pequeno vão a vencer e à altura reduzida dos perfis.

A solução do tabuleiro da ponte é composta por três vigas longitudinais. As vigas são do tipo I e a solução estudada tem 1100 mm de altura em todos os vãos (Figura 5.7). A secção das vigas mantém-se constante ao longo do seu desenvolvimento.

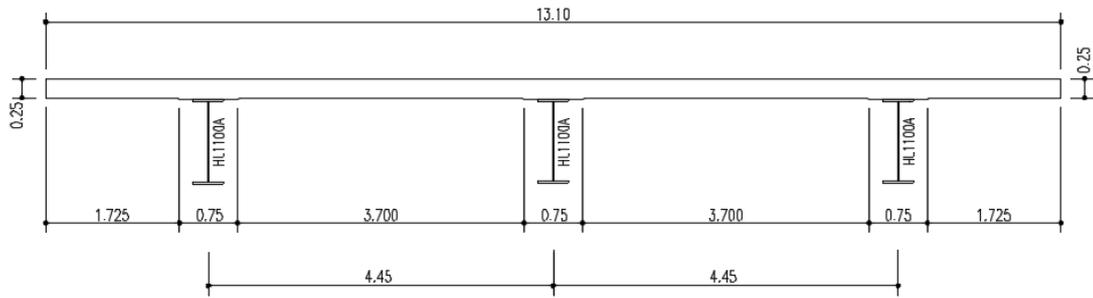


Figura 5.7: Detalhe da seção transversal do tabuleiro em seção multi-viga de três vigas.

A plataforma do tabuleiro (Figura 5.7) é constituída por uma laje de betão armado com uma espessura constante de 0,25 m.

Na Figura 5.8 apresenta-se a solução do tabuleiro da ponte composta por quatro vigas longitudinais. As vigas são do tipo I e a solução estudada tem 1100 m de altura para todos os vãos. A seção das vigas mantém-se constante ao longo do seu desenvolvimento.

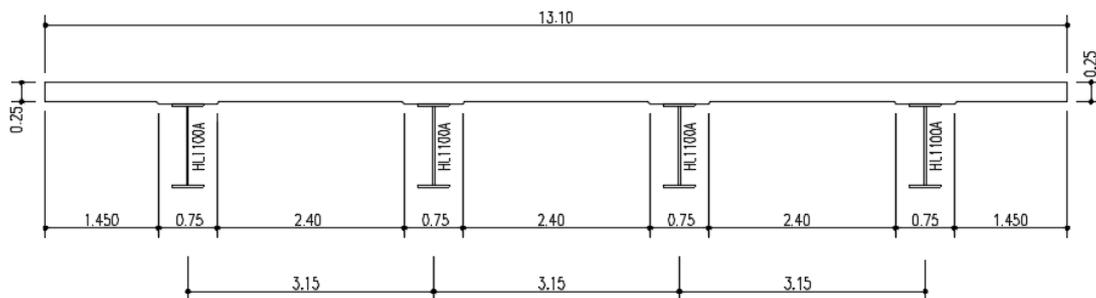


Figura 5.8: Detalhe da seção transversal do tabuleiro em seção multi-viga de quatro vigas.

A plataforma do tabuleiro (Figura 5.8) é constituída por uma laje de betão armado com uma espessura constante de 0,25 m.

### 5.6.2.2 Análise e comparação de resultados

Na Tabela 5.3 indicam-se as cargas máximas obtidas em tabuleiros mistos de seção multi-viga composta por três e por quatro vigas, induzidas pela aplicação dos modelos de sobrecarga rodoviária considerados em cada regulamento,

Tabela 5.3: Cargas máximas obtidas em tabuleiros de pontes com secção transversal multi-viga.

Perfil metálico	Regulamento/Norma	Modelo de sobrecarga rodoviária	Carga máxima
Ponte com 3 vigas HL1100A	RSA	VT	5,4
		SCU+SCL	13,0
	EN 1991-2	VT+SCU	4,4
Ponte com 4 vigas HL1100A	RSA	VT	7,1
		SCU+SCL	20,1
	EN 1991-2	VT+SCU	6,3

sendo,

VT – Veículo tipo;

SCU – Sobrecarga uniformemente distribuída;

SCL – Sobrecarga linearmente distribuída;

Concluiu-se que as soluções mistas em multi-viga não se adequam a este tipo de grandeza de vãos a vencer associada à largura do tabuleiro. Visto que as soluções mistas em multi-viga são usadas para pequenos vãos, até cerca de 25 a 30 m em vãos simplesmente apoiados ou 30 a 40 m em vãos contínuos, isto quando nos referimos a pontes rodoviárias ou ferroviárias, em pontes menos solicitadas, como pontes pedonais, o vão pode ser aumentado. Constata-se, através da Tabela 5.3 que a solução em multi-viga comparativamente às cargas máximas não é uma solução competitiva em relação à solução bi-viga. Atentando aos valores incluídos na Tabela 5.3, pode concluir-se que o aumento do número de vigas metálicas da secção resulta num aumento da capacidade resistente do tabuleiro, tal como seria de esperar.

Foram utilizados perfis laminados com altura limitada a 1100 mm na comparação dos efeitos estruturais induzidos pelos modelos de sobrecarga rodoviária resultantes dos dois regulamentos pelo facto que os perfis laminados têm maior utilização neste tipo de soluções, em relação aos perfis reconstituídos soldados, devido ao pequeno vão a vencer e à altura reduzida dos perfis.

Também foi concluído através da análise da Tabela 5.3, que a carga máxima originada pelo modelo de sobrecarga rodoviária LM1, definido na EN 1991-2, produz efeitos mais desfavoráveis do que o modelo de sobrecarga previsto pelo regulamento português.

### 5.6.3 Tabuleiros em secção caixão

O pré-dimensionamento da estrutura metálica de tabuleiros em caixão é semelhante ao adotado para os tabuleiros bi-viga. A largura dos banzos superiores está, em geral, compreendida entre 600 a 1000 mm, e a sua espessura entre 25 a 150 mm, devendo-se respeitar o mesmo critério que foi usado no pré-dimensionamento dos banzos das vigas II (Sétra, 2010). O banzo inferior, pelo elevado valor da sua largura, é habitualmente reforçado com perfis soldados na direção longitudinal e com afastamento tal que garanta que toda a secção do banzo é efetiva em estado limite último.

#### 5.6.3.1 Pré-dimensionamento do tabuleiro

A geometria da secção transversal do tabuleiro é definida a partir das regras de pré-dimensionamento usualmente utilizadas neste tipo de pontes (Sétra, 2010):

- A distância entre o topo das almas normalmente compreendida entre  $0,50$  a  $0,55L$ , sendo a largura do tabuleiro de  $LT = 13,1$  m, ou seja,  $6,55$  a  $7,205$  m. O valor adotado para a solução foi de  $7,7$  m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

- A altura das almas está normalmente compreendida entre  $1/40$  e  $1/30$  do respetivo vão sendo o vão máximo, neste caso, igual a  $44$  m. Sendo assim a altura das almas varia entre  $1,1$  e  $1,467$  m. O valor adotado foi de  $1,3$  m.

- A inclinação das almas está normalmente compreendida entre  $0$  e  $50\%$ . O valor adotado foi de  $40\%$ , o que equivale a um ângulo com a vertical de aproximadamente de  $22^\circ$ .

- A espessura das almas está normalmente compreendida entre  $16$  a  $35$  mm. O valor adotado para as zonas do vão e do apoio foi de  $30$  mm.

- Dada a distância entre o topo das almas e a sua inclinação e depois de ajustes para permitir uma boa ligação entre estas e o banzo inferior, o valor adotado para a largura do banzo inferior foi de  $6,882$  m.

- A espessura do banzo inferior está normalmente compreendida entre  $25$  e  $80$  mm. O valor adotado foi de  $40$  mm.

- A largura mínima dos banzos superiores é dada, para tabuleiros de duas vias, pela equação (5.5),

$$b_{tf} = \left(0,25 + \frac{LT}{40} + \frac{X}{125}\right) \left(0,92 + \frac{LT}{150}\right) \quad (5.5)$$

sendo,

LT – Largura do tabuleiro;

X – Comprimento do vão máximo;

- A largura mínima dos banzos inferiores é de 0,936 m, o valor adotado para a solução foi de 0,7 m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

- A espessura dos banzos inferiores está normalmente compreendida entre 25 e 80 mm para tabuleiros de duas vigas. O valor adotado foi de 30 mm.

- Não foram adotados reforços longitudinais para o banzo inferior.

- A espessura da laje de betão sobre os apoios é dada pela equação (5.6),

$$D = 0,13 + \frac{(LT - L)}{26} \quad (5.6)$$

sendo,

LT – Largura do tabuleiro;

L – Distância entre topos de almas;

- A espessura da laje de betão sobre os apoios é de 0,34 m, o valor adotado para a solução foi de 0,35 m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

- A espessura da laje de betão entre vigas é dada pela equação (5.7),

$$D = 0,12 + \frac{L}{50} \quad (5.7)$$

sendo,

L – Distância entre topos de almas;

- A espessura da laje de betão sobre os apoios é de 0,27 m, o valor adotado para a solução foi de 0,25 m de modo a usar a laje de betão prevista na ponte de referência.

Na Figura 5.9, apresentam-se as dimensões da secção transversal do tabuleiro, com base no pré-dimensionamento desenvolvido nesta secção.

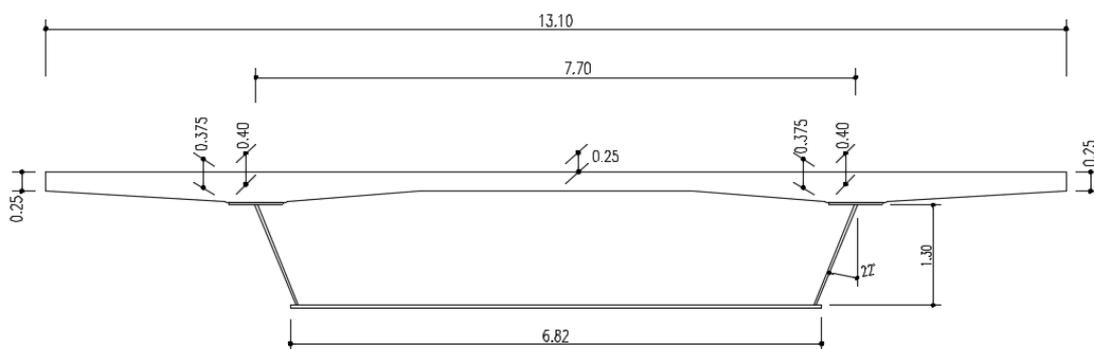


Figura 5.9: Dimensões da secção transversal do tabuleiro com secção em caixão.

### 5.6.3.2 Análise e comparação de resultados

Na Tabela 5.4 apresentam-se as cargas máximas obtidas em tabuleiros mistos com secção caixão, e considerando os modelos de sobrecarga propostos no RSA e na EN 1991-2,

Tabela 5.4: Cargas de rotura obtidas em tabuleiros de pontes em secção transversal caixão.

Perfil metálico	Regulamento/Norma	Modelo de sobrecarga rodoviária	Carga máxima
Ponte com secção pré-dimensionada	RSA	VT	13,6
		SCU+SCL	22,4
	EN 1991-2	VT+SCU	9,3

sendo,

VT – Veículo tipo;

SCU – Sobrecarga uniformemente distribuída;

SCL – Sobrecarga linearmente distribuída;

Quando se comparam as cargas máximas, concluiu-se que a solução em caixão monocelular se torna competitiva em relação à solução bi-viga da ponte de referência. No entanto, a solução em caixão é recomendável para vãos acima de 60 ou 70 m, que começam a ser altamente competitivas em relação às soluções bi-viga. Através da análise da Tabela 5.5, constata-se que o modelo de sobrecarga rodoviária LM1, definido na EN 1991-2, produz efeitos mais desfavoráveis do que o modelo de sobrecarga previsto pelo regulamento português.

## 5.7 Estimativa de custos

Nesta secção, é feita uma estimativa de custo do tabuleiro concebido com secção bi-viga, multi-viga e caixão. Existem vários procedimentos para estimar o valor deste custo. Um deles, utilizado nesta análise, é o “custo por unidade de medida”, em que se multiplica a quantidade de material utilizado (em kg) pelo seu custo unitário (em €/kg).

Na análise realizada, a diferença de custo é essencialmente focada no custo da estrutura metálica, uma vez que os outros materiais (betão, etc) terão custos aproximadamente iguais nas diferentes soluções.

A estimativa do custo do tabuleiro é apresentada nas tabelas seguintes, em que o valor do custo unitário do aço foi fornecido por uma empresa do setor metalomecânico e corresponde ao valor correntemente utilizado no mercado português para obras deste tipo. Considera-se que o preço dos perfis laminados é igual ao preço dos perfis reconstituídos soldados, porque apesar dos perfis reconstituídos soldados requererem trabalho de soldadura, esse valor é compensado pelo preço inferior do aço em chapa.

A Tabela 5.5 apresenta o custo unitário dos materiais utilizados em cada tabuleiro e respetivo custo total.

Tabela 5.5: Custo unitário e total dos tabuleiros.

<b>Perfil metálico</b>	<b>Material</b>	<b>UN</b>	<b>Custo unitário [€/UN]</b>	<b>Custo total [€]</b>
Ponte referência	reconstituído soldado S355	kg	1,03	363106,5
Ponte com secção bi-viga pré-dimensionada	reconstituído soldado S355	kg	1,03	310439,2
Ponte com 3 vigas HL1100A	Aço laminado S355	kg	1,03	221181,4
Ponte com 4 vigas HL1100A	Aço laminado S355	kg	1,03	294908,5
Ponte com secção caixão pré-dimensionada	reconstituído soldado S355	kg	1,03	654187,4

Na Figura 5.10 apresenta-se o rácio entre a capacidade resistente obtida para as várias tipologias e a capacidade resistente da solução de referência, bem como o rácio entre o custo obtido nas várias tipologias e o custo da solução de referência.

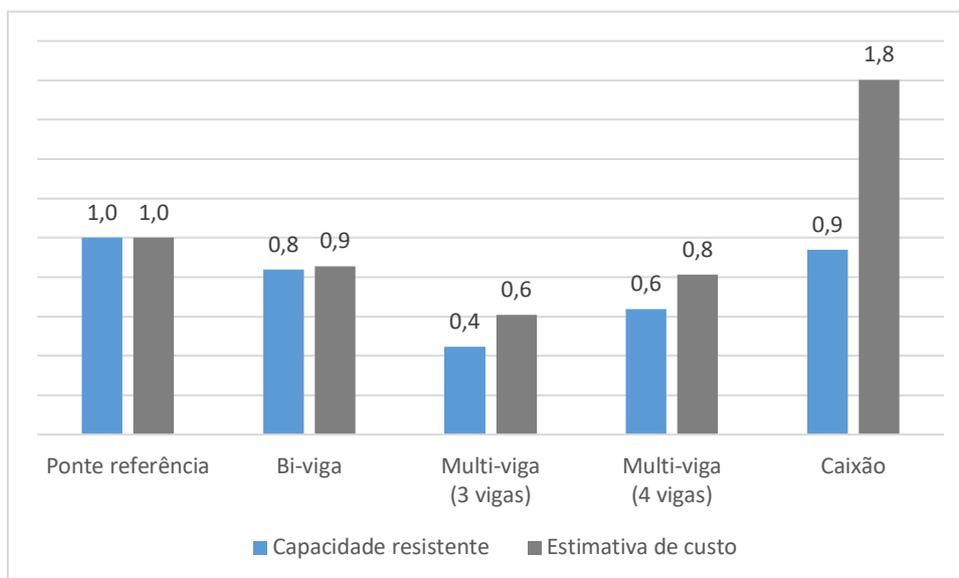


Figura 5.10: Rácio da capacidade resistente e estimativa de custo em relação à ponte referênciã.

Constatou-se que a solução que mais se aproxima da capacidade resistente da ponte referênciã era a secção em caixão, mas em termos de estimativa de custo, esta solução torna-se desfavorável. A estimativa de custo da secção em caixão é 1,8 vezes superior à estimativa de custo da secção da ponte de referênciã. Tendo em conta que as principais desvantagens dos caixões unicelulares se encontram na dificuldade de fabrico em especial na limitação ao transporte pela largura (caixões com largura  $b$  superior a 4,0 m). A solução para  $b > 4,0$  m consiste em transportar dois meios caixões e efetuar, em obra, uma soldadura longitudinal no banzo inferior, o que constitui o maior inconveniente da solução.

Concluiu-se que a solução multi-viga composta com três vigas tem o menor custo, mas a sua capacidade resistente comparada com a solução da ponte referênciã é muito inferior o que torna esta solução desinteressante.

Também foi concluído que a secção bi-viga pré-dimensionada tem um custo menor relativamente à solução de referênciã, mas em termos de capacidade resistente é menor e por isso tornou-se numa solução desinteressante.

Uma sugestão para reduzir a quantidade de aço estrutural poderia passar pela adição de uma laje inferior de betão armado num tabuleiro misto e simultaneamente conduzir a uma resistência última à flexão igual ou superior à da secção mista convencional.

No caso do tabuleiro tipo bi-viga, pela largura relativamente reduzida do banzo inferior, a possível redução da quantidade de aço na estrutura não é tão significativa como o aumento da resistência aos momentos flectores negativos, e da rigidez, que se consegue com a introdução da laje inferior, mesmo sem aumento da altura da secção.

Quanto aos tabuleiros em caixão, em que o banzo inferior tem, geralmente, uma largura significativa, a introdução da laje inferior de betão armado pode conduzir a poupanças significativas na quantidade de aço estrutural utilizado, quer por redução da espessura da chapa de banzo quer, especialmente, pela supressão de boa parte dos reforços necessários. No entanto, quando a redução de aço no banzo inferior for elevada, para manter a resistência última à flexão torna-se necessário introduzir uma laje inferior de espessura razoável.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões do trabalho efetuado

Como conclusão da dissertação, apresentam-se de seguida algumas reflexões consideradas pertinentes e que de alguma forma espelham as preocupações que acompanharam este trabalho, para além de resumirem as principais conclusões que dele se retiraram.

A partir dos objetivos referidos no início deste trabalho, pode-se afirmar que a ferramenta desenvolvida permite, de forma clara, realizar as diferentes análises propostas para avaliar a capacidade de carga de pontes mistas aço-betão.

No Capítulo 2 foi apresentado o estado da arte sobre a avaliação da capacidade de carga de pontes mistas aço-betão. Foram ainda descritos alguns dos aspetos sobre tipologias de tabuleiros mistos utilizados em diversos projetos com secções transversais: *i)* do tipo bi-viga, *ii)* em multi-viga; *iii)* em caixão; e *iv)* em treliça mista. Introduziu-se o conceito da largura efetiva do banzo de betão e as principais regras de classificação da secção transversal responsáveis pela consideração da encurvadura local de partes do perfil de aço.

Também foram apresentados os princípios fundamentais referentes à análise plástica, assim como a análise elástica linear de secções transversais de vigas mistas utilizada pelos regulamentos atuais. Relativamente à análise transversal de vigas mistas, apresentaram-se as considerações que permitem calcular os esforços resistentes e os diversos métodos de quantificação dos esforços resistentes. Ainda neste capítulo, foram apresentados os diversos modelos de sobrecargas preconizados nas normas que deverão ser tidos em conta para o dimensionamento de pontes rodoviárias e ferroviárias.

No final do Capítulo, referiu-se, de breve modo, a exemplos de pontes e viadutos mistos em Portugal. Apresentaram-se alguns projetos realizados nos últimos anos, que mostram as potencialidades dos tabuleiros mistos em pontes.

No Capítulo 3 foi descrita a ferramenta desenvolvida para análise transversal de secções mistas aço-betão e quais os recursos utilizados para tal, estabelecendo uma estrutura e descrevendo todas as funcionalidades da ferramenta. Posteriormente apresenta-se a validação da ferramenta desenvolvida.

Todas as partes integrantes da ferramenta foram sujeitas a uma análise cuidada e todas assumiram um comportamento dentro do esperado, validando desta forma a metodologia e a ferramenta desenvolvida. É então possível afirmar que os resultados obtidos foram de encontro ao que seria expectável, tendo sido cumpridos os objetivos do trabalho.

Ainda neste capítulo foi descrito o *software Matlab*, que foi utilizado na conceção da ferramenta. Foi ainda descrita uma introdução ao ambiente de trabalho do *Matlab*, onde se exploram os conceitos básicos necessários para as primeiras experiências com a ferramenta.

A validação da ferramenta envolveu a comparação dos valores da largura efetiva do banzo de betão, posição do eixo neutro e momentos fletores resistentes, determinados a partir da ferramenta desenvolvida e os valores baseados em exemplos de cálculo, concluindo-se que as diferenças eram insignificantes.

A ferramenta pode ser utilizada para simples avaliação da resistência de flexão de secções transversais, ou para avaliar capacidade de carga de pontes mistas. A ferramenta foi desenvolvida pela metodologia de cálculo de secções transversais mistas previstas as normas EN 1993-1-1 e EN 1994-1-1. Ao utilizador basta introduzir os dados da secção mista para que o cálculo seja efetuado de forma simples e rápida.

Um aspeto importante desta ferramenta é o facto de integrar um grande conjunto de funções, organizadas segundo diferentes áreas de cálculo. Outro aspeto que faz da ferramenta uma aplicação útil é o facto de permitir criar facilmente secções transversais, dos mais diversos tipos, com grande flexibilidade no modo de configurar aspetos relacionados com as características geométricas e mecânicas.

A ferramenta calcula qualquer tipo de secção transversal formada por bi-viga, multi-viga com 3 ou 4 vigas, caixão e duplo-caixão. A introdução de dados consiste basicamente na definição das características geométricas e mecânicas da secção transversal. O utilizador pode modificar qualquer tipo de dados sempre que o desejar. Terminada a introdução de dados é efetuado o cálculo.

Outra das grandes vantagens do uso da ferramenta diz respeito à determinação da largura efetiva do banzo de betão nas diferentes zonas de uma viga mista contínua ou simplesmente apoiada, classificar secções transversais e determinar o valor do momento fletor resistente plástico e elástico. A ferramenta está apta para analisar tabuleiros com diferentes esquemas estruturais (viga mista contínua ou simplesmente apoiada).

Outra vantagem substancial do uso da ferramenta diz respeito à capacidade de dividir a secção transversal em camadas para determinar a posição do eixo neutro, bastando ao utilizador introduzir o número pretendido de divisões para cada elemento da secção transversal.

A partir da ferramenta, podem ser extraídas todas as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. A ferramenta também permite verificar a capacidade resistente de secções da classe 4, tendo programada uma metodologia que permite aplicar o “método aproximado” para considerar flexão composta em torno do eixo de maior inércia.

Na ferramenta, é possível adicionar chapas de aço de reforço nos banzos e na alma do perfil metálico, e em seguida classificar as secções transversais e determinar o valor do momento fletor resistente.

De forma a garantir a correto funcionamento da ferramenta, foi implementada uma série de avisos e mensagens que são ativados quando o utilizador introduz os dados incorretamente. Este controlo rigoroso sobre os dados que são introduzidos representa uma mais-valia fundamental da ferramenta.

Os exemplos incluídos neste capítulo pretendem não só resolver situações concretas, mas também, dentro do possível, descrever o uso das diferentes opções da função ou funções que sirvam de pretexto ao exemplo, bem como adequar essas funções a outras situações.

No capítulo 4 descreveu-se o desenvolvimento e implementação da ferramenta do módulo de análise longitudinal de tabuleiros mistos em aço e betão, justificando-se as diversas opções tomadas e apresentando-se exemplos de verificação para validação dos resultados obtidos. Foram ainda descritos os aspetos referentes aos diversos modelos de sobrecargas preconizados nas normas para o dimensionamento de novas estruturas utilizadas no processo de determinação da carga de rotura através da aplicação do teorema cinemático.

A ferramenta apresenta várias capacidades que a tornam muito útil, como por exemplo, efetua uma análise do efeito da alternância de sobrecargas, com base no cálculo de linhas de influência de momentos fletores, de forma a determinar a colocação da sobrecarga na posição (ou posições) mais desfavorável, maximizando o efeito (ou esforço) que se pretende analisar.

Uma das grandes vantagens do uso da ferramenta diz respeito à análise longitudinal do tabuleiro que considera a deslocação do veículo/comboio-tipo, tendo em consideração incrementos de distância pré-definidos pelo utilizador. Outra vantagem da ferramenta é a

capacidade de registar às ações relacionadas com o tráfego rodoviário e ferroviário que atua sobre a ponte.

Um aspeto importante desta ferramenta é o facto integrar um conjunto de variáveis parametrizadas, organizadas segundo diferentes áreas de cálculo. O utilizador pode regular as variáveis, garantindo a utilidade desta ferramenta para diferentes âmbitos, desde alteração da configuração dos modelos de sobrecargas preconizados nas normas.

O utilizador pode enriquecer a ferramenta criando as suas próprias funções ou estendendo as existentes.

Outro aspeto aliciante da ferramenta é o facto de permitir estimar o custo do tabuleiro da ponte, recorrendo a dados introduzidos na análise da secção transversal, bastando ao utilizador introduzir os dados dos custos unitários dos materiais utilizados na secção mista, para que o cálculo seja efetuado de forma simples e rápida.

A introdução dos dados para a análise transversal e longitudinal de pontes mistas são desenvolvidos em diferentes ficheiros, independentes entre si e posteriormente agrupados num único ficheiro que concerne a relação entre as partes.

A ferramenta tem implementada uma série de avisos e mensagens que são ativados quando o utilizador introduz os dados incorretamente. A garantia deste rigor representa uma mais-valia fundamental da ferramenta.

Podem ser comparadas e analisadas diferentes soluções mistas, que podem ainda ser otimizadas, constituindo assim uma mais-valia para qualquer projetista. A vantagem de utilizar esta aplicação na análise da capacidade de carga é que esta foi especificamente desenvolvida para trabalhar com esses processos, contendo todas as funcionalidades necessárias para simular e otimizar soluções.

No Capítulo 5 foi apresentada a análise comparativa de diferentes soluções baseada em parâmetros de carga máxima e estimativa de custo do tabuleiro. Foram ainda descritos os aspetos referentes às técnicas de pré-dimensionamento de secções transversais mistas utilizadas no processo de busca da solução ótima.

O caso de estudo foi o viaduto rodoviário sobre o rio Sousa, uma ponte de tabuleiro misto constituída por quatro vãos de 44 m e um vão extremo de 26 m, localizada na A43, que realiza a ligação entre Gondomar e Aguiar de Sousa (IC24).

A análise envolveu uma comparação de cargas máximas entre a solução da ponte de referência e de soluções pré-dimensionadas, com base nos modelos de sobrecarga do

Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) e do Eurocódigo 1 (EN 1991-2-2003).

Foi posteriormente realizada uma comparação de custos entre tabuleiros com duas vigas em perfis I reconstituídos soldados e tabuleiros com secção em caixão. Após o pré-dimensionamento de soluções para os diferentes tabuleiros, foram registadas as quantidades de aço da estrutura metálica, uma vez que os outros materiais (betão, etc) terão custos aproximadamente iguais nas diferentes soluções. Recorrendo a preços de mercado foram realizadas e comparadas estimativas do custo da estrutura metálica para as diferentes soluções.

Concluiu-se para a grandeza dos vãos a vencer associada à largura do tabuleiro da ponte tornou a solução bi-viga a mais adequada para este tipo de pontes. Os tabuleiros em secção bi-viga para viadutos rodoviários, sem limitações especiais de esbelteza  $l/h$ , são em geral imbatíveis em custo e facilidade de montagem para uma gama de vãos da ordem dos 40 a 60 m. A generalização a tabuleiros largos, mesmo para vãos inferiores a 40 m, mas com restrições à altura das vigas pode justificar uma solução multi-viga.

Constatou-se também que a solução da ponte de referência comparada com a solução de vigas metálicas pré-dimensionadas tem maior capacidade resistente. Esta diferença é previsível pelo facto de a solução da ponte de referência já ser uma solução ótima, com verificações à flexão das vigas principais, ao corte, enfunamento, bambeamento e flexão transversal da laje.

Também foi concluído que as soluções mistas em multi-viga não se adequam a este tipo de grandeza de vãos a vencer associada à largura do tabuleiro. Estas soluções são usadas para pequenos vãos, até cerca de 25 a 30 m em vãos simplesmente apoiados ou 30 a 40 m em vãos contínuos, isto quando nos referimos a pontes rodoviárias ou ferroviárias, em pontes menos solicitadas, como pontes pedonais, o vão pode ser aumentado. Os perfis laminados têm maior utilização neste tipo de soluções, em relação aos perfis reconstituídos soldados, devido ao pequeno vão a vencer e à altura reduzida dos perfis.

Constatou-se que a solução em caixão monocelular relativamente às cargas máximas torna-se competitiva em relação à solução bi-viga, mas contrariamente à estimativa de custo é uma solução economicamente desfavorável. Visto que esta solução para vãos acima de 60 ou 70 m, começam a ser altamente competitivas em relação às soluções bi-viga. A grande vantagem deste tipo de tabuleiro é a sua eficiência estrutural para absorção dos momentos fletores negativos elevados nas secções de apoio (tabuleiros em viga

contínua com vãos superiores a 50 a 60 m), rigidez de torção (diretrizes curvas) e possibilidade de aumento da esbelteza  $l/h$  em relação aos tabuleiros bi-viga (restrições de gabarit vertical e estética-viadutos urbanos). A maior dificuldade de fabrico em especial a limitação ao transporte pela largura (caixões com largura  $b$  superior a 4,0 m) são as principais desvantagens dos caixões unicelulares. A solução para  $b > 4,0$  m consiste em transportar dois meios caixões e efetuar, em obra, uma soldadura longitudinal no banzo inferior, o que constitui o maior inconveniente da solução.

Uma sugestão para reduzir a quantidade de aço estrutural poderia passar pela adição de uma laje inferior de betão armado num tabuleiro misto e simultaneamente conduzir a uma resistência última à flexão igual ou superior à da secção mista convencional.

No caso do tabuleiro tipo bi-viga, pela largura relativamente reduzida do banzo inferior, a possível redução da quantidade de aço na estrutura não é tão significativa como o aumento da resistência aos momentos fletores negativos, e da rigidez, que se consegue com a introdução da laje inferior, mesmo sem aumento da altura da secção.

Quanto aos tabuleiros em caixão, em que o banzo inferior tem, geralmente, uma largura significativa, a introdução da laje inferior de betão armado pode conduzir a poupanças significativas na quantidade de aço estrutural utilizado, quer por redução da espessura da chapa de banzo quer, especialmente, pela supressão de boa parte dos reforços necessários. No entanto, quando a redução de aço no banzo inferior for elevada, para manter a resistência última à flexão torna-se necessário introduzir uma laje inferior de espessura razoável.

Do ponto de vista das ações rodoviárias, constatam-se diferenças significativas, entre os regulamentos, tanto ao nível do procedimento de aplicação como ao nível da intensidade das cargas. Aliás, o estudo comparativo efetuado no Capítulo 5, entre os modelos de sobrecarga rodoviária propostos pelo RSA e pelo EN 1991-2, recorrendo a um caso de estudo, demonstrou, efetivamente, uma maior exigência de segurança imposta pelo modelo de sobrecarga descrito na norma europeia, pois os esforços resultantes da sua aplicação são significativamente superiores aos esforços resultantes do modelo do RSA.

Os resultados obtidos, na análise longitudinal, permitiram concluir que, com base num caso de estudo pré-definido, a aplicação do modelo de sobrecarga rodoviário LM1 definido na EN 1991-2 resulta em esforços atuantes mais elevados em todas as situações avaliadas, resultando numa maior exigência de segurança quando o dimensionamento é efetuado com este regulamento.

Mesmo num mercado onde as estruturas de betão são tradicionalmente as preferidas, as pontes mistas apresentam características que as tornam muitas vezes na melhor solução: processos construtivos mais simples, prazos de construção mais curtos, leveza da estrutura.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Este trabalho, apesar de respondido aos objetivos a que se propunha, abriu portas para desenvolvimentos futuros, tais como:

- Análise plástica e elástica linear de secções transversais de vigas mistas para determinação do valor do esforço transversal resistente, e consequente interação entre o momento fletor e o esforço transversal;
- Adaptação do mesmo processo para secções em betão pré-esforçado ou outras secções mistas (ex. betão-madeira, betão CFRP, etc.);
- Análise de segurança de estruturas mistas por aproximação numérica, utilizando técnicas de simulação, como a técnica de simulação de *Monte Carlo*, ou por métodos de Fiabilidade de Primeira Ordem - *FORM (First Order Reliability Methods)*.

## REFERÊNCIAS

- Almeida P.M.N. (2013) Cálculo de esforços em tabuleiros de pontes de tirantes durante a fase construtiva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 3-40.
- Alves M.P.D.C. (2015) Modelação de sobrecargas rodoviárias. Estudo comparativo entre diferentes normas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, pp. 35-54.
- Bastos R. (2015) Pontes Cândio Martins, Apontamentos de apoio às aulas teóricas da disciplina de Pontes do curso de Engenharia Civil no Perfil de Estruturas, Universidade do Minho, Portugal.
- Bastos R. (2015) Pontes em Arco, Apontamentos de apoio às aulas teóricas da disciplina de Pontes do curso de Engenharia Civil no Perfil de Estruturas, Universidade do Minho, Portugal.
- Bastos R. (2015) Tipologias e Sistemas Estruturais, Apontamentos de apoio às aulas teóricas da disciplina de Pontes do curso de Engenharia Civil no Perfil de Estruturas, Universidade do Minho, Portugal.
- Brandão M.M.T.A.N. (2015) Estudo de pontes com tabuleiro misto aço-betão em caixão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 12-20.
- C. R. Hendy and R. P. Johnson (2006) Designer's Guide to EN 1994-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges, Series editor Haig Gulvanessian.
- Calado C.M.C. (2011) Conceção estrutural das pontes de tirantes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, pp. 5-17.
- Calado, L. e Santos, J. (2013) Estruturas Mistas de Aço e Betão - 2ª Edição, IST Press, Lisboa. DL: 366567/13, ISBN: 978-972-846-984-9, pp. 108-258.
- Cid E.J.M. (2009) Projeto do tabuleiro de uma ponte mista com 115 m de vão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 2.3-2.15.

- Costa G.A.L. (2008) Resistência última à flexão de tabuleiros mistos aço-betão considerando o faseamento construtivo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 10-57.
- Dalmau, M.R. e Vilardell J. (2003) Análisis plástico de estructuras. Introducción, Ediciones UPC, Barcelona. ISBN: 978-8483017203.
- EN 1994-2 (2005), Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures- Part 2: General rules and rules for bridges, CEN European Committee for Standardization, Brussels.
- Ferraz A.M.S. (2009) Dimensionamento ótimo de pontes mistas rodoviárias de pequeno vão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 24-51.
- Ferreira C.M.N.O. (2010) Estudo prévio de uma ponte ferroviária sobre o rio Douro com tabuleiro misto aço-betão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 3-80.
- Guimarães J.A.T. (2009) Análise e Dimensionamento de pórticos mistos aço-betão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 11-45.
- Jaspart J-P and Weynand K. (2016) Design of Joints in Steel and Composite Structures, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. DL: 405451/16, ISBN: 978-92-9147-132-4.
- Lança J.P.B. (2016) Análise dinâmica de pontes para ferrovias de alta velocidade de acordo com o Eurocódigo 1-Parte 2, Estudo de caso prático. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, pp. 37-45.
- LisConcebe (2009) A43 – Gondomar / Aguiar de Sousa (IC24), Projeto de Execução, Obras de Arte Especiais, Ponte sobre Rio Sousa II (Alteração da Metodologia Construtiva), Memória Descritiva e Justificativa, Relatório Técnico, pp. 4-7.
- LisConcebe (2009) A43 – Gondomar / Aguiar de Sousa (IC24), Projeto de Execução, Obras de Arte Especiais, Ponte sobre Rio Sousa II (Alteração da Metodologia Construtiva), Projeto de Execução, Memória de Cálculo, Relatório Técnico, pp. 1-24.

- LisConcebe (2010) A43 – Gondomar / Aguiar de Sousa (IC24), Peças Escritas e Desenhadas, Ponte sobre Rio Sousa II.
- Malveiro J.P.C. (2009) Comportamento estrutural de uma ponte em arco treliçado em aço e tabuleiro em betão armado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 5-20.
- Manterola, J. (2006) Puentes – Apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Editorial: Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid. ISBN: 978-8438003237.
- Marques F.M.S. (2006) Avaliação do comportamento estrutural e análise de fadiga em pontes metálicas ferroviárias. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 3.1-3.7.
- Matos J. (2012) Uncertainty Evaluation of Reinforced Concrete and Composite Structures Behavior - Avaliação de Incertezas no Comportamento de Estruturas de Betão Armado e Mistas, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.
- Mendes T.A.A. (2010) Tabuleiros mistos aço-betão com dupla ação mista. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 3-75.
- Morais, V. e Vieira, C. (2015) MATLAB: Curso Completo, FCA – Editora de Informática, Lda., Lisboa. DL: 353412/13, ISBN: 978-972-722-705-1.
- NP EN 1993-1-1 (2010) Eurocódigo3, Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios.
- NP EN 1993-1-5 (2012) Eurocódigo3, Projeto de estruturas de aço - Parte 1-5: elementos estruturais constituídos por placas.
- NP EN 1994-1-1 (2011) Eurocódigo4, Projeto de estruturas mistas aço-betão - Parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios.
- Nunes M.A.O. (2014) Dimensionamento de pontes rodoviárias de betão armado e pré-esforçado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de engenharia, Universidade Católica Portuguesa, Portugal, pp. 17-25.
- Pedro, J.O. e Reis, A. (2011) Concepção e construção de pontes atirantadas com tabuleiro misto aço-betão, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, n.º 9, Junho 2011, pp. 15-29.

- Pinheiro R.M.R. (2013) *Análise não linear 3D do Viaduto Misto sobre o rio Sousa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, pp. 9-33.
- Pinto F. (2009) *Larguras efetivas em vigas mistas submetidas a diferentes tipos de carregamento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 5-13.
- Reis, A. e Camotim D. (2012) *Estabilidade e Dimensionamento de Estruturas*, Edições Orion, Amadora. DL: 342227/12, ISBN: 978-972-8620-19-6, pp. 476-481.
- Reis, A.J. (2011) *Construção Metálica. Pontes Metálicas e Mistas*, Construção Magazine, Revista Técnico-Científica Engenharia Civil, n.º 46, Novembro/Dezembro 2011, DL: 164778/01, ISSN: 1645-1767, pp. 11-14.
- Reis, A.J. e Pedro, J.J.O (2016) *Reabilitação e Construção em Aço. Pontes Ferroviárias com Tabuleiro Misto Aço-Betão*, Construção Magazine, Revista Técnico-Científica Engenharia Civil, n.º 76, Novembro/Dezembro 2016, DL: 164778/01, ISSN: 1645-1767, pp. 27-31.
- Ribeiro D.R.F. (2004) *Comportamento dinâmico de pontes sob ação de tráfego ferroviário a alta velocidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 2.1-2.35.
- Rocha C.M.G. (2017) *Influência do método de cálculo da largura efetiva no dimensionamento de estruturas mistas aço-betão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 3-33.
- RSA (2017) *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*, Porto Editora, Porto. DL: 421357/17, ISBN: 978-972-0-00049-1, pp. 45-51.
- Saraiva M.F.O. (2013) *Efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias definidas nas normas mais utilizadas pela engenharia portuguesa em tabuleiros de betão de nervura única e em caixão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, pp. 5-24.
- Sétra (2007) *Eurocodes 3 and 4, Application to steel-concrete composite road bridges*, Ministère de L'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.

- Sétra (2010) Steel – Concrete composite bridges sustainable design guide, Ministère de L'Écologie, de L'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Silva D.A.O.F. (2008) Dimensionamento de tabuleiros de pontes mista de vãos superiores a 100 m com vigas metálicas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, pp. 39-79.
- Simões da Silva, L. e Gervásio, H. (2007) Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados, Coleção Construção Metálica e Mista, cmm Press, Coimbra. DL: 370098/14, ISBN: 978-972-98376-8-5, pp. 51-58.
- Simões, R. (2014) Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas - 3ª Edição, Coleção Construção Metálica e Mista, cmm Press, Coimbra. DL: 370098/14, ISBN: 978-989-95605-9-8, pp. 51-58.
- Valente I. (2012) Vigas Mistas em Aço e Betão, Apontamentos de apoio às aulas teóricas da disciplina de Estruturas Pré-esforçadas e Mistas do curso de Engenharia Civil no Perfil de Estruturas, Universidade do Minho, Portugal.
- Videira O.P.S.O. (2009) Tabuleiros de pontes em treliça mista. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 4-29.
- Videira O.P.S.O. (2009) Tabuleiros de pontes em treliça mista. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, pp. 4-29.

## 7 ANEXOS

### 7.1 ANEXO A – Funções do programa

Este tópico descreve os tipos de ficheiros-M utilizados para o desenvolvimento da ferramenta.

- `mainCalculoVigasMistas.m`: funciona como centro de comando do programa. Efetua chamadas às outras funções, bem como o pré-condicionamento e a resolução do sistema governativo. É um ficheiro-M do tipo script é muito útil para realizar tarefas que envolvam a execução de muitas instruções. Para ser invocado, deve escrever-se o seu nome na janela de comandos, sem a extensão ‘.m’. Para proceder à execução, basta seleccionar como diretoria atual a diretoria onde o ficheiro-M reside e escrever na linha de comandos `mainCalculoVigasMistas`.
- `inputFile_Cross_section.m`: funciona como ficheiro de entrada de dados da ferramenta, onde o utilizador insere todos os dados sobre a secção transversal em estudo. É um ficheiro-M do tipo script, para proceder à sua execução, basta indicar o seu nome na variável `inputdata.inputfilenames` existente no ficheiro `inputFile_PS.m`. Este ficheiro está explicado detalhadamente no capítulo 3.
- `inputFile_PS.m`: funciona como ficheiro de entrada de dados da ferramenta, onde o utilizador insere os dados da ponte em estudo. É um ficheiro-M do tipo script, efetua chamada(s) do(s) ficheiro(s) de input dados de secções transversais descritos no tópico anterior. Este ficheiro está explicado detalhadamente no capítulo 3.
- `inputFile_charge`: funciona como ficheiro de entrada de dados da ferramenta, onde o utilizador insere todos os dados para análise longitudinal da ponte em estudo, segundo os regulamentos de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes e o EN 1991-2. É um ficheiro-M do tipo script, para proceder à sua execução, basta indicar o seu nome na variável `inputdata.inputfilecharge` existente no ficheiro `inputFile_PS.m`. Este ficheiro está explicado detalhadamente no capítulo 4.
- `Lercoord.m`: é criada a função `lercoord` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função executa a divisão dos elementos da secção transversal em

camadas. O procedimento adotado consiste na utilização das coordenadas dos elementos que compõem a secção, esta usa os valores da coluna do y de cada elemento, que representa as alturas do elemento, e associa a diferença de alturas como sendo camadas. Por predefinição, cada camada pode ser subdividida em camadas mais pequenas, de forma que seja determinada com maior precisão a posição do eixo neutro, através do elemento z (definido no ficheiro de entrada de dados da ferramenta, onde o utilizador insere todos os dados sobre a secção transversal em estudo), que define o número de divisões. Esta função recebe os parâmetros de entrada em que a camada é delimitada superiormente pelo elemento  $y_1$ , e o seu limite inferior é estabelecido pelo elemento  $y_2$ , através do ficheiro de entrada de dados da secção transversal. Por predefinição existe um limite em que as camadas podem ser subdivididas em cada elemento da secção transversal. A definição do limite de camadas corresponde à soma de todas as camadas subdivididas que compõem cada elemento. Caso os dados não sejam introduzidos corretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Verifica se o número de camadas dos elementos pertencentes à secção transversal corresponde ao número de camadas solicitadas, produzindo uma mensagem de aviso se a condição não se verificar.

Esta função tem a capacidade de verificar, no caso de optar por calcular a largura efetiva do banzo de betão, se as coordenadas dos conetores extremos e a coordenada média entre conetores foram introduzidas. E reencaminha as coordenadas para a funções `calcEffectiveWebLength.m` e `CrossSection_Class.m`, para proceder à determinação da largura efetiva do banzo de betão e classificar a secção transversal, conforme previsto na EN 1994-1-1. Também tem capacidade de verificar, no caso de não optar por calcular a largura efetiva do banzo de betão, se a coordenada da laje de betão coincidente com o eixo de simetria do perfil metálico foi introduzida. Caso as coordenadas não sejam introduzidas corretamente conforme situações anteriores, a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada.

- `calcEffectiveWebLength.m`: é criada a função `calcEffectiveWebLength` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a

largura efetiva do banzo de betão nas diferentes zonas de uma viga mista contínua ou simplesmente apoiada. A função apresenta três argumentos de entrada: o vetor dos comprimentos dos vãos longitudinais da ponte (StretchesRef), o valor da variável do vão em estudo (numStretches) e o valor da variável do apoio em estudo (sectionREF). E dispõe de cinco variáveis de retorno: o comprimento equivalente ( $L_e$ ), a distância entre os centros dos conetores extremos ( $b_0$ ), o valor da largura efetiva do banzo de betão de cada lado da alma ( $b_{ei}$ ), o coeficiente da largura efetiva do banzo de betão de cada lado da alma ( $\beta_i$ ) e a largura efetiva do banzo de betão ( $b_{eff}$ ). Caso opte pelo cálculo da largura efetiva do banzo de betão, esta função encaminha o valor de  $b_{eff}$ , para a função CrossSection\_Class para classificar a secção transversal na situação de momento fletor resistente positivo.

- CasesStudy.m: é criada a função CasesStudy e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome. Esta função faz a ligação das diversas funções necessárias para caracterização da secção transversal, conforme os parâmetros introduzidos no ficheiro de entrada de dados da secção transversal e da classificação da secção.
- CasesStudyCarga: é criada a função CasesStudyCarga e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome. Esta função faz a ligação das diversas funções usadas na análise longitudinal, conforme as variáveis definidas no ficheiro de entrada de dados da análise longitudinal do tabuleiro.
- charact\_steelProfile.m: é criada a função charact\_steelProfile e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina as propriedades das secções transversais do perfil metálico. Esta função recebe os parâmetros de entrada através do(s) ficheiro(s) de entrada de dados da ferramenta, onde o utilizador insere todos os dados sobre a secção transversal em estudo. E dispõe de onze variáveis de retorno: a área da secção (Área), o centro de massa em relação aos eixos z e y ( $z_g$  e  $y_g$ ), os momentos principais centrais de inércia em relação aos eixos z e y ( $I_z$  e  $I_y$ ), os raios de giração em torno dos eixos z e y ( $i_z$  e  $i_y$ ), e os módulos de flexão em relação aos eixos z e y ( $W_{pl,y,sup}$ ;  $W_{pl,y,inf}$ ;  $W_{pl,z,sup}$ ;  $W_{pl,z,inf}$ ).
- ClassSoulThree.m: é criada a função ClassSoulThree e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina o valor do momento fletor

resistente de secções que possuam almas da Classe 3 e banzos das Classes 1 ou 2 poderão ser tratadas como secções da classe 2 em que a alma é representada por uma alma efetiva da Classe 2, de acordo com o procedimento indicado na EN 1993-1-1, 6.2.2.4. Esta metodologia consiste em substituir a parte comprimida da alma por um elemento de alma de altura igual a  $20\epsilon t_w$ , adjacente ao banzo comprimido, e por outro elemento de alma de altura igual a  $20\epsilon t_w$ , adjacente ao eixo neutro plástico da secção transversal efetiva. O procedimento adotado para determinar o valor do momento fletor resistente plástico consiste em multiplicar a força resultante,  $F_i$  em bloco pelo braço,  $z_i$ . Dispõe de duas variáveis de retorno: a string que indica a posição do eixo neutro (x) e a string que indica o valor do momento fletor resistente ( $M_{pl,rd}$ ).

- Cost\_bridge.m: é criada a função Cost\_bridge e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída).
- CrossSection\_Class.m: é criada a função CrossSection\_Class e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função classifica a secção transversal mista. O procedimento de classificação de secções transversais previsto na EN 1993-1-1 e na EN 1994-1-1 foi programado nesta função e apresentado no capítulo 3.
- ElasticMoment.m: é criada a função ElasticMoment e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina o valor do momento fletor resistente elástico positivo. O método de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de duas variáveis de retorno: a string que indica a posição do eixo neutro (x) e a string que indica o valor do momento fletor resistente ( $M_{el,rd}$ ).
- ElasticMoment\_neg.m: é criada a função ElasticMoment\_neg e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina o valor do momento fletor resistente elástico negativo. O método de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de duas variáveis de

retorno: a string que indica a posição do eixo neutro (x) e a string que indica o valor do momento fletor resistente ( $M_{el,rd}$ ).

- **GraphicCoord.m:** é criada a função **GraphicCoord** e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome. Esta função permite verificar graficamente a validade das coordenadas introduzidas da secção transversal mista. No ficheiro **GraphicCoord.m** é definida a função principal **GraphicCoord**, assim como a subfunção **linha**. A função principal cria uma figura vazia, define os vértices da secção transversal e invoca a subfunção **line** para desenhar a linha na figura. Esta função configura as coordenadas introduzidas individualmente em cada elemento da composição da secção transversal numa representação da secção transversal global.
- **metCinemEC1.m:** é criada a função **metCinemEC1** e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função efetua o estudo da análise longitudinal de pontes mistas conforme o modelo de carga LM1 da norma EN 1991-2, para tráfego rodoviário. O procedimento adotado consiste no carregamento simultâneo de uma carga uniformemente distribuída (UDL) na área de cada via do tabuleiro e de um veículo (TS) de dois eixos colocado no centro da via. Os dois tipos de sobrecarga são considerados tanto numa análise longitudinal como numa análise transversal. Tenha em conta que foi programado na nesta função que o veículo deve ocupar a posição mais desfavorável transversalmente. No caso de existir um separador físico entre as faixas de rodagem, a função associa dois veículos, um em cada faixa. A função tem definido um limite de eixos equidistantes, caso os dados não sejam introduzidos corretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Em seguida, emite uma mensagem de aviso que informa o número máximo de eixos equidistantes permitidos, se a condição não se verificar. Tenha em atenção que o número de eixos equidistantes está dependente das distâncias entre cargas. Caso exista dados introduzidos incorretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. A seguir, surgirá uma mensagem de aviso que informa o número máximo de eixos equidistantes permitidos em função das distâncias introduzidas anteriormente.

- `metCinemLM71.m`: é criada a função `metCinemLM71` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função efetua o estudo da análise longitudinal de pontes mistas conforme o modelo de carga LM71 da norma EN 1991-2 para tráfego ferroviário. O procedimento adotado consiste num comboio-tipo formado por cargas concentradas e cargas uniformemente distribuídas, com a disposição e as dimensões passíveis de serem ajustadas. A função tem definido um limite de cargas concentradas, caso os dados não sejam introduzidos corretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Em seguida, emite uma mensagem de aviso que informa o número máximo de cargas concentradas permitidas, se a condição não se verificar. Tenha em atenção que o número de cargas concentradas está dependente das distâncias entre cargas. Caso exista dados introduzidos incorretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Consequentemente, surgirá uma mensagem de aviso que informa o número máximo de cargas concentradas permitidas em função das distâncias introduzidas anteriormente.
- `metCinemRSA`: é criada a função `metCinemEC1` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função efetua o estudo da análise longitudinal de pontes mistas conforme o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) para tráfego rodoviário. O procedimento adotado consiste na atuação separada de dois tipos de sobrecargas, nas faixas de rodagem, isto é, um veículo tipo formado por eixos equidistantes, cada um de duas rodas, com a disposição e as dimensões passíveis de serem ajustadas e o carregamento em simultâneo de uma carga uniformemente distribuída,  $q_1$ , e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme,  $q_2$ . Os dois tipos de sobrecarga são considerados tanto numa análise longitudinal como numa análise transversal. Por predefinição, a função assume que o veículo pode estar localizado em qualquer posição na faixa de rodagem, mas sempre com o seu eixo paralelo ao eixo da ponte. Tenha em conta que foi programado na nesta função que o veículo deve ocupar a posição mais desfavorável transversalmente. No caso de existir um separador físico entre as faixas de rodagem, a função associa dois veículos, um em cada faixa. A função tem definido um limite de eixos equidistantes, caso os

dados não sejam introduzidos corretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Em seguida, emite uma mensagem de aviso que informa o número máximo de eixos equidistantes permitidos, se a condição não se verificar. Tenha em atenção que o número de eixos equidistantes está dependente das distâncias entre cargas. Caso exista dados introduzidos incorretamente a execução da função é abortada, produzindo uma mensagem de erro com a informação de que foi indicado um número incorreto de argumentos de entrada. Consequentemente, surgirá uma mensagem de aviso que informa o número máximo de eixos equidistantes permitidos em função das distâncias introduzidas anteriormente.

- `NeutralAxis.m`: é criada a função `NeutralAxis` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a posição do eixo neutro plástico,  $LN_{pl}$ , para a situação de momento fletor positivo e negativo, dividindo a secção transversal em blocos e impondo o equilíbrio entre trações e compressões. O método de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de uma variável de retorno: a string que indica a posição do eixo neutro ( $x$ ).
- `NeutralAxisElastic.m`: é criada a função `NeutralAxisElastic` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , para a situação de momento fletor negativo. O método de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de uma variável de retorno: a string que indica a posição do eixo neutro ( $x$ ).
- `NeutralAxisElastic_pos.m`: é criada a função `NeutralAxisElastic_pos` e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a posição do eixo neutro elástico,  $LN_e$ , para a situação de momento fletor positivo. O método de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3.

- PlasticMoment.m: é criada a função PlasticMoment e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina o valor do momento fletor resistente plástico positivo,  $M_{pl,rd}$ . O procedimento de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de uma variável de retorno: a string que indica o valor do momento fletor resistente ( $M_{pl,rd}$ ).
- PlasticMoment\_neg.m: é criada a função PlasticMoment\_neg e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina o valor do momento fletor resistente plástico negativo,  $M_{pl,rd}$ . O procedimento de cálculo implementado nesta função está explicado detalhadamente no capítulo 3. Dispõe de uma variável de retorno: a string que indica o valor do momento fletor resistente ( $M_{pl,rd}$ ).
- readCaseStudy: é criada a função readCaseStudy e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome. Esta função preenche automaticamente os dados identificadores do caso de estudo. Contudo, o modo de atribuição da identificação é diferente consoante género de apoio.
- SectionClassFour.m: é criada a função SectionClassFour e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a capacidade resistente de secções da classe 4 para momento fletor resistente negativo. A função tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia.
- SectionClassFour\_pos: é criada a função SectionClassFour\_pos e armazenada no ficheiro-M com o mesmo nome, que recebe valores (parâmetros de entrada) e retorna valores (parâmetros de saída). Esta função determina a capacidade resistente de secções da classe 4 para momento fletor resistente positivo. A função tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia.

## 7.2 ANEXO B – Análise transversal

Os exemplos incluídos no capítulo 3 pretendem não só resolver situações concretas, mas também, dentro do possível, descrever o uso das diferentes opções da função ou funções que sirvam de pretexto ao exemplo, bem como adequar essas funções a outras situações de cálculo. Deste modo, os exemplos constituem a forma privilegiada de aprender a usar a ferramenta.

### Exemplo 1

Neste exemplo, irá determinar o valor do momento fletor resistente plástico,  $M_{pl,Rd}$ , de uma secção transversal de uma viga mista, com secção da Classe 1, sujeita a momento fletor positivo.

- 1) Selecione o ícone **Open** na barra de ferramentas ou pressione a combinação de teclas **Ctrl + O**.
- 2) Na lista de ficheiros, localize e selecione aquele que pretende abrir, em seguida, clique no botão **Abrir** (só pode abrir um ficheiro de cada vez). Em alternativa, faça duplo clique sobre o nome do ficheiro.

Quando tiver dificuldade em localizar o ficheiro na respetiva lista, comece a digitar o respetivo nome no campo **Nome de ficheiro**. Observe, em seguida, que abre uma lista de todos os ficheiros com nomes iniciados pelos caracteres digitados. Caso o nome completado no campo **Nome de ficheiro** corresponda ao ficheiro que procurava, pressione **Enter** para o abrir, caso contrário, selecione o ficheiro em questão na lista anexa e só depois pressione **Enter**.

Para criar um ficheiro de entrada de dados, proceda do seguinte modo:

- 3) Abra o ficheiro **inputFile\_Cross\_section.m** que servirá de base à criação do novo ficheiro de entrada de dados da secção transversal.
- 4) Clique sobre a seta no ícone **Save**, abre uma lista onde pode ser selecionada **Save Options As**, efetue a alteração do nome do ficheiro para **inputFile\_Exemplo1.m**. Para terminar a definição do novo ficheiro, clique em guardar.

Observe que foi criado um novo ficheiro de input dados **inputFile\_Exemplo1.m** na lista de ficheiros. Nas próximas alíneas, fica a saber como pode tirar partido da ferramenta e

dos diferentes componentes da folha de entrada de dados, de modo a interagir com a ferramenta.

5) Abra o novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo1.m**.

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades da secção transversal.

6) Defina a variável **inputdata.spanName** com o carácter “V”, para identificar o vão.

7) Defina a variável **inputdata.sectionName** com o carácter “S”, para identificar a secção.

8) No parâmetro **inputdata.sectionType**, digite “I” para indicar a geometria da secção transversal.

9) Introduza na variável **inputdata.effWeb.Stretch** o algarismo “0”, tenha em conta que no exercício não é especificado o(s) comprimento(s) do(s) vão(s) longitudinais da viga mista.

10) Indique na variável **inputdata.effWeb.numStretch** o algarismo “0”, tenha em atenção que, no passo anterior, não é especificado o(s) comprimento(s) do(s) vão(s) longitudinais da viga mista, o que significa que não é possível seleccionar vão(s) para o cálculo, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.

11) Defina a variável **inputdata.effWeb.sectionID** com o valor de “3”, o que significa a meio vão/momento fletor positivo.

Na Figura B.1 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades dos tipos dos dados identificadores do caso de estudo.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
1  % INPUT FILE
2  % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
3  %
4  %
5  %
6  % identificação do tramo em estudo
7  inputdata.spanName = 'V';
8  %
9  % identificação da secção em estudo
10 inputdata.sectionName = 'S';
11 %
12 % identificação do tipo de secção em estudo
13 inputdata.sectionType = 'I'; % viga mista com perfil em I ou C (caixão)
14 %
15 % comprimentos dos vãos longitudinais da ponte
16 inputdata.effWeb.Stretch = [0];
17 % vão em estudo
18 inputdata.effWeb.numStretches = (0);
19 %
20 % apoio em estudo
21 inputdata.effWeb.sectionID = (3); % 1- apoio esquerdo; 2- apoio direito; 3- meio vão
22

```

Figura B.1: Dados identificadores do caso de estudo.

Em seguida, descreve-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas e geométricas da secção transversal.

12) Introduza na variável **inputdata.section.concreteSlab.props** o vetor linha das propriedades mecânicas da laje de betão. O primeiro elemento,  $E_{cm}$ , igual a 0 GPa e o último elemento,  $f_{cd}$ , igual a 20 MPa.

13) Indique na variável **inputdata.section.steelCrossSection.props** o vetor linha das propriedades mecânicas do perfil metálico. O primeiro elemento,  $E_a$ , igual a 0 GPa e o último elemento,  $f_{yd}$ , igual a 420 MPa.

Consulte a Figura B.2 para conhecer os parâmetros que definem as propriedades mecânicas da laje de betão e do perfil metálico.

```

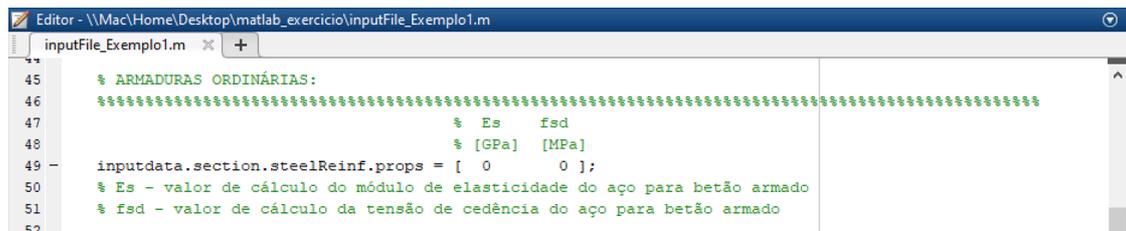
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
23 % PROPRIEDADES MECÂNICAS:
24 %
25 %
26 % LAJE BETÃO:
27 %
28 %
29 % Ecm fcd
30 % [GPa] [MPa]
31 inputdata.section.concreteSlab.props = [ 0 20 ];
32 % Ec - módulo de elasticidade do betão
33 % fcd - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
34 %
35 %
36 % PERFIL METÁLICO:
37 %
38 %
39 % Ea fyd
40 % [GPa] [MPa]
41 inputdata.section.steelCrossSection.props = [ 0 420 ];
42 % Ea - módulo de elasticidade do aço estrutural
43 % fyd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural
44

```

Figura B.2: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico.

- 14) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.steelReinf.props** o vetor linha das propriedades mecânicas das armaduras ordinárias. O primeiro elemento,  $E_s$ , igual a 0 GPa e o último elemento igual,  $f_{sd}$ , igual a 0 MPa.

Na Figura B.3 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.



```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
45 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47 % Es fsd
48 % [GPa] [MPa]
49 inputdata.section.steelReinf.props = [ 0 0 ];
50 % Es - valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço para betão armado
51 % fsd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado
52
```

Figura B.3: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.

Define-se, em seguida, os parâmetros referentes à introdução das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da secção transversal em subcamadas.

- 15) Define na variável **inputdata.section.concrete.coord** a matriz das coordenadas geométricas da laje de betão. Observe que, no exercício não é especificado para determinar a largura efetiva do banzo de betão, então nesta situação é necessário definir as coordenadas dos vértices da laje e a coordenada da laje de betão coincidente com o eixo de simetria do perfil metálico (ver Figura B.4). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente da laje de betão, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 16) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.concrete.LayerDiv\_concr** a matriz que define a divisão da laje de betão em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.4, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 % PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS:
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57
58 % LAJE BETÃO:
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % coordenadas secção
61 % dimensões em m (metros)
62
63                                     % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
64                                     % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
65                                     % (x)      (y)
66 inputdata.section.concrete.coord = [ 0      0      % P1
67                                     2.00   0      % P2
68                                     0      0.18  % P3
69                                     1.00   0.18  % P4
70                                     2.00   0.18 ]; % P5
71
72 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
73                                     % y1: coordenada superior em y
74                                     % y2: coordenada inferior em y
75                                     % z: número de camadas
76                                     % (y1)  (y2)  (z)
77 inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr = [ 0      0.18  1 ];

```

Figura B.4: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas.

- 17) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico (Figura B.5). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 18) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.5, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para definir a divisão da camada em subcamadas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
79 % PERFIL METÁLICO:
80 %~~~~~
81 % dimensões em m (metros)
82
83
84 % BANZO SUPERIOR:
85 %~~~~~
86 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
87 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
88 % (x) (y)
89 inputdata.section.steelProfile.coord_bs = [ 0 0 % P1
90 0.20 0 % P2
91 0 0.020 % P3
92 0.20 0.020 ]; % P4
93
94 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
95 % y1: coordenada superior em y
96 % y2: coordenada inferior em y
97 % z: número de camadas
98 % (y1) (y2) (z)
99 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs = [ 0 0.020 1 ];
100

```

Figura B.5: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas.

19) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_hw** a matriz das coordenadas geométricas da alma do perfil metálico (ver Figura B.6). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

20) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_hw** a matriz que define a divisão da alma do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.6 de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para definir a divisão da camada em subcamadas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
103 % ALMA:
104 %~~~~~
105 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
106 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
107 % (x) (y)
108 inputdata.section.steelProfile.coord_hw = [ 0 0 % P1
109 0.020 0 % P2
110 0 0.50 % P3
111 0.020 0.50 ]; % P4
112
113 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
114 % y1: coordenada superior em y
115 % y2: coordenada inferior em y
116 % z: número de camadas
117 % (y1) (y2) (z)
118 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw = [ 0 0.50 1 ];
119

```

Figura B.6: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas.

21) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bi** a matriz das coordenadas geométricas do banzo inferior do perfil metálico (ver Figura B.7).

Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

22) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bi** a matriz que define a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.7 de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para definir a divisão da camada em subcamadas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

121
122 % BANZO INFERIOR:
123 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
124 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
125 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
126 % (x) (y)
127 inputdata.section.steelProfile.coord_bi = [ 0 0 % P1
128 0.30 0 % P2
129 0 0.030 % P3
130 0.30 0.030 ]; % P4
131
132
133 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
134 % y1: coordenada superior em y
135 % y2: coordenada inferior em y
136 % z: número de camadas
137 % (y1) (y2) (z)
138 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi = [ 0 0.030 1 ];
139

```

Figura B.7: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas.

23) Defina na variável **inputdata.section.steelReinf.dim** o vetor linha das propriedades geométricas da armadura longitudinal existente na laje de betão. Observe que, neste exercício não é indicada armadura longitudinal na laje de betão para a determinação do momento fletor resistente plástico. Tenha presente que no exercício é solicitado a determinação do momento fletor resistente plástico positivo, logo a armadura longitudinal é desprezada, como se ilustra na Figura B.8.

24) Digite na variável **inputdata.section.GrafficCoord** o algarismo “1”, para visualizar as coordenadas inseridas na composição da secção transversal, através da representação gráfica (ver Figura B.8).

A Figura B.8 ilustra os parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
141 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
142 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
143 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
144 % (hs) (As)
145 % [m] [cm2/m]
146 inputdata.section.steelReinf.dim = [ 0 0 ];
147
148 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
149 % As - área da secção da armadura
150 % hs - distancia entre a armadura e a fibra inferior da laje de betão
151
152 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
153 % REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS COORDENADAS:
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155 %Representação gráfica das coordenadas da laje de betão e do perfil metálico
156 inputdata.section.GrafficCoord = (1); % representação gráfica 1- sim 0 - não
157

```

Figura B.8: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

25) Introduza na variável **inputdata.section.efforAxial** o algarismo “0” para a verificação da capacidade resistente de secções da classe 4. A ferramenta tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia. Para o caso de não conhecer o valor do esforço axial  $N_{sd}$ , é necessário inserir o algarismo 0 para o correto funcionamento da ferramenta (ver Figura B.9).

26) Digite na variável **inputdata.effWebFlag** o algarismo “0”, para não permitir o cálculo da largura efetiva do banzo de betão (ver Figura B.9).

27) Para terminar, clique no botão **Save**.

A Figura B.9 ilustra o parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo1.m
inputFile_Exemplo1.m
158 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
159 % Ned
160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
161 % Introdução do Esforço axial para secções de Classe 4
162 % [kN]
163 inputdata.section.effortAxial = (0);
164
165 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
166 % DATA FIELDS IN 'ANALYSISOPT':
167 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168 %Cálculo da largura efetiva do banzo de betão
169 inputdata.effWebFlag = (0); % Flag calculo largura efectiva 1- sim 0 - não

```

Figura B.9: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

Após a definição de todos os parâmetros do ficheiro de entrada de dados da secção transversal, é necessário definir os parâmetros do ficheiro **inputFile\_PS.m** que efetua

chamada do ficheiro de entrada de dados da secção transversal descritos nas alíneas anteriores.

28) Abra o ficheiro **inputFile\_PS.m**.

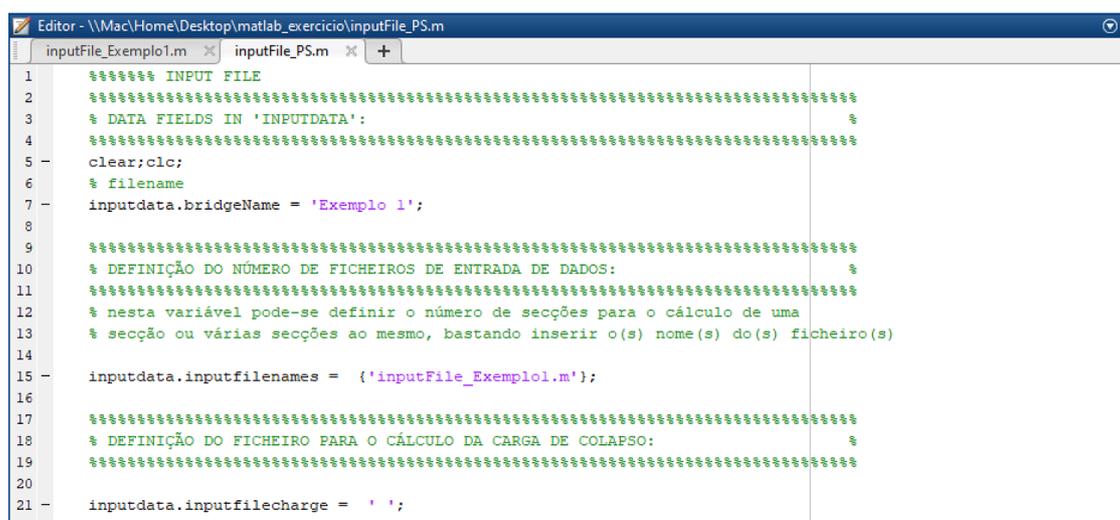
29) Define a variável **inputdata.bridgename** com o nome “Exemplo 1”.

30) Define a variável **inputdata.inputfilenames** com o nome do ficheiro de entrada de dados da secção transversal **inputFile\_Exemplo1.m**.

31) Define a variável **inputdata.inputfilecharge** com o nome do ficheiro de entrada de dados da análise longitudinal, neste exercício não é efetuada a análise.

32) Por fim, para gravar o ficheiro, clique no botão **Save**.

Na Figura B.10 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_PS.m**.



```
1 %***** INPUT FILE
2 %*****
3 % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4 %*****
5 clear;clc;
6 % filename
7 inputdata.bridgeName = 'Exemplo 1';
8
9 %*****
10 % DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS:
11 %*****
12 % nesta variável pode-se definir o número de secções para o cálculo de uma
13 % secção ou várias secções ao mesmo, bastando inserir o(s) nome(s) do(s) ficheiro(s)
14
15 inputdata.inputfilenames = {'inputFile_Exemplo1.m'};
16
17 %*****
18 % DEFINIÇÃO DO FICHEIRO PARA O CÁLCULO DA CARGA DE COLAPSO:
19 %*****
20
21 inputdata.inputfilecharge = ' ';
```

Figura B.10: Propriedades do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_PS.m**.

Em seguida, descrevem-se as diversas opções de iniciação da ferramenta.

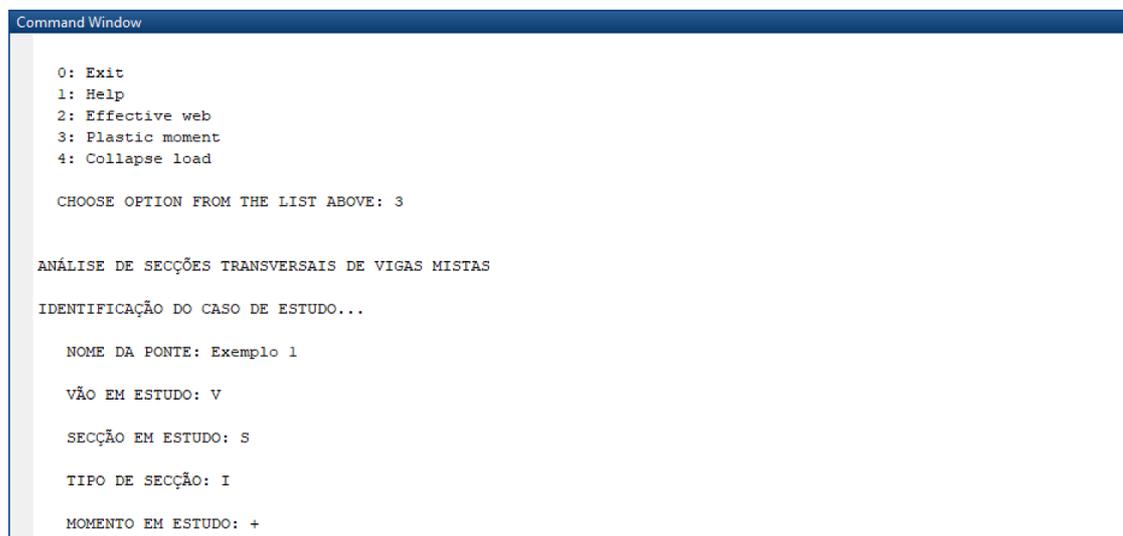
33) Inicie a ferramenta a partir da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab* escrevendo **mainCalculoVigasMistas**.

34) Escreva o nome do arquivo de entrada a partir da linha de comandos do *Matlab* escrevendo ‘**inputFile\_PS.m**’.

35) Em seguida, digite **3**, para proceder ao cálculo automático do momento fletor resistente.

36) Para terminar, clique em **Enter**.

Depois de ter gerado o cálculo correspondente à opção pretendida, os resultados podem ser consultados através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*. Consulte a Figura B.11 para conhecer os dados identificadores da secção transversal especificados no ficheiro de entrada de dados.



```
Command Window

0: Exit
1: Help
2: Effective web
3: Plastic moment
4: Collapse load

CHOOSE OPTION FROM THE LIST ABOVE: 3

ANÁLISE DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS MISTAS

IDENTIFICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO...

NOME DA PONTE: Exemplo 1

VÃO EM ESTUDO: V

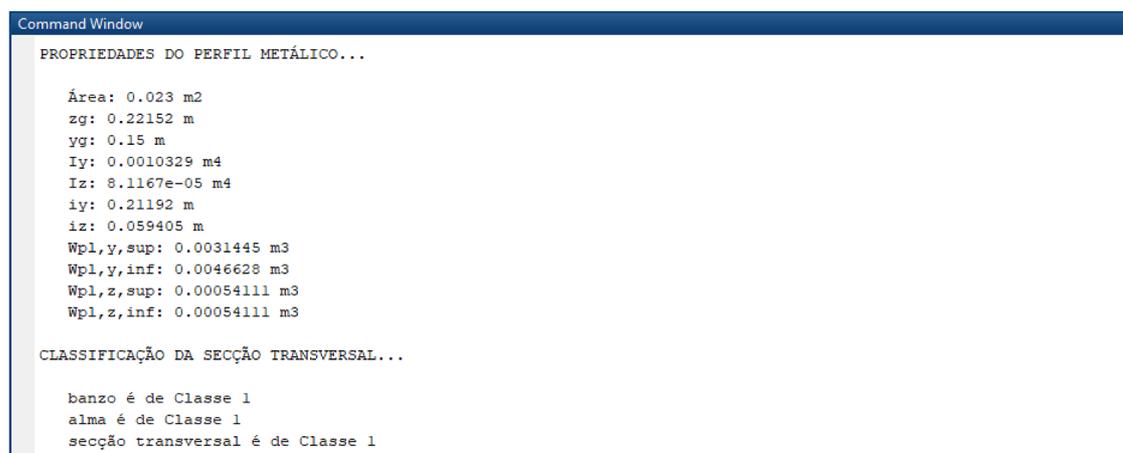
SECÇÃO EM ESTUDO: S

TIPO DE SECÇÃO: I

MOMENTO EM ESTUDO: +
```

Figura B.11: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, dos dados identificadores do caso de estudo.

A ferramenta disponibiliza uma função para determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. Consulte a Figura B.12 para conhecer os resultados das propriedades do perfil metálico fornecidos pela ferramenta.



```
Command Window

PROPRIEDADES DO PERFIL METÁLICO...

Área: 0.023 m2
zg: 0.22152 m
yg: 0.15 m
Iy: 0.0010329 m4
Iz: 8.1167e-05 m4
iy: 0.21192 m
iz: 0.059405 m
Wpl,y,sup: 0.0031445 m3
Wpl,y,inf: 0.0046628 m3
Wpl,z,sup: 0.00054111 m3
Wpl,z,inf: 0.00054111 m3

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL...

banzo é de Classe 1
alma é de Classe 1
secção transversal é de Classe 1
```

Figura B.12: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, das propriedades do perfil e classificação da secção transversal.

A Figura B.13 apresenta os valores da posição do eixo neutro e do momento fletor resistente.

```
Command Window
POSIÇÃO DO EIXO NEUTRO...

EN na alma do perfil de aço
x: 0.21071m

MOMENTO RESISTENTE...

Mpl,rd: 3685.7357 kN.m
```

Figura B.13: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, da posição do eixo neutro e momento fletor resistente.

Na Figura B.14 ilustra-se o gráfico que permite verificar se as coordenadas da secção transversal foram introduzidas corretamente.

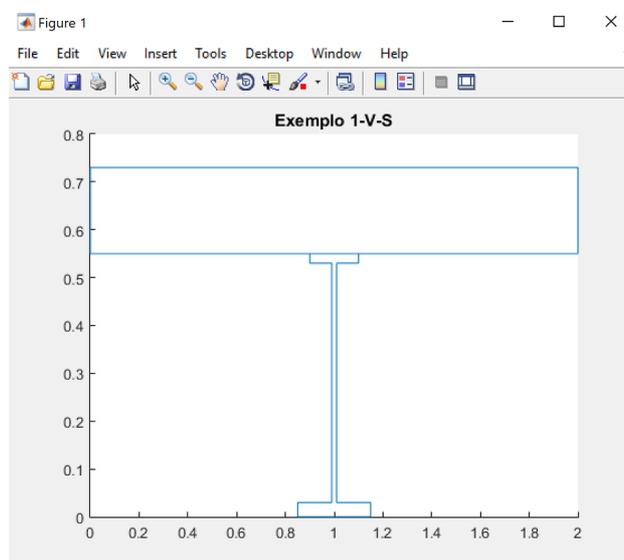


Figura B.14: Visualização da representação gráfica da secção transversal.

## Exemplo 2

Neste exemplo, irá determinar o momento fletor resistente,  $M_{Rd}$ , de secções transversais mistas em diferentes zonas de uma viga contínua.

- 1) Clique no ícone **Open** na barra de ferramentas ou pressione a combinação de teclas **Ctrl + O**.
- 2) Na lista de ficheiros, localize e selecione aquele que pretende abrir, em seguida, clique no botão Abrir (só pode abrir um ficheiro de cada vez). Em alternativa, faça duplo clique sobre o nome do ficheiro.

Quando tiver dificuldade em localizar o ficheiro na respetiva lista, comece a digitar o respetivo nome no campo **Nome de ficheiro**. Observe, em seguida, que abre uma lista de todos os ficheiros com nomes iniciados pelos caracteres digitados. Caso o nome completado no campo **Nome de ficheiro** corresponda ao ficheiro que procurava, pressione **Enter** para o abrir, caso contrário, selecione o ficheiro em questão na lista anexa e só depois pressione **Enter**.

Para criar um ficheiro de input de dados, proceda do seguinte modo:

- 3) Abra o ficheiro **inputFile\_Cross\_section.m** que servirá de base à criação do novo ficheiro de entrada de dados da secção transversal.

Observe que no exercício pretende-se determinar o momento fletor resistente da secção transversal em três diferentes zonas na viga contínua, para esse efeito, crie três ficheiros de input dados da secção transversal.

- 4) Clique sobre a seta no ícone Save, abre uma lista onde pode ser selecionada **Save Options As**, efetue a alteração do nome do ficheiro para **inputFile\_Exemplo2\_S1.m**. Para terminar a definição do novo ficheiro, clique em guardar. Repita este procedimento para os restantes ficheiros de input dados, altere o nome para **inputFile\_Exemplo2\_S2.m** e **inputFile\_Exemplo2\_S3.m**.

Tenha atenção que foram criados três novos ficheiros de entrada de dados na lista de ficheiros. Nas próximas alíneas, fica a saber como pode tirar partido da ferramenta e dos diferentes componentes da folha de entrada de dados, de modo a interagir com a ferramenta.

- 5) Abra o novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S1.m**.

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades da secção transversal.

- 6) Para especificar o nome do vão, digite “V1” no parâmetro **inputdata.spanName**.
- 7) No parâmetro **inputdata.sectionName**, digite “S1” para indicar o nome da secção.
- 8) Depois, na variável **inputdata.sectionType**, digite “I” para indicar a geometria da secção transversal.

- 9) Introduza na variável **inputdata.effWeb.Stretch**es o vetor linha dos comprimentos dos vãos longitudinais da viga contínua, como se ilustra na Figura B.15.
- 10) Digite na variável **inputdata.effWeb.numStretch**es o algarismo “1”, neste parâmetro, tenha em atenção a posição da secção transversal na viga contínua, conforme esquematizado o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 11) Em seguida, digite na variável **inputdata.effWeb.sectionID** o algarismo “3”, o que significa a meio vão/momento fletor positivo.

```

1  %%%%%%%%% INPUT FILE
2  %%%%%%%%%
3  % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4  %%%%%%%%%
5
6  % identificação do tramo em estudo
7  inputdata.spanName = 'V1';
8
9  % identificação da secção em estudo
10 inputdata.sectionName = 'S1';
11
12 % identificação do tipo de secção em estudo
13 inputdata.sectionType = 'I'; % viga mista com perfil em I ou C (caixão)
14
15 % comprimentos dos vãos longitudinais da ponte
16 inputdata.effWeb.Stretch = [8 8 8];
17 % vão em estudo
18 inputdata.effWeb.numStretch = (1);
19
20 % apoio em estudo
21 inputdata.effWeb.sectionID = (3); % 1- apoio esquerdo; 2- apoio direito; 3- meio vão
22

```

Figura B.15: Dados identificadores do caso de estudo.

Em seguida, descreve-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas e geométricas da secção transversal.

- 12) Introduza na variável **inputdata.section.concreteSlab.props** o vetor linha das propriedades mecânicas da laje de betão. O primeiro elemento,  $E_{cm}$ , igual a 31 GPa e o último elemento,  $f_{cd}$ , igual a 16,7 MPa.
- 13) Define na variável **inputdata.section.steelCrossSection.props** o vetor linha das propriedades mecânicas do perfil metálico. O primeiro elemento,  $E_a$ , igual a 210 GPa e o último elemento,  $f_{yd}$ , igual a 275 MPa.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 % PROPRIEDADES MECÂNICAS:
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26
27 % LAJE BETÃO:
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29                                     % Ecm   fcd
30                                     % [GPa] [MPa]
31 inputdata.section.concreteSlab.props = [ 31   16.7 ];
32 % Ec - módulo de elasticidade do betão
33 % fcd - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
34
35
36 % PERFIL METÁLICO:
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
38                                     % Ea   fyd
39                                     % [GPa] [MPa]
40 inputdata.section.steelCrossSection.props = [ 210   275 ];
41 % Ea - módulo de elasticidade do aço estrutural
42 % fyd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural
43

```

Figura B.16: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico.

- 14) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.steelReinf.props** o vetor linha das propriedades mecânicas das armaduras ordinárias. O primeiro elemento,  $E_s$ , igual a 210 GPa e o último elemento igual,  $f_{sd}$ , igual a 434,8 MPa.

No que se refere às propriedades mecânicas da definição das armaduras longitudinais, destacam-se os parâmetros descritos na Figura B.17.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m
45 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47                                     % Es   fsd
48                                     % [GPa] [MPa]
49 inputdata.section.steelReinf.props = [ 210   434.8 ];
50 % Es - valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço para betão armado
51 % fsd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado
52

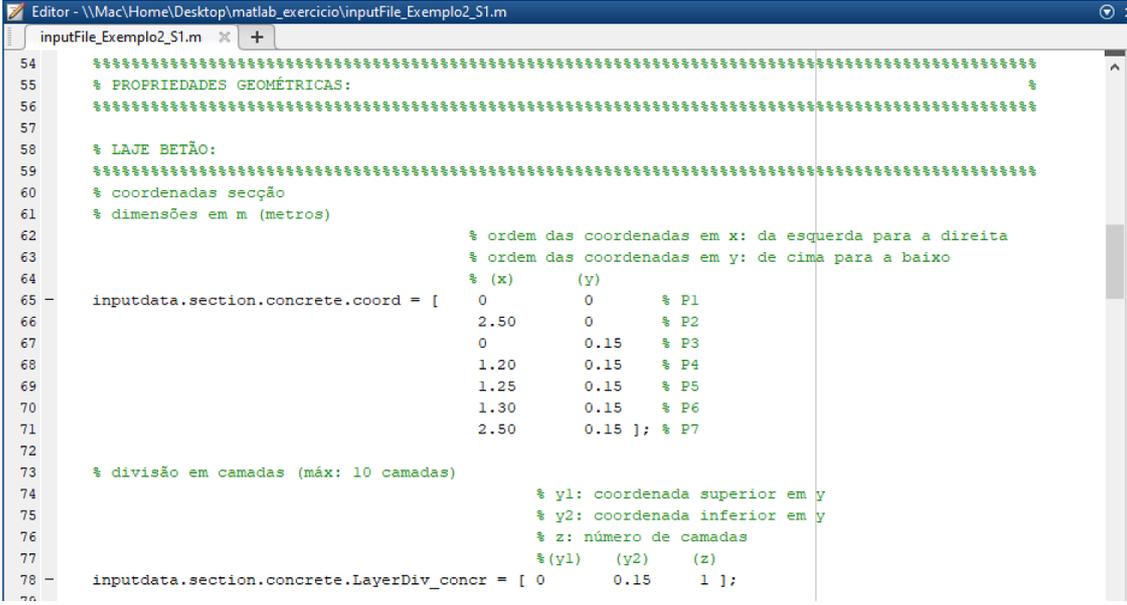
```

Figura B.17: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.

Define-se, em seguida, os parâmetros referentes à introdução das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da secção transversal em subcamadas.

- 15) Define na variável **inputdata.section.concrete.coord** a matriz das coordenadas geométricas da laje de betão. Observe que, no exercício é especificado para determinar a largura efetiva do banzo de betão, então nesta situação é necessário definir as coordenadas dos conectores extremos e a coordenada média entre conectores (ver Figura B.18). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente da laje de betão, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.

- 16) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.concrete.LayerDiv\_concr** a matriz que define a divisão da laje de betão em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.18, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.



```
54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 % PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS:
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57
58 % LAJE BETÃO:
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % coordenadas secção
61 % dimensões em m (metros)
62
63 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
64 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
65
66 inputdata.section.concrete.coord = [
67     0         0         % P1
68     2.50      0         % P2
69     0         0.15     % P3
70     1.20      0.15     % P4
71     1.25      0.15     % P5
72     1.30      0.15     % P6
73     2.50      0.15 ]; % P7
74
75 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
76
77 % y1: coordenada superior em y
78 % y2: coordenada inferior em y
79 % z: número de camadas
80
81 inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr = [ 0     0.15     1 ];
```

Figura B.18: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas.

- 17) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.19. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 18) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.19, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x +
81 % PERFIL METÁLICO:
82 %~~~~~
83 % dimensões em m (metros)
84
85
86 % BANZO SUPERIOR:
87 %~~~~~
88 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
89 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
90 % (x) (y)
91 - inputdata.section.steelProfile.coord_bs = [ 0 0 % P1
92 0.20 0 % P2
93 0 0.020 % P3
94 0.20 0.020 ]; % P4
95
96 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
97 % y1: coordenada superior em y
98 % y2: coordenada inferior em y
99 % z: número de camadas
100 % (y1) (y2) (z)
101 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs = [ 0 0.020 1 ];
102

```

Figura B.19: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas.

19) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_hw** a matriz das coordenadas geométricas da alma do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.20. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

20) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_hw** a matriz que define a divisão da alma do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.20, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x +
105 % ALMA:
106 %~~~~~
107 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
108 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
109 % (x) (y)
110 - inputdata.section.steelProfile.coord_hw = [ 0 0 % P1
111 0.015 0 % P2
112 0 0.35 % P3
113 0.015 0.35 ]; % P4
114
115 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
116 % y1: coordenada superior em y
117 % y2: coordenada inferior em y
118 % z: número de camadas
119 % (y1) (y2) (z)
120 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw = [ 0 0.35 1 ];
121

```

Figura B.20: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em subcamadas.

21) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bi** a matriz das coordenadas geométricas do banzo inferior do perfil metálico, como se ilustra na

Figura B.21. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

- 22) Depois, indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bi** a matriz que define a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.21, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

124 % BANZO INFERIOR:
125 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
126 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
127 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
128 % (x)      (y)
129 inputdata.section.steelProfile.coord_bi = [ 0      0      % P1
130      0.20   0      % P2
131      0      0.020 % P3
132      0.20   0.020 ]; % P4
133
134
135 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
136 % y1: coordenada superior em y
137 % y2: coordenada inferior em y
138 % z: número de camadas
139 % (y1)  (y2)  (z)
140 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi = [ 0  0.020  1 ];
141

```

Figura B.21: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas.

- 23) Define na variável **inputdata.section.steelReinf.dim** a matriz das coordenadas geométricas da armadura longitudinal existente na laje de betão, como se ilustra na Figura B.22.
- 24) Para visualizar as coordenadas inseridas na composição da secção transversal, através da representação gráfica (ver Figura B.22), digite na variável **inputdata.section.GrafhicCoord** o algarismo “1”.

A Figura B.22 ilustra os parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x +
143 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
144 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
145 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
146 % (hs) (As)
147 % [m] [cm2/m]
148 inputdata.section.steelReinf.dim = [ 0.11 11.31 ];
149
150 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
151 % As - área da secção da armadura
152 % hs - distancia entre a armadura e a fibra inferior da laje de betão
153
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155 % REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS COORDENADAS:
156 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
157 %Representação gráfica das coordenadas da laje de betão e do perfil metálico
158 inputdata.section.GraphicCoord = (1); % representação gráfica 1- sim 0 - não
159

```

Figura B.22: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

25) Introduza na variável **inputdata.section.efforAxial** o algarismo “0” para a verificação da capacidade resistente de secções da classe 4. A ferramenta tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia. Para o caso de não conhecer o valor do esforço axial  $N_{sd}$ , é necessário inserir o algarismo 0 para o correto funcionamento da ferramenta (ver Figura B.23).

26) Em seguida, na variável **inputdata.effWebFlag** indique o algarismo “1”, para permitir o cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

27) Para terminar, clique no botão Save.

A Figura B.23 ilustra o parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S1.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x +
160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
161 % Ned
162 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
163 % Introdução do Esforço axial para secções de Classe 4
164 % [kN]
165 inputdata.section.effortAxial = (0);
166
167 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168 % DATA FIELDS IN 'ANALYSISOPT':
169 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
170 %Cálculo da largura efetiva do banzo de betão
171 inputdata.effWebFlag = (1); % Flag calculo largura efectiva 1- sim 0 - não
172

```

Figura B.23: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

Depois de definir todos os parâmetros do ficheiro **inputFile\_Exemplo2\_S1.m**, proceda como foi descrito anteriormente, a abertura do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S2.m**.

28) Abra o novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S2.m**.

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades da secção transversal.

29) Define a variável **inputdata.spanName** com o nome de “V1”.

30) Define a variável **inputdata.sectionName** com o nome de “S2”.

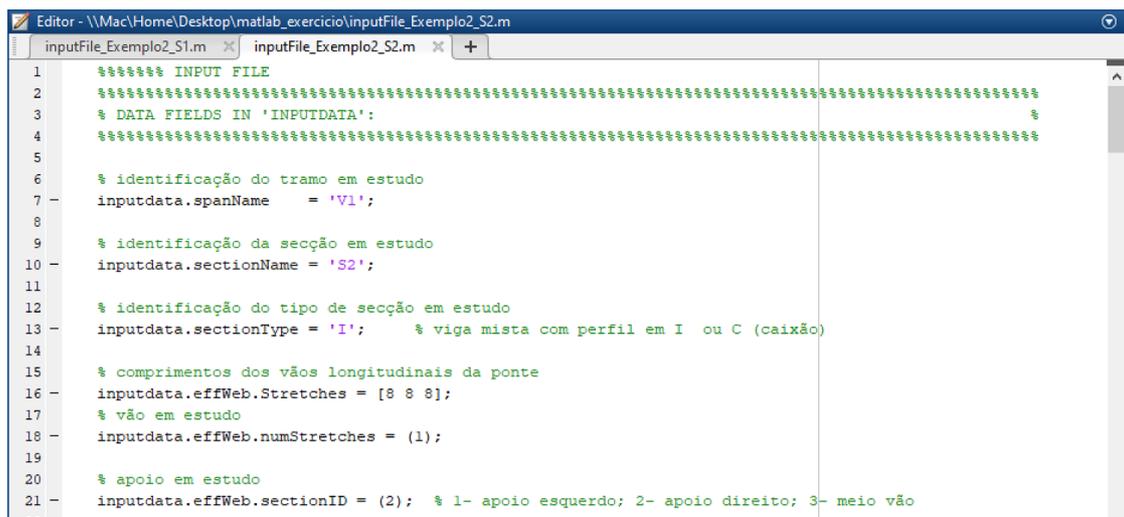
31) Indique na variável **inputdata.sectionType** secção transversal do tipo “I”.

32) Introduza na variável **inputdata.effWeb.Stretch** o vetor linha dos comprimentos dos vãos longitudinais da viga mista, como se ilustra na Figura B.24.

33) Indique na variável **inputdata.effWeb.numStretch** o algarismo “1”, neste parâmetro, tenha em atenção a posição da secção transversal na viga contínua, conforme esquematizado o tópico 3.4.1 do capítulo 3.

Tenha em conta que, a secção transversal localiza-se num apoio intermédio na viga contínua.

34) Define a variável **inputdata.effWeb.sectionID** com o valor de “2”, significa no apoio direito/momento fletor negativo.



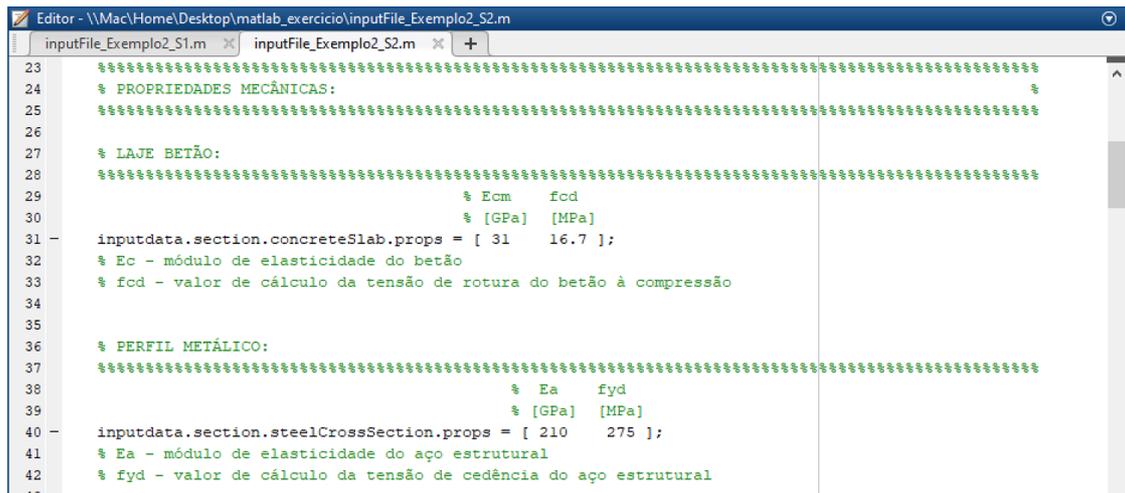
```
1  %%%%%% INPUT FILE
2  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3  % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
6  % identificação do tramo em estudo
7  inputdata.spanName = 'V1';
8
9  % identificação da secção em estudo
10 inputdata.sectionName = 'S2';
11
12 % identificação do tipo de secção em estudo
13 inputdata.sectionType = 'I'; % viga mista com perfil em I ou C (caixão)
14
15 % comprimentos dos vãos longitudinais da ponte
16 inputdata.effWeb.Stretch = [8 8 8];
17 % vão em estudo
18 inputdata.effWeb.numStretch = (1);
19
20 % apoio em estudo
21 inputdata.effWeb.sectionID = (2); % 1- apoio esquerdo; 2- apoio direito; 3- meio vão
22
```

Figura B.24: Dados identificadores do caso de estudo.

Em seguida, descreve-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas e geométricas da secção transversal.

35) Introduza na variável **inputdata.section.concreteSlab.props** o vetor linha das propriedades mecânicas da laje de betão. O primeiro elemento,  $E_{cm}$ , igual a 31 GPa e o último elemento,  $f_{cd}$ , igual a 16,7 MPa.

36) Indique na variável **inputdata.section.steelCrossSection.props** o vetor linha das propriedades mecânicas do perfil metálico. O primeiro elemento,  $E_a$ , igual a 210 GPa e o último elemento,  $f_{yd}$ , igual a 275 MPa.

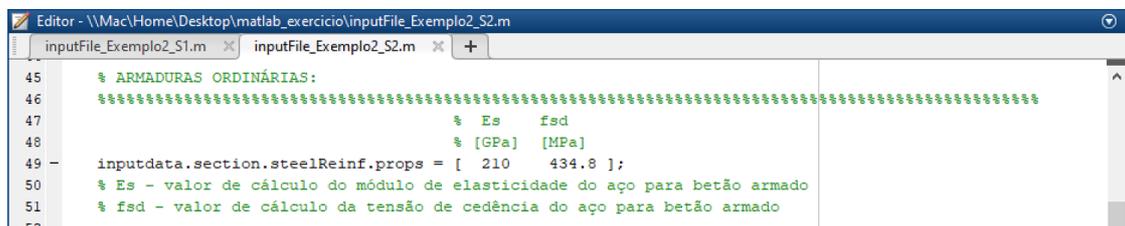


```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S2.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x +
23 % =====
24 % PROPRIEDADES MECÂNICAS:
25 % =====
26
27 % LAJE BETÃO:
28 % =====
29 % Ecm fcd
30 % [GPa] [MPa]
31 inputdata.section.concreteSlab.props = [ 31 16.7 ];
32 % Ec - módulo de elasticidade do betão
33 % fcd - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
34
35
36 % PERFIL METÁLICO:
37 % =====
38 % Ea fyd
39 % [GPa] [MPa]
40 inputdata.section.steelCrossSection.props = [ 210 275 ];
41 % Ea - módulo de elasticidade do aço estrutural
42 % fyd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural
43
```

Figura B.25: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico.

37) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.steelReinf.props** o vetor linha das propriedades mecânicas das armaduras ordinárias. O primeiro elemento,  $E_s$ , igual a 210 GPa e o último elemento igual,  $f_{sd}$ , igual a 434,8 MPa.

No que se refere às propriedades mecânicas da definição das armaduras longitudinais, destacam-se os parâmetros descritos na Figura B.26.



```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S2.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x +
45 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
46 % =====
47 % Es fsd
48 % [GPa] [MPa]
49 inputdata.section.steelReinf.props = [ 210 434.8 ];
50 % Es - valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço para betão armado
51 % fsd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado
52
```

Figura B.26: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.

Define-se, em seguida, os parâmetros referentes à introdução das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da secção transversal em subcamadas.

- 38) Defina na variável **inputdata.section.concrete.coord** a matriz das coordenadas geométricas da laje de betão. Observe que, no exercício é especificado para determinar a largura efetiva do banzo de betão, então nesta situação é necessário definir as coordenadas dos conetores extremos e a coordenada média entre conetores (ver Figura B.27). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente da laje de betão, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 39) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.concrete.LayerDiv\_concr** a matriz que define a divisão da laje de betão em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.27, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 % PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS:
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57
58 % LAJE BETÃO:
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % coordenadas secção
61 % dimensões em m (metros)
62
63 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
64 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
65 % (x)      (y)
66 inputdata.section.concrete.coord = [ 0      0      % P1
67                                     2.50   0      % P2
68                                     0      0.15   % P3
69                                     1.20   0.15   % P4
70                                     1.25   0.15   % P5
71                                     1.30   0.15   % P6
72                                     2.50   0.15 ]; % P7
73
74 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
75 % y1: coordenada superior em y
76 % y2: coordenada inferior em y
77 % z: número de camadas
78 % (y1)  (y2)  (z)
79 inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr = [ 0      0.15   1 ];

```

Figura B.27: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas.

- 40) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.28. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 41) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os

pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.28, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S2.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x +
86 % BANZO SUPERIOR:
87 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
88 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
89 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
90 % (x) (y)
91 inputdata.section.steelProfile.coord_bs = [ 0 0 % P1
92 0.20 0 % P2
93 0 0.020 % P3
94 0.20 0.020 ]; % P4
95
96 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
97 % y1: coordenada superior em y
98 % y2: coordenada inferior em y
99 % z: número de camadas
100 % (y1) (y2) (z)
101 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs = [ 0 0.020 1 ];
102

```

Figura B.28: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas.

42) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.29. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

43) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em subcamadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.29, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S2.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x +
105 % ALMA:
106 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
107 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
108 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
109 % (x) (y)
110 inputdata.section.steelProfile.coord_hw = [ 0 0 % P1
111 0.015 0 % P2
112 0 0.35 % P3
113 0.015 0.35 ]; % P4
114
115 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
116 % y1: coordenada superior em y
117 % y2: coordenada inferior em y
118 % z: número de camadas
119 % (y1) (y2) (z)
120 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw = [ 0 0.35 1 ];
121

```

Figura B.29: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas.

- 44) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bi** a matriz das coordenadas geométricas do banzo inferior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.30. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 45) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bi** a matriz que define a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.30, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

124 % BANZO INFERIOR:
125 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
126 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
127 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
128 % (x)      (y)
129 - inputdata.section.steelProfile.coord_bi = [ 0      0      % P1
130      0.20   0      % P2
131      0      0.020  % P3
132      0.20   0.020  ]; % P4
133
134
135 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
136 % y1: coordenada superior em y
137 % y2: coordenada inferior em y
138 % z: número de camadas
139 % (y1)   (y2)   (z)
140 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi = [ 0      0.020  1 ];
141

```

Figura B.30: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas.

- 46) Defina na variável **inputdata.section.steelReinf.dim** a matriz das coordenadas geométricas da armadura longitudinal existente na laje de betão, como se ilustra na Figura B.31.
- 47) Digite na variável **inputdata.section.GrafhicCoord** o algarismo “1”, para visualizar as coordenadas inseridas na composição da secção transversal, através da representação gráfica.

A Figura B.31 ilustra os parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

```

143 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
144 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
145 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
146 % (hs) (As)
147 % [m] [cm2/m]
148 inputdata.section.steelReinf.dim = [ 0.11 11.31 ];
149
150 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
151 % As - área da secção da armadura
152 % hs - distancia entre a armadura e a fibra inferior da laje de betão
153
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155 % REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS COORDENADAS:
156 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
157 %Representação gráfica das coordenadas da laje de betão e do perfil metálico
158 inputdata.section.GrafficCoord = (1); % representação gráfica 1- sim 0 - não
159

```

Figura B.31: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

48) Introduza na variável **inputdata.section.efforAxial** o algarismo “0” para a verificação da capacidade resistente de secções da classe 4. A ferramenta tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia. Para o caso de não conhecer o valor do esforço axial  $N_{sd}$ , é necessário inserir o algarismo 0 para o correto funcionamento da ferramenta (ver Figura B.32).

49) Introduza na variável **inputdata.effWebFlag** valor “1”, para permitir o cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

50) Para terminar, clique no botão Save.

A Figura B.32 ilustra o parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

```

160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
161 % Ned
162 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
163 % Introdução do Esforço axial para secções de Classe 4
164 % [kN]
165 inputdata.section.effortAxial = (0);
166
167 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168 % DATA FIELDS IN 'ANALYSISOPT':
169 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
170 %Cálculo da largura efetiva do banzo de betão
171 inputdata.effWebFlag = (1); % Flag calculo largura efectiva 1- sim 0 - não
172

```

Figura B.32: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

Após a definição dos parâmetros do segundo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S2.m**, proceda como foi descrito anteriormente, a abertura do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S3.m**.

51) Abra o novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo2\_S3.m**.

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades da secção transversal.

52) No parâmetro **inputdata.spanName**, digite “V2” para indicar o nome do vão.

53) No parâmetro **inputdata.sectionName**, digite “S3” para indicar o nome da secção.

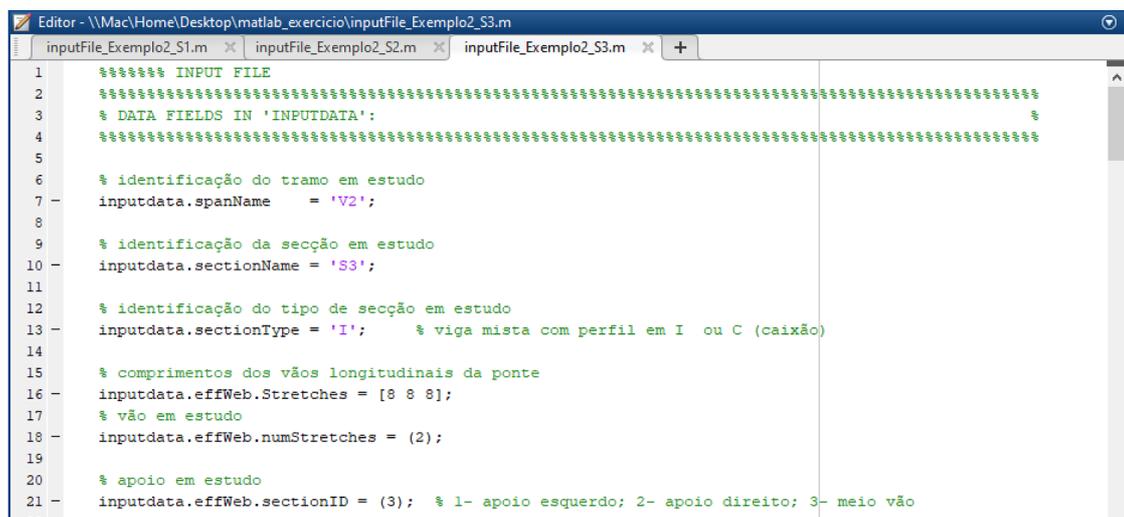
54) Depois, na variável **inputdata.sectionType**, digite “I” para indicar a geometria da secção transversal.

55) Introduza na variável **inputdata.effWeb.Stretch**es o vetor linha dos comprimentos dos vãos longitudinais da viga contínua, como se ilustra na Figura B.33

56) Digite na variável **inputdata.effWeb.numStretch**es o algarismo “2”, neste parâmetro, tenha em atenção a posição da secção transversal na viga contínua, conforme esquematizado o tópico 3.4.1 do capítulo 3.

57) Em seguida, digite na variável **inputdata.effWeb.sectionID** o algarismo “3”, o que significa a meio vão/momento fletor positivo.

No que se refere às propriedades da definição dos dados identificadores da secção em estudo, destacam-se os parâmetros descritos na Figura B.33.



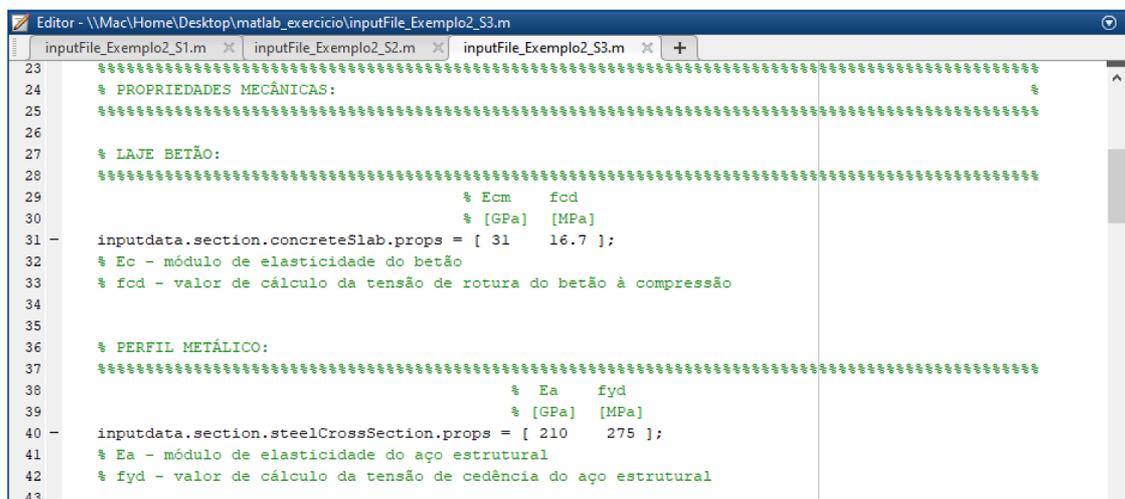
```
1  % INPUT FILE
2  % =====
3  % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4  % =====
5
6  % identificação do tramo em estudo
7  inputdata.spanName = 'V2';
8
9  % identificação da secção em estudo
10 inputdata.sectionName = 'S3';
11
12 % identificação do tipo de secção em estudo
13 inputdata.sectionType = 'I'; % viga mista com perfil em I ou C (caixão)
14
15 % comprimentos dos vãos longitudinais da ponte
16 inputdata.effWeb.Stretch = [8 8 8];
17 % vão em estudo
18 inputdata.effWeb.numStretch = (2);
19
20 % apoio em estudo
21 inputdata.effWeb.sectionID = (3); % 1- apoio esquerdo; 2- apoio direito; 3- meio vão
22
```

Figura B.33: Dados identificadores do caso de estudo.

Em seguida, descreve-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas e geométricas da secção transversal.

58) Introduza na variável **inputdata.section.concreteSlab.props** o vetor linha das propriedades mecânicas da laje de betão. O primeiro elemento,  $E_{cm}$ , igual a 31 GPa e o último elemento,  $f_{cd}$ , igual a 16,7 MPa.

59) Defina na variável **inputdata.section.steelCrossSection.props** o vetor linha das propriedades mecânicas do perfil metálico. O primeiro elemento,  $E_a$ , igual a 210 GPa e o último elemento,  $f_{yd}$ , igual a 275 MPa.

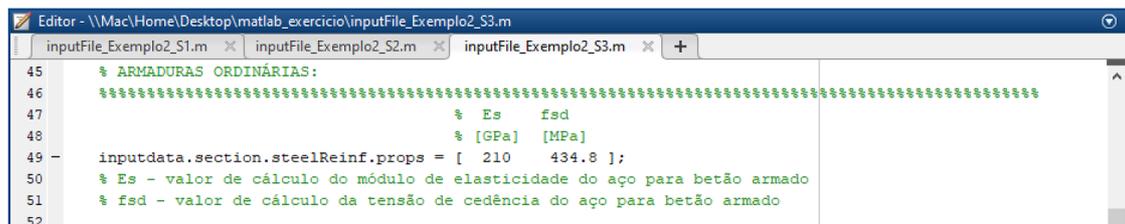


```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S3.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x inputFile_Exemplo2_S3.m x +
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 % PROPRIEDADES MECÂNICAS:
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26
27 % LAJE BETÃO:
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29                                     % Ecm   fcd
30                                     % [GPa] [MPa]
31 inputdata.section.concreteSlab.props = [ 31   16.7 ];
32 % Ec - módulo de elasticidade do betão
33 % fcd - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
34
35
36 % PERFIL METÁLICO:
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
38                                     % Ea   fyd
39                                     % [GPa] [MPa]
40 inputdata.section.steelCrossSection.props = [ 210   275 ];
41 % Ea - módulo de elasticidade do aço estrutural
42 % fyd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural
43
```

Figura B.34: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico.

60) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.steelReinf.props** o vetor linha das propriedades mecânicas das armaduras ordinárias. O primeiro elemento,  $E_s$ , igual a 210 GPa e o último elemento igual,  $f_{sd}$ , igual a 434,8 MPa.

No que se refere às propriedades mecânicas da definição das armaduras longitudinais, destacam-se os parâmetros descritos na Figura B.35.



```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo2_S3.m
inputFile_Exemplo2_S1.m x inputFile_Exemplo2_S2.m x inputFile_Exemplo2_S3.m x +
45 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47                                     % Es   fsd
48                                     % [GPa] [MPa]
49 inputdata.section.steelReinf.props = [ 210   434.8 ];
50 % Es - valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço para betão armado
51 % fsd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado
52
```

Figura B.35: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.

Define-se, em seguida, os parâmetros referentes à introdução das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da secção transversal em subcamadas.

- 61) Define na variável **inputdata.section.concrete.coord** a matriz das coordenadas geométricas da laje de betão. Observe que, no exercício é especificado para determinar a largura efetiva do banzo de betão, então nesta situação é necessário definir as coordenadas dos conetores extremos e a coordenada média entre conetores (ver Figura B.36). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente da laje de betão, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 62) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.concrete.LayerDiv\_concr** a matriz que define a divisão da laje de betão em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados Figura B.36, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 % PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS:
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57
58 % LAJE BETÃO:
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % coordenadas secção
61 % dimensões em m (metros)
62
63 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
64 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
65 % (x)      (y)
66 inputdata.section.concrete.coord = [ 0      0      % P1
67                                     2.50   0      % P2
68                                     0      0.15   % P3
69                                     1.20   0.15   % P4
70                                     1.25   0.15   % P5
71                                     1.30   0.15   % P6
72                                     2.50   0.15 ]; % P7
73
74 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
75 % y1: coordenada superior em y
76 % y2: coordenada inferior em y
77 % z: número de camadas
78 % (y1)  (y2)  (z)
79 inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr = [ 0      0.15   1 ];

```

Figura B.36: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas.

- 63) Define na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.37. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado

esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

- 64) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.37, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

81 % PERFIL METÁLICO:
82 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
83 % dimensões em m (metros)
84
85
86 % BANZO SUPERIOR:
87 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
88 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
89 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
90 % (x) (y)
91 inputdata.section.steelProfile.coord_bs = [ 0 0 % P1
92 0.20 0 % P2
93 0 0.020 % P3
94 0.20 0.020 ]; % P4
95
96 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
97 % y1: coordenada superior em y
98 % y2: coordenada inferior em y
99 % z: número de camadas
100 % (y1) (y2) (z)
101 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs = [ 0 0.020 1 ];
102

```

Figura B.37: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas.

- 65) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_hw** a matriz das coordenadas geométricas da alma do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.38. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 66) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_hw** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.38, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

105 % ALMA:
106 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
107 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
108 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
109 % (x) (y)
110 inputdata.section.steelProfile.coord_hw = [ 0 0 % P1
111 0.015 0 % P2
112 0 0.35 % P3
113 0.015 0.35 ]; % P4
114
115 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
116 % y1: coordenada superior em y
117 % y2: coordenada inferior em y
118 % z: número de camadas
119 % (y1) (y2) (z)
120 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw = [ 0 0.35 1 ];
121

```

Figura B.38: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas.

67) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bi** a matriz das coordenadas geométricas do banzo inferior do perfil metálico, como se ilustra na Figura B.39. Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

68) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bi** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.39, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

127 % BANZO INFERIOR:
128 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
129 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
130 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
131 % (x) (y)
132 inputdata.section.steelProfile.coord_bi = [ 0 0 % P1
133 0.20 0 % P2
134 0 0.020 % P3
135 0.20 0.020 ]; % P4
136
137
138 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
139 % y1: coordenada superior em y
140 % y2: coordenada inferior em y
141 % z: número de camadas
142 % (y1) (y2) (z)
143 inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi = [ 0 0.020 5 ];
144

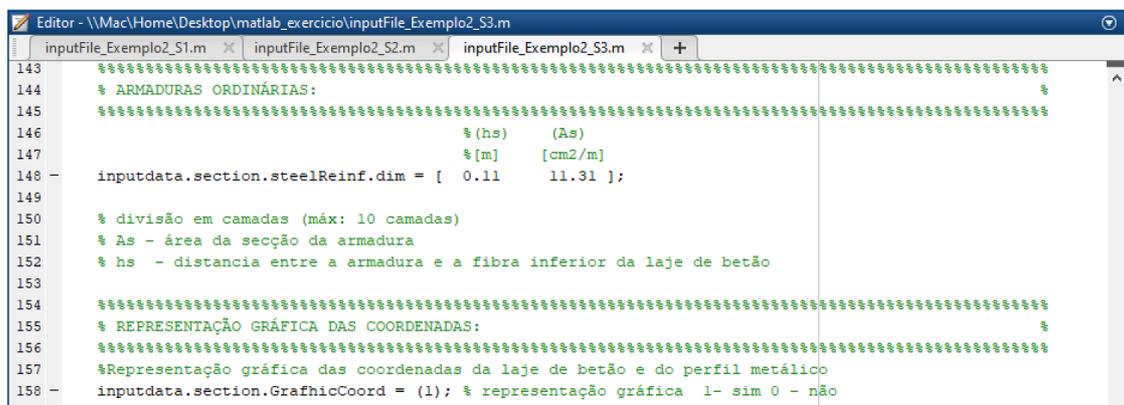
```

Figura B.39: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas.

69) Defina na variável **inputdata.section.steelReinf.dim** a matriz das coordenadas geométricas da armadura longitudinal existente na laje de betão, como se ilustra na Figura B.40.

70) Digite na variável **inputdata.section.GrafhicCoord** o algarismo “1”, para visualizar as coordenadas inseridas na composição da secção transversal, através da representação gráfica.

A Figura B.40 ilustra os parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.



```
143 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
144 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:  
145 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
146 % (hs) (As)  
147 % [m] [cm2/m]  
148 inputdata.section.steelReinf.dim = [ 0.11 11.31 ];  
149  
150 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)  
151 % As - área da secção da armadura  
152 % hs - distancia entre a armadura e a fibra inferior da laje de betão  
153  
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
155 % REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS COORDENADAS:  
156 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
157 %Representação gráfica das coordenadas da laje de betão e do perfil metálico  
158 inputdata.section.GrafhicCoord = (1); % representação gráfica 1- sim 0 - não
```

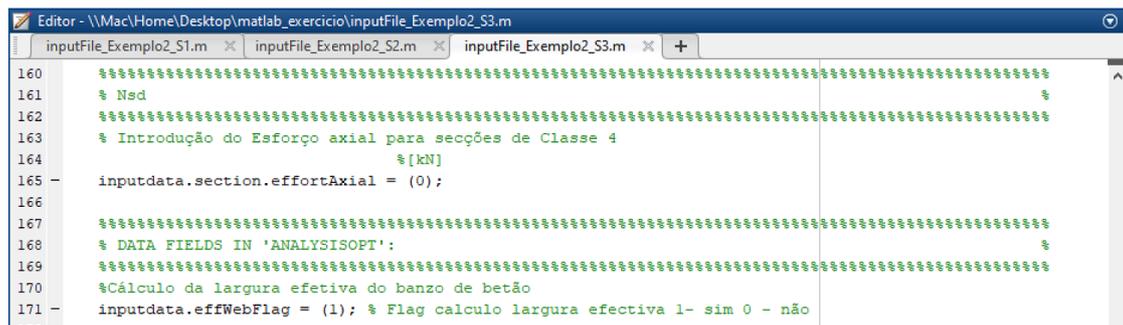
Figura B.40: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

71) Depois, digite na variável **inputdata.section.efforAxial** o algarismo “0” para a verificação da capacidade resistente de secções da classe 4. A ferramenta tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia. Para o caso de não conhecer o valor do esforço axial  $N_{sd}$ , é necessário inserir o algarismo 0 para o correto funcionamento da ferramenta (ver Figura B.41).

72) Introduza na variável **inputdata.effWebFlag** valor “1”, para permitir o cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

73) Para terminar, clique no botão Save.

A Figura B.41 ilustra o parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.



```
160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
161 % Nsd  
162 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
163 % Introdução do Esforço axial para secções de Classe 4  
164 % [kN]  
165 inputdata.section.effortAxial = (0);  
166 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
167 % DATA FIELDS IN 'ANALYSISOPT':  
168 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
169 %Cálculo da largura efetiva do banzo de betão  
170 inputdata.effWebFlag = (1); % Flag calculo largura efectiva 1- sim 0 - não  
171 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figura B.41: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

Após a definição de todos os parâmetros dos ficheiros de input de dados das secções transversais da viga contínua, é necessário definir os parâmetros do ficheiro **inputFile\_PS.m** que efetua chamada dos ficheiros de entrada de dados das secções transversais descritos nas alíneas anteriores.

- 74) Abra o ficheiro **inputFile\_PS.m**.
- 75) Define a variável **inputdata.bridgename** com o nome “Exemplo 2”.
- 76) Define a variável **inputdata.inputfilenames** com os nomes dos ficheiros de entrada de dados das secções transversais **inputFile\_Exemplo2\_S1.m**, **inputFile\_Exemplo2\_S2.m** e **inputFile\_Exemplo2\_S3.m**.
- 77) Define a variável **inputdata.inputfilecharge** com o nome do ficheiro de entrada de dados da análise longitudinal, neste exercício não é efetuada a análise.
- 78) Por fim, para gravar o ficheiro, clique no botão **Save**.

Na Figura B.42 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_PS.m**.

```
1 % INPUT FILE
2 % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
3 % filename
4 % inputdata.bridgeName = 'Exemplo2';
5 clear;clc;
6 % filename
7 inputdata.bridgeName = 'Exemplo2';
8
9 % DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS:
10 % nesta variável pode-se definir o número de secções para o cálculo de uma
11 % secção ou várias secções ao mesmo, bastando inserir o(s) nome(s) do(s) ficheiro(s)
12
13 inputdata.inputfilenames = {'inputFile_Exemplo2_S1.m'
14                             'inputFile_Exemplo2_S2.m'
15                             'inputFile_Exemplo2_S3.m'};
16
17 % DEFINIÇÃO DO FICHEIRO PARA O CÁLCULO DA CARGA DE COLAPSO:
18
19 inputdata.inputfilecharge = ' ';
```

Figura B.42: Propriedades do ficheiro de input dados inputFile\_PS.m.

Em seguida, descrevem-se as diversas opções de iniciação da ferramenta.

- 79) Inicie a ferramenta a partir da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab* escrevendo **mainCalculoVigasMistas**.
- 80) Escreva o nome do arquivo de entrada a partir da linha de comandos do *Matlab* escrevendo **'inputFile\_PS.m'**.
- 81) Em seguida, digite **3**, para proceder ao cálculo automático do momento fletor resistente.
- 82) Para terminar, clique em **Enter**.

Depois de ter gerado o cálculo correspondente à opção pretendida, os resultados podem ser consultados através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*.

A Figura B.43 ilustra os dados que identificam a secção transversal S1.

```
Command Window

0: Exit
1: Help
2: Effective web
3: Plastic moment
4: Collapse load

CHOOSE OPTION FROM THE LIST ABOVE: 3

ANÁLISE DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS MISTAS

IDENTIFICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO...

NOME DA PONTE: Exemplo2

VÃO EM ESTUDO: V1

SECÇÃO EM ESTUDO: S1

TIPO DE SECÇÃO: I

VÃO EM ESTUDO: extremo

SECÇÃO EM ESTUDO: meio vão

MOMENTO EM ESTUDO: +
```

Figura B.43: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do Matlab, dos dados identificadores da secção S1.

A ferramenta disponibiliza uma função para determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. Consulte a Figura B.44 para conhecer os resultados das propriedades do perfil metálico fornecidos pela ferramenta.

```
Command Window

PROPRIEDADES DO PERFIL METÁLICO...

Área: 0.01325 m2
zg: 0.195 m
yg: 0.1 m
Iy: 0.00032766 m4
Iz: 2.6765e-05 m4
iy: 0.15725 m
iz: 0.044944 m
Wpl,y,sup: 0.0016803 m3
Wpl,y,inf: 0.0016803 m3
Wpl,z,sup: 0.00026765 m3
Wpl,z,inf: 0.00026765 m3

LARGURA EFECTIVA DO BANZO...

Le : 6.8 m
b0 : 0.1 m
bei. Largura lado esquerdo : 0.85 m
bei. Largura lado direito : 0.85 m
beff : 1.8 m
```

Figura B.44: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do Matlab, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão.

A Figura B.45 apresenta os resultados classificação da secção transversal, da posição do eixo neutro e do momento fletor resistente referentes à secção S1.

```
Command Window
CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL...

banzo é de Classe 1
alma é de Classe 1
secção transversal é de Classe 1

POSIÇÃO DO EIXO NEUTRO...

EN na zona maciça do banzo de betão
x: 0.14261 m

MOMENTO RESISTENTE...

Mp1,rd: 997.2817 kN.m
```

Figura B.45: Visualização dos resultados, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.

Em seguida, a Figura B.46 ilustra os dados que identificam a secção transversal S2.

```
Command Window
ANÁLISE DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS MISTAS

IDENTIFICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO...

NOME DA PONTE: Exemplo2

VÃO EM ESTUDO: V1

SECÇÃO EM ESTUDO: S2

TIPO DE SECÇÃO: I

VÃO EM ESTUDO: extremo

SECÇÃO EM ESTUDO: apoio

MOMENTO EM ESTUDO: -
```

Figura B.46: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, dos dados identificadores da secção S2.

A ferramenta disponibiliza uma função para determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. Consulte a Figura B.47 para conhecer os resultados das propriedades do perfil metálico fornecidos pela ferramenta.

```
Command Window
PROPRIEDADES DO PERFIL METÁLICO...

Área: 0.01325 m2
zg: 0.195 m
yg: 0.1 m
Iy: 0.00032766 m4
Iz: 2.6765e-05 m4
iy: 0.15725 m
iz: 0.044944 m
Wpl,y,sup: 0.0016803 m3
Wpl,y,inf: 0.0016803 m3
Wpl,z,sup: 0.00026765 m3
Wpl,z,inf: 0.00026765 m3

LARGURA EFECTIVA DO BANZO...

Le : 4 m
b0 : 0.1 m
bei. Largura lado esquerdo : 0.5 m
bei. Largura lado direito : 0.5 m
beff : 1.1 m
```

Figura B.47: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão.

A Figura B.48 apresenta os resultados classificação da secção transversal, da posição do eixo neutro e do momento fletor resistente referentes à secção S2.

```
Command Window
CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL...

banzo é de Classe 1
alma é de Classe 1
secção transversal é de Classe 1

POSIÇÃO DO EIXO NEUTRO...

EN na alma do perfil de aço
x: 0.27943 m

MOMENTO RESISTENTE...

Mpl,rd: -680.5792 kN.m
```

Figura B.48: Visualização dos resultados, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.

Em seguida, a Figura B.49 ilustra os dados que identificam a secção transversal S3.

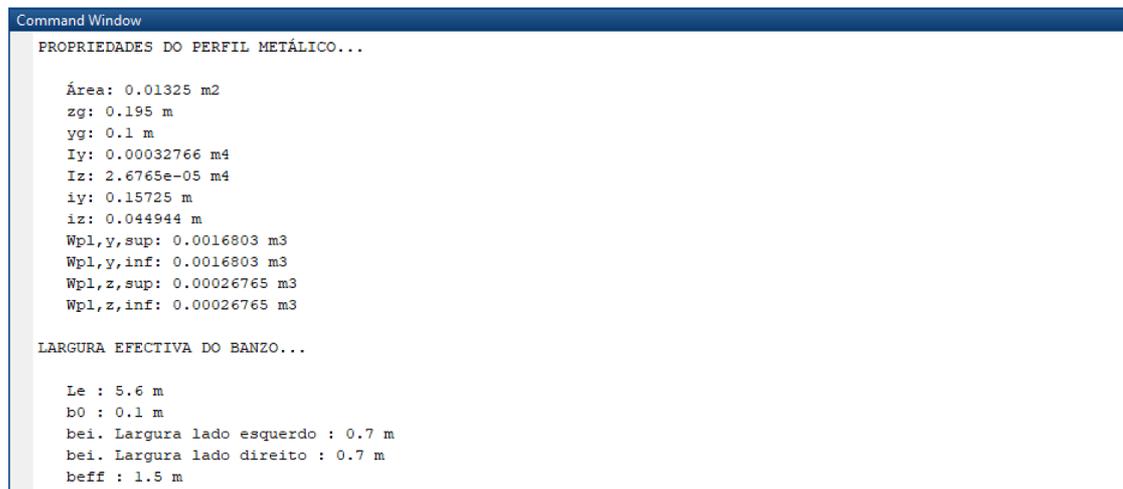
```
Command Window
ANÁLISE DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS MISTAS

IDENTIFICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO...

NOME DA PONTE: Exemplo2
VÃO EM ESTUDO: V2
SECÇÃO EM ESTUDO: S3
TIPO DE SECÇÃO: I
VÃO EM ESTUDO: intermédio
SECÇÃO EM ESTUDO: meio vão
MOMENTO EM ESTUDO: +
```

Figura B.49: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, dos dados identificadores da secção S3.

A ferramenta disponibiliza uma função para determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. Consulte a Figura B.50 para conhecer os resultados das propriedades do perfil metálico fornecidos pela ferramenta.



```
Command Window
PROPRIEDADES DO PERFIL METÁLICO...

Área: 0.01325 m2
zg: 0.195 m
yg: 0.1 m
Iy: 0.00032766 m4
Iz: 2.6765e-05 m4
iy: 0.15725 m
iz: 0.044944 m
Wpl,y,sup: 0.0016803 m3
Wpl,y,inf: 0.0016803 m3
Wpl,z,sup: 0.00026765 m3
Wpl,z,inf: 0.00026765 m3

LARGURA EFECTIVA DO BANZO...

Le : 5.6 m
b0 : 0.1 m
bei. Largura lado esquerdo : 0.7 m
bei. Largura lado direito : 0.7 m
beff : 1.5 m
```

Figura B.50: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, das propriedades do perfil metálico e da largura efetiva do banzo de betão.

A Figura B.51 apresenta os resultados classificação da secção transversal, da posição do eixo neutro e do momento fletor resistente referentes à secção S3.



```
Command Window
CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL...

banzo é de Classe 1
alma é de Classe 1
secção transversal é de Classe 1

POSIÇÃO DO EIXO NEUTRO...

EN no banzo superior do perfil de aço
x: 0.15409 m

MOMENTO RESISTENTE...

Mpl,rd: 949.1519 kN.m
```

Figura B.51: Visualização dos resultados, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.

Nas figuras seguintes ilustram-se os gráficos que permitem verificar se as coordenadas da secção transversal foram introduzidas corretamente.

A Figura B.52 ilustra a representação gráfica das coordenadas pertencentes à secção transversal S1.

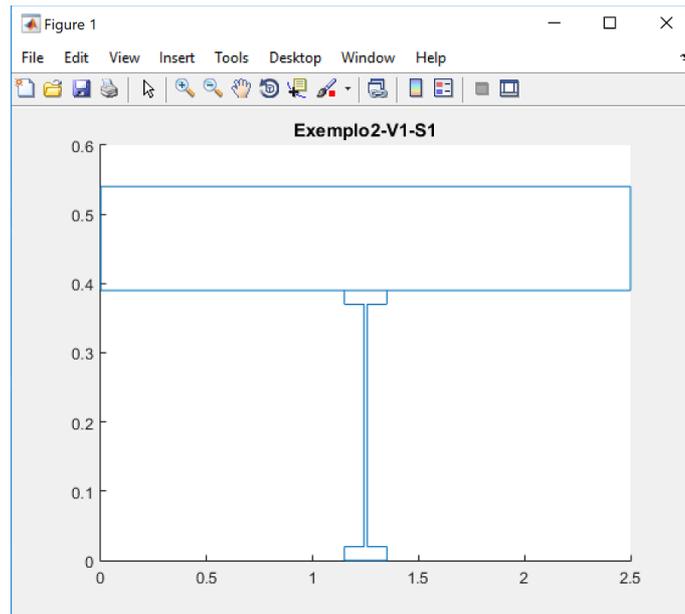


Figura B.52: Visualização da representação gráfica da secção transversal S1.

Em seguida, a Figura B.53 ilustra a representação gráfica das coordenadas pertencentes à secção transversal S2.

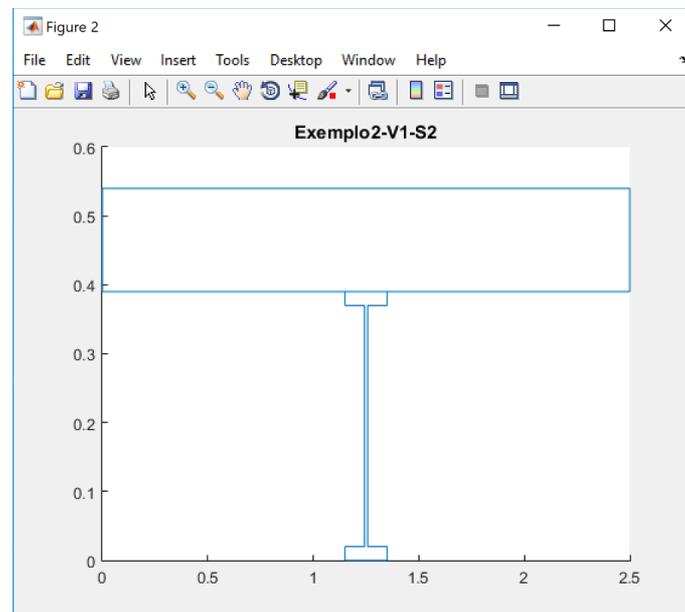


Figura B.53: Visualização da representação gráfica da secção transversal S2.

A Figura B.54 ilustra a representação gráfica das coordenadas pertencentes à secção transversal S3.

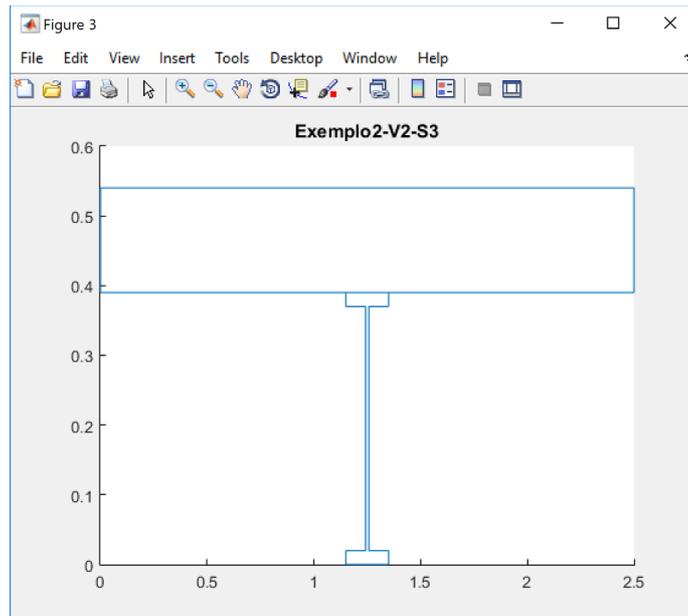


Figura B.54: Visualização da representação gráfica da secção transversal S2.

### Exemplo 3

Neste exemplo, irá determinar o momento fletor resistente,  $M_{Rd}$ , de uma secção transversal de uma viga mista simplesmente apoiada.

- 1) Clique no ícone **Open** na barra de ferramentas ou pressione a combinação de teclas **Ctrl + O**.
- 2) Na lista de ficheiros, localize e selecione aquele que pretende abrir, em seguida, clique no botão **Abrir** (só pode abrir um ficheiro de cada vez). Em alternativa, faça duplo clique sobre o nome do ficheiro.

Quando tiver dificuldade em localizar o ficheiro na respetiva lista, comece a digitar o respetivo nome no campo **Nome de ficheiro**. Observe, em seguida, que abre uma lista de todos os ficheiros com nomes iniciados pelos caracteres digitados. Caso o nome completado no campo **Nome de ficheiro** corresponda ao ficheiro que procurava, pressione **Enter** para o abrir, caso contrário, selecione o ficheiro em questão na lista anexa e só depois pressione **Enter**.

Para criar um ficheiro de input de dados, proceda do seguinte modo:

- 3) Abra o ficheiro **inputFile\_Cross\_section.m** que servirá de base à criação do novo ficheiro de entrada de dados da secção transversal.

- 4) Clique sobre a seta no ícone **Save**, abre uma lista onde pode ser selecionada **Save Options As**, efetue a alteração do nome do ficheiro para **inputFile\_Exemplo3.m**. Para terminar a definição do novo ficheiro, clique em guardar.

Observe que foi criado um novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo3.m** na lista de ficheiros. Nas próximas alíneas, fica a saber como pode tirar partido da ferramenta e dos diferentes componentes da folha de entrada de dados, de modo a interagir com a ferramenta.

- 5) Abra o novo ficheiro de entrada de dados **inputFile\_Exemplo3.m**.

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades da secção transversal.

- 6) No parâmetro **inputdata.spanName**, digite “V” para indicar o nome do vão.
- 7) No parâmetro **inputdata.sectionName**, digite “S1” para indicar o nome da secção.
- 8) Depois, na variável **inputdata.sectionType**, digite “I” para indicar a geometria da secção transversal.
- 9) Introduza na variável **inputdata.effWeb.Stretch** o algarismo “8” para especificar o comprimento do vão longitudinal da viga mista simplesmente apoiada.
- 10) Digite na variável **inputdata.effWeb.numStretch** o algarismo “1”, neste parâmetro, tenha em atenção a posição da secção transversal na viga contínua, conforme esquematizado o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 11) Em seguida, digite na variável **inputdata.effWeb.sectionID** o algarismo “3”, o que significa a meio vão/momento fletor positivo.

Na Figura B.55 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades dos tipos dos dados identificadores do caso de estudo.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo3.m
inputFile_Exemplo3.m
1  %%%%%%%%% INPUT FILE
2  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3  % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
6  % identificação do tramo em estudo
7  inputdata.spanName = 'V';
8
9  % identificação da secção em estudo
10 inputdata.sectionName = 'S1';
11
12 % identificação do tipo de secção em estudo
13 inputdata.sectionType = 'I'; % viga mista com perfil em I ou C (caixão)
14
15 % comprimentos dos vãos longitudinais da ponte
16 inputdata.effWeb.Stretch = [8];
17 % vão em estudo
18 inputdata.effWeb.numStretches = (1);
19
20 % apoio em estudo
21 inputdata.effWeb.sectionID = (3); % 1- apoio esquerdo; 2- apoio direito; 3- meio vão
22

```

Figura B.55: Dados identificadores do caso de estudo.

Em seguida, descreve-se os parâmetros que definem as propriedades mecânicas e geométricas da secção transversal.

12) Introduza na variável **inputdata.section.concreteSlab.props** o vetor linha das propriedades mecânicas da laje de betão. O primeiro elemento,  $E_{cm}$ , igual a 31 GPa e o último elemento,  $f_{cd}$ , igual a 16,7 MPa.

13) Indique na variável **inputdata.section.steelCrossSection.props** o vetor linha das propriedades mecânicas do perfil metálico. O primeiro elemento,  $E_a$ , igual a 210 GPa e o último elemento,  $f_{yd}$ , igual a 235 MPa.

Consulte a Figura B.56 para conhecer os parâmetros que definem as propriedades mecânicas da laje de betão e do perfil metálico.

```

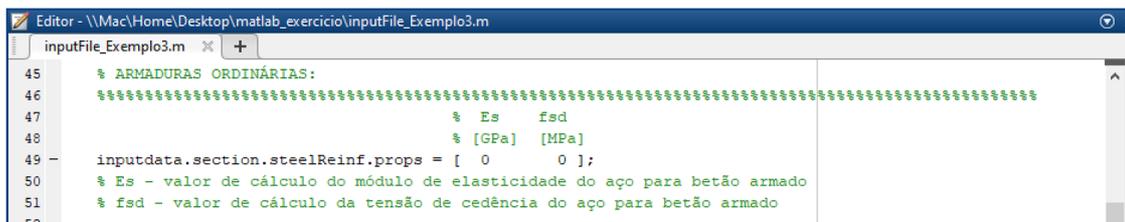
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo3.m
inputFile_Exemplo3.m
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 % PROPRIEDADES MECÂNICAS:
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26
27 % LAJE BETÃO:
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29 % Ecm fcd
30 % [GPa] [MPa]
31 inputdata.section.concreteSlab.props = [ 31 16.7 ];
32 % Ec - módulo de elasticidade do betão
33 % fcd - valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
34
35
36 % PERFIL METÁLICO:
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
38 % Ea fyd
39 % [GPa] [MPa]
40 inputdata.section.steelCrossSection.props = [ 210 235 ];
41 % Ea - módulo de elasticidade do aço estrutural
42 % fyd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural

```

Figura B.56: Propriedades mecânicas relativas à laje de betão e ao perfil metálico.

- 14) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.steelReinf.props** o vetor linha das propriedades mecânicas das armaduras ordinárias. O primeiro elemento,  $E_s$ , igual a 0 GPa e o último elemento igual,  $f_{sd}$ , igual a 0 MPa.

No que se refere às propriedades mecânicas da definição das armaduras longitudinais, destacam-se os parâmetros descritos na Figura B.57.



```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo3.m
inputFile_Exemplo3.m
45 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47 % Es fsd
48 % [GPa] [MPa]
49 - inputdata.section.steelReinf.props = [ 0 0 ];
50 % Es - valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço para betão armado
51 % fsd - valor de cálculo da tensão de cedência do aço para betão armado
52
```

Figura B.57: Parâmetros referentes às propriedades mecânicas das armaduras longitudinais.

Define-se, em seguida, os parâmetros referentes à introdução das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da secção transversal em subcamadas.

- 15) Define na variável **inputdata.section.concrete.coord** a matriz das coordenadas geométricas da laje de betão. Observe que, no exercício é especificado para determinar a largura efetiva do banzo de betão, então nesta situação é necessário definir as coordenadas dos conectores extremos e a coordenada média entre conectores (ver Figura B.58). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente da laje de betão, conforme o tópico 3.4.1 do capítulo 3.
- 16) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.concrete.LayerDiv\_concr** a matriz que define a divisão da laje de betão em camadas. Especifique os pontos  $y_1$  e  $y_2$  assinalados na Figura B.58, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro  $z$  o número de divisões pretendidas.

```

54 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
55 % PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS:
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57
58 % LAJE BETÃO:
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % coordenadas secção
61 % dimensões em m (metros)
62
63 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
64 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
65 % (x) (y)
66 inputdata.section.concrete.coord = [ 0 0 % P1
67 3.00 0 % P2
68 0 0.18 % P3
69 1.45 0.18 % P4
70 1.50 0.18 % P5
71 1.55 0.18 % P6
72 3.00 0.18 ]; % P7
73
74 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
75 % y1: coordenada superior em y
76 % y2: coordenada inferior em y
77 % z: número de camadas
78 % (y1) (y2) (z)
inputdata.section.concrete.LayerDiv_concr = [ 0 0.18 1 ];

```

Figura B.58: Definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da laje de betão em camadas.

- 17) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bs** a matriz das coordenadas geométricas do banzo superior do perfil metálico (ver Figura B.59). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.
- 18) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bs** a matriz que define a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.59 de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo3.m
inputFile_Exemplo3.m x +
81 % PERFIL METÁLICO:
82 %~~~~~
83 % dimensões em m (metros)
84
85
86 % BANZO SUPERIOR:
87 %~~~~~
88
89 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
90 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
91 % (x) (y)
91 - inputdata.section.steelProfile.coord_bs = [ 0 0 % P1
92 0.30 0 % P2
93 0 0.022 % P3
94 0.30 0.022 ]; % P4
95
96 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
97
98 % y1: coordenada superior em y
99 % y2: coordenada inferior em y
100 % z: número de camadas
101 % (y1) (y2) (z)
101 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bs = [ 0 0.022 1 ];
102

```

Figura B.59: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo superior do perfil metálico em camadas.

19) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_hw** a matriz das coordenadas geométricas da alma do perfil metálico (ver Figura B.60). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

20) Introduza na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_hw** a matriz que define a divisão da alma do perfil metálico em camadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.60, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_Exemplo3.m
inputFile_Exemplo3.m x +
105 % ALMA:
106 %~~~~~
107
108 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
109 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
110 % (x) (y)
110 - inputdata.section.steelProfile.coord_hw = [ 0 0 % P1
111 0.012 0 % P2
112 0 0.36 % P3
113 0.012 0.36 ]; % P4
114
115 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
116
117 % y1: coordenada superior em y
118 % y2: coordenada inferior em y
119 % z: número de camadas
120 % (y1) (y2) (z)
120 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_hw = [ 0 0.36 1 ];
121

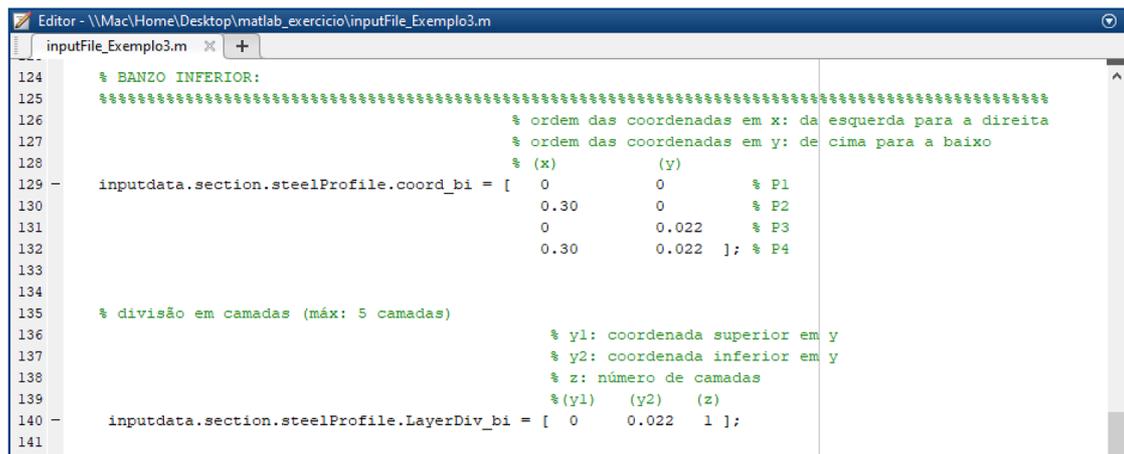
```

Figura B.60: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão da alma do perfil metálico em camadas.

21) Defina na variável **inputdata.section.steelProfile.coord\_bi** a matriz das coordenadas geométricas do banzo inferior do perfil metálico (ver Figura

B.61). Tenha presente que as coordenadas devem ser ordenadas do lado esquerdo para o lado direito e no sentido descendente do banzo superior do perfil metálico.

22) Indique na variável **inputdata.section.steelProfile.LayerDiv\_bi** a matriz que define a divisão do banzo inferior do perfil metálico em subcamadas. Especifique os pontos y1 e y2 assinalados na Figura B.61, de modo que os limites da camada fiquem definidos. Para subdividir em camadas mais pequenas, digite no parâmetro z o número de divisões pretendidas.



```
124 % BANZO INFERIOR:
125 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
126 % ordem das coordenadas em x: da esquerda para a direita
127 % ordem das coordenadas em y: de cima para a baixo
128 % (x)      (y)
129 - inputdata.section.steelProfile.coord_bi = [ 0      0      % P1
130      0.30   0      % P2
131      0      0.022 % P3
132      0.30   0.022 ] % P4
133
134
135 % divisão em camadas (máx: 5 camadas)
136 % y1: coordenada superior em y
137 % y2: coordenada inferior em y
138 % z: número de camadas
139 % (y1) (y2) (z)
140 - inputdata.section.steelProfile.LayerDiv_bi = [ 0 0.022 1 ];
```

Figura B.61: Parâmetros da definição das coordenadas geométricas e especificação de pontos para a divisão do banzo inferior do perfil metálico em camadas.

23) Define na variável **inputdata.section.steelReinf.dim** o vetor linha das propriedades geométricas da armadura longitudinal existente na laje de betão. Observe que, neste exercício não é indicada armadura longitudinal na laje de betão para a determinação do momento fletor resistente. Tenha presente que no exercício é solicitado a determinação do momento fletor resistente positivo, logo a armadura longitudinal é desprezada, como se ilustra na Figura B.62.

24) Para visualizar as coordenadas inseridas na composição da secção transversal, através da representação gráfica (ver Figura B.62) digite na variável **inputdata.section.GrafhicCoord** o algarismo “1”.

A Figura B.62 ilustra os parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

```

143 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
144 % ARMADURAS ORDINÁRIAS:
145 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
146 % (hs) (As)
147 % [m] [cm2/m]
148 inputdata.section.steelReinf.dim = [ 0 0 ];
149
150 % divisão em camadas (máx: 10 camadas)
151 % As - área da secção da armadura
152 % hs - distancia entre a armadura e a fibra inferior da laje de betão
153
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155 % REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS COORDENADAS:
156 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
157 %Representação gráfica das coordenadas da laje de betão e do perfil metálico
158 inputdata.section.GrafficCoord = (1); % representação gráfica 1- sim 0 - não
159

```

Figura B.62: Parâmetros da definição das armaduras longitudinais e a escolha da opção referente à representação gráfica.

25) Digite na variável **inputdata.section.efforAxial** o algarismo “0” para a verificação da capacidade resistente de secções da classe 4. A ferramenta tem programada a metodologia de aplicação do “método aproximado”, flexão composta na direção de maior inércia. Para o caso de não conhecer o valor do esforço axial  $N_{sd}$ , é necessário inserir o algarismo 0 para o correto funcionamento da ferramenta (ver Figura B.63).

26) Depois, digite na variável **inputdata.effWebFlag** o algarismo “0”, para não permitir o cálculo da largura efetiva do banzo de betão (ver Figura B.63).

27) Para terminar, clique no botão **Save**.

A Figura B.63 ilustra o parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

```

160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
161 % Ned
162 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
163 % Introdução do Esforço axial para secções de Classe 4
164 % [kN]
165 inputdata.section.effortAxial = (0);
166
167 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168 % DATA FIELDS IN 'ANALYSISOPT':
169 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
170 %Cálculo da largura efetiva do banzo de betão
171 inputdata.effWebFlag = (1); % Flag calculo largura efectiva 1- sim 0 - não
172

```

Figura B.63: Parâmetro da definição do esforço axial para secções de Classe 4 e a escolha da opção referente ao cálculo da largura efetiva do banzo de betão.

Após a definição de todos os parâmetros do ficheiro de entrada de dados da secção transversal da viga simplesmente apoiada, é necessário definir os parâmetros do ficheiro

**inputFile\_PS.m** que efetua chamada do ficheiro de input dados da secção transversal descritos nas alíneas anterior.

28) Abra o ficheiro **inputFile\_PS.m**.

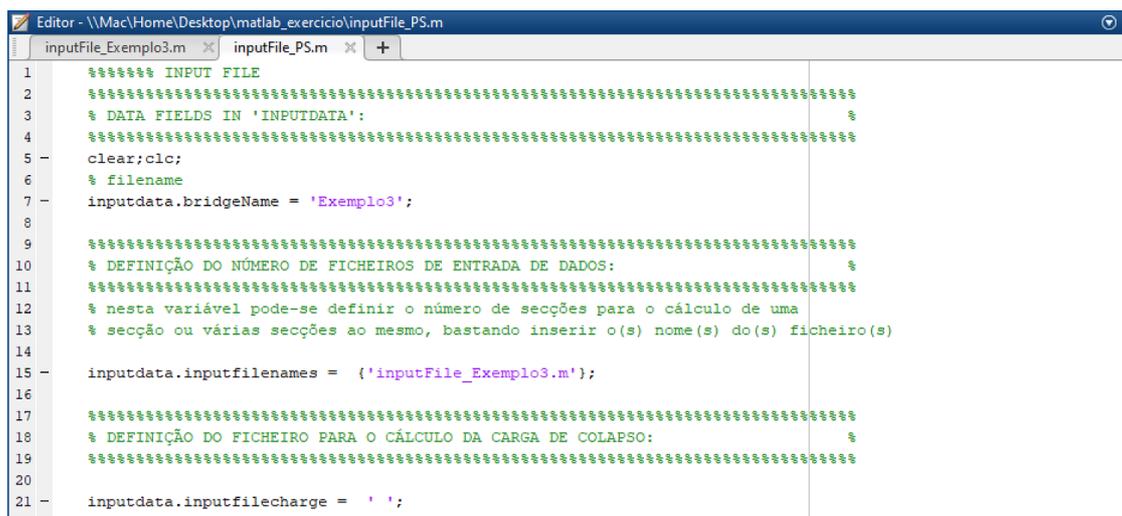
29) Define a variável **inputdata.bridgename** com o nome “Exemplo 3”.

30) Define a variável **inputdata.inputfilenames** com o nome do ficheiro de entrada de dados da secção transversal **inputFile\_Exemplo3.m**.

31) Define a variável **inputdata.inputfilecharge** com o nome do ficheiro de entrada de dados da análise longitudinal, neste exercício não é efetuada a análise.

32) Por fim, para gravar o ficheiro, clique no botão **Save**.

Na Figura B.64 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades do ficheiro de entrada de dados **inputFile\_PS.m**.



```
1 %***** INPUT FILE
2 %*****
3 % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4 %*****
5 clear;clc;
6 % filename
7 inputdata.bridgeName = 'Exemplo3';
8
9 %*****
10 % DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS:
11 %*****
12 % nesta variável pode-se definir o número de secções para o cálculo de uma
13 % secção ou várias secções ao mesmo, bastando inserir o(s) nome(s) do(s) ficheiro(s)
14
15 inputdata.inputfilenames = {'inputFile_Exemplo3.m'};
16
17 %*****
18 % DEFINIÇÃO DO FICHEIRO PARA O CÁLCULO DA CARGA DE COLAPSO:
19 %*****
20
21 inputdata.inputfilecharge = ' ';
```

Figura B.64: Propriedades do ficheiro de input dados inputFile\_PS.m.

Em seguida, descrevem-se as diversas opções de iniciação da ferramenta.

33) Inicie a ferramenta a partir da janela de comandos (Command Window) do *Matlab* escrevendo **mainCalculoVigasMistas**.

34) Escreva o nome do arquivo de entrada a partir da linha de comandos do *Matlab* escrevendo ‘**inputFile\_PS.m**’.

35) Em seguida, digite **3**, para proceder ao cálculo automático do momento fletor resistente.

36) Para terminar, clique em **Enter**.

Depois de ter gerado o cálculo correspondente à opção pretendida, os resultados podem ser consultados através da janela de comandos (Command Window) do Matlab. Consulte a Figura B.65 para conhecer os dados identificadores do caso de estudo

```
Command Window
0: Exit
1: Help
2: Effective web
3: Plastic moment
4: Collapse load

CHOOSE OPTION FROM THE LIST ABOVE: 3

ANÁLISE DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS MISTAS
IDENTIFICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO...

NOME DA PONTE: Exemplo3
VÃO EM ESTUDO: V
SECÇÃO EM ESTUDO: S1
TIPO DE SECÇÃO: I
VÃO EM ESTUDO: extremo
SECÇÃO EM ESTUDO: meio vão
MOMENTO EM ESTUDO: +
```

Figura B.65: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, dos dados identificadores do caso de estudo.

A ferramenta disponibiliza uma função para determinar as propriedades do perfil metálico após a introdução das coordenadas geométricas dos elementos a que estas respeitem. Consulte a Figura B.66 para conhecer os resultados das propriedades do perfil metálico fornecidos pela ferramenta e da largura efetiva do banzo de betão.

```
Command Window
PROPRIEDADES DO PERFIL METÁLICO...

Área: 0.01752 m2
zg: 0.202 m
yg: 0.15 m
Iy: 0.00052874 m4
Iz: 9.9052e-05 m4
iy: 0.17372 m
iz: 0.075191 m
Wpl,y,sup: 0.0026175 m3
Wpl,y,inf: 0.0026175 m3
Wpl,z,sup: 0.00066035 m3
Wpl,z,inf: 0.00066035 m3

LARGURA EFECTIVA DO BANZO...

Le : 8 m
bo : 0.1 m
bei. Largura lado esquerdo : 1 m
bei. Largura lado direito : 1 m
beff : 2.1 m
```

Figura B.66: Visualização, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, das propriedades do perfil e largura efetiva do banzo de betão.

A Figura B.67 apresenta os resultados da posição do eixo neutro e do momento fletor resistente, e a classificação da secção transversal.

```
Command Window
CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL...

banzo é de Classe 1
alma é de Classe 1
secção transversal é de Classe 1

POSIÇÃO DO EIXO NEUTRO...

EN na zona maciça do banzo de betão
x: 0.13812 m

MOMENTO RESISTENTE...

Mp1,rd: 1288.4427 kN.m
```

Figura B.67: Visualização dos resultados, através da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab*, da classificação da secção transversal, posição do eixo neutro e momento fletor resistente.

Na Figura B.68 ilustra-se o gráfico que permite verificar se as coordenadas da secção transversal foram introduzidas corretamente.

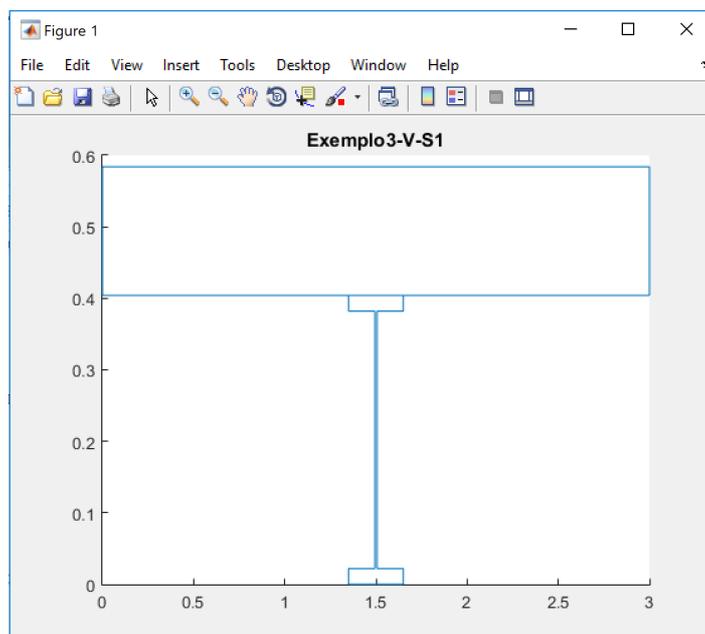


Figura B.68: Visualização da representação gráfica da secção transversal.

### 7.3 ANEXO C – Análise longitudinal

O exemplo incluído no capítulo 4 pretende transmitir os conceitos fundamentais sobre o uso das diferentes opções das funções da ferramenta de modo a que o utilizador possa adquirir o conhecimento e a sensibilidade para efetuar a análise longitudinal de pontes mistas.

1) Abra o ficheiro **inputFile\_charge.m**;

É apresentado o ficheiro de entrada de dados que lista todas as variáveis que definem as propriedades para análise longitudinal da ponte. Em seguida, descreve-se a função de cada uma das diferentes variáveis do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) para tráfego rodoviário:

- 2) No parâmetro **inputdata.colapsoRsa**, digite 1, para permitir a análise longitudinal de pontes rodoviárias segundo o regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes (RSA).
- 3) Introduza na variável **inputdata.section.colapsoRsa.Q**, o vetor linha das cargas concentradas,  $Q$ , transmitidas por cada eixo. O primeiro elemento,  $Q_1$ , igual a 200 kN e o último elemento,  $Q_2$ , igual a 200 kN.
- 4) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.colapsoRsa.q**, o vetor linha da sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída,  $q_1$ , e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme,  $q_2$ . O primeiro elemento,  $q_1$ , igual a 4 kN/m<sup>2</sup> e o último elemento,  $q_2$ , igual a 50 kN/m.

Consulte a Figura C.1 para conhecer os parâmetros que definem as propriedades dos tipos de cargas a aplicar na ponte.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_charge.m
inputFile_PS.m  inputFile_charge.m  +
1      %***** INPUT FILE
2      %*****
3      % DATA FIELDS IN 'INPUTDATA':
4      %*****
5
6      %*****
7      % AÇÕES ESPECÍFICAS DE PONTES RODOVIÁRIAS SEGUNDO RSA:
8      %*****
9      %Cálculo da carga de colapso
10     inputdata.colapsoRsa = (1); % calculo da carga de colapso 1- sim 0 - não
11
12             % (Q1)   (Q2)
13             % [kN]   [kN]
14     inputdata.section.colapsoRsa.Q = [ 200  200 ];
15     % Q - valor das cargas transmitidas por cada eixo;
16
17             % (q1)   (q2)
18             % [kN/m2] [kN/m]
19     inputdata.section.colapsoRsa.q = [ 4.0  50 ];
20     % q1 - sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída;
21     % q2 - uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme;
22

```

Figura C.1: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte.

- 5) Indique na variável **inputdata.section.colapsoRsa.a\_b**, o vetor linha das dimensões, a e b, das superfícies de contacto das rodas. O primeiro elemento, a, igual a 0,20 m e o último elemento, b, igual a 0,60 m.
- 6) Depois, na variável **inputdata.section.colapsoRsa.l1**, digite “2” para indicar a distância transversal em relação ao eixo do veículo de três eixos equidistantes, cada um de duas rodas.
- 7) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.colapsoRsa.l2**, o vetor linha das distâncias longitudinais em relação ao eixo do veículo de três eixos equidistantes, cada um de duas rodas. O primeiro elemento igual a 1,5 m e o último elemento igual a 1,5 m.

Na Figura C.2 ilustram-se os parâmetros que definem a disposição e dimensões das cargas.

```

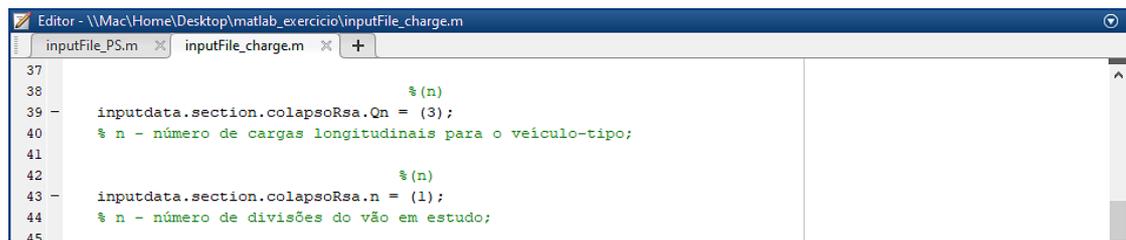
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_charge.m
inputFile_PS.m  inputFile_charge.m  +
23             % (a)   (b)
24             % [m]   [m]
25     inputdata.section.colapsoRsa.a_b = [ 0.20  0.60 ];
26     % a e b - dimensões das superfícies de contacto das rodas;
27
28             % (l1)
29             % [m]
30     inputdata.section.colapsoRsa.l1 = (2.0);
31     % l1 - distância entre cargas transversais;
32
33             % (l2)
34             % [m]
35     inputdata.section.colapsoRsa.l2 = [ 1.5  1.5 ];
36     % l2 - distância entre cargas longitudinais;
37

```

Figura C.2: Escolha da disposição e dimensões das cargas a aplicar na ponte.

- 8) Introduza na variável **inputdata.section.colapsoRsa.Qn**, o algarismo “3” para especificar o número de cargas longitudinais para o veículo-tipo.
- 9) Por fim, digite na variável **inputdata.section.colapsoRsa.n**, o algarismo “1” para a definição da variável de incremento da distância para a deslocação do veículo tipo sobre o tabuleiro da ponte.

No que se refere à definição da configuração cargas, destacam-se os parâmetros descritos na Figura C.3.



```
Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_charge.m
inputFile_PS.m  inputFile_charge.m  +
37
38                               % (n)
39 -   inputdata.section.colapsoRsa.Qn = (3);
40   % n - número de cargas longitudinais para o veículo-tipo;
41
42                               % (n)
43 -   inputdata.section.colapsoRsa.n = (1);
44   % n - número de divisões do vão em estudo;
45
```

Figura C.3: Parâmetros da definição da configuração do veículo-tipo.

Em seguida, iremos abordar as funções de edição que se aplicam apenas à norma EN 1991-2 para o tráfego rodoviário:

- 10) No parâmetro **inputdata.colapsoEC1**, digite 1, para permitir a análise longitudinal de pontes rodoviárias segundo a definição do modelo de carga LM1 do eurocódigo 1.
- 11) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.colapsoEC1.Q**, o vetor linha das cargas concentradas, Q, transmitidas por cada eixo. O primeiro elemento,  $Q_1$ , igual a 300 kN, o segundo elemento,  $Q_2$ , igual a 200 kN e o último elemento,  $Q_3$ , igual a 100 kN.
- 12) Indique na variável **inputdata.section.colapsoEC1.q**, o vetor linha das sobrecargas constituídas por cargas uniformemente distribuídas,  $q_{ik}$ , , como se ilustra na Figura C.4.

A Figura C.4 ilustra a diferença dos parâmetros que definem as propriedades dos tipos de cargas a aplicar na ponte.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_charge.m
inputFile_PS.m  inputFile_charge.m  +
45
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47 % AÇÕES ESPECÍFICAS DE PONTES RODOVIÁRIAS SEGUNDO EC1:
48 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
49 %Cálculo da carga de colapso
50 inputdata.colapsoEC1 = (1); % calculo da carga de colapso 1- sim 0 - não
51
52 % (Q1) (Q2) (Q3)
53 % [kN] [kN] [kN]
54 inputdata.section.colapsoEC1.Q = [ 300 200 100 ];
55 % Q1 - valor da carga transmitida por cada eixo;
56 % Q2 - valor da carga transmitida por cada eixo;
57 % Q3 - valor da carga transmitida por cada eixo;
58
59
60 % (q1k) (q2k) (q3k) (qrk)
61 % [kN/m2] [kN/m2] [kN/m2] [kN/m2]
62 inputdata.section.colapsoEC1.q = [ 9 2.5 2.5 2.5 ];
63

```

Figura C.4: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte.

- 13) Na variável **inputdata.section.colapsoEC1.a**, digite “0,5” para indicar a distância que os veículos terão de estar afastados, para o caso de duas vias adjacentes.
- 14) Depois, na variável **inputdata.section.colapsoEC1.l1**, digite “2” para indicar a distância transversal em relação ao eixo do veículo de dois eixos equidistantes, cada um de duas rodas.
- 15) Em seguida, na variável **inputdata.section.colapsoEC1.l2**, digite “1,2” para indicar a distância longitudinal em relação ao eixo do veículo de dois eixos equidistantes, cada um de duas rodas.

No que se refere às propriedades da definição da disposição e dimensões das cargas, destacam-se os parâmetros descritos na Figura C.5.

```

Editor - \\Mac\Home\Desktop\matlab_exercicio\inputFile_charge.m
inputFile_PS.m  inputFile_charge.m  +
63
64 % (a)
65 % [m]
66 inputdata.section.colapsoEC1.a = (0.5);
67 % a - dimensões das superfícies de contacto das rodas;
68
69 % (l1)
70 % [m]
71 inputdata.section.colapsoEC1.l1 = (2);
72 % l1 - distância entre cargas transversais;
73
74 % (l2)
75 % [m]
76 inputdata.section.colapsoEC1.l2 = [1.2];
77 % l2 - distância entre cargas longitudinais;
78

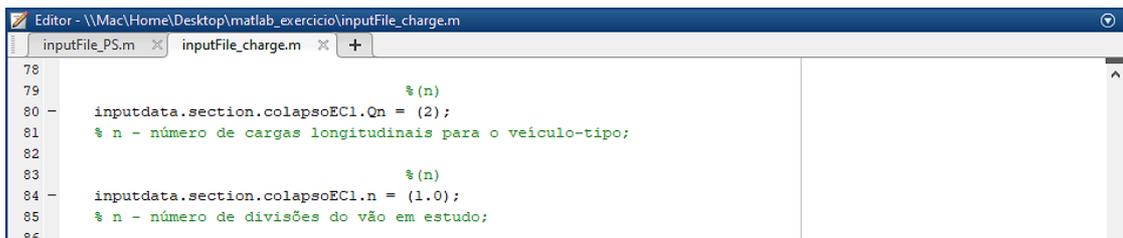
```

Figura C.5: Escolha da disposição e dimensões das cargas a aplicar na ponte.

- 16) Introduza na variável **inputdata.section.colapsoEC1.Qn**, o algarismo “2” para especificar o número de cargas longitudinais para o veículo-tipo.

17) Digite na variável **inputdata.section.colapsoEC1.n**, o algarismo “1 para a definição da variável de incremento da distância para a deslocação do veículo-tipo sobre o tabuleiro da ponte.

A Figura C.6 descreve os parâmetros que definem as propriedades dos tipos dos dados identificadores do caso de estudo.



```
78
79                                     %(n)
80 - inputdata.section.colapsoEC1.Qn = (2);
81   % n - número de cargas longitudinais para o veículo-tipo;
82
83                                     %(n)
84 - inputdata.section.colapsoEC1.n = (1.0);
85   % n - número de divisões do vão em estudo;
86
```

Figura C.6: Parâmetros da definição da configuração do veículo-tipo.

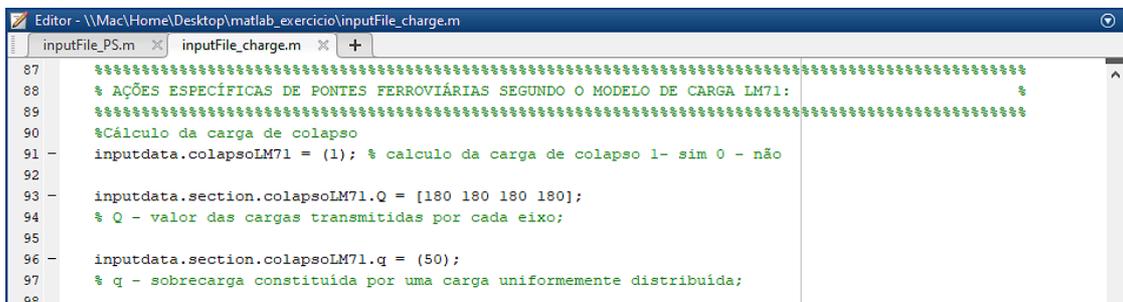
A seguir, iremos abordar as funções de edição que se aplicam apenas à norma EN 1991-2 para o tráfego ferroviário:

18) No parâmetro **inputdata.colapsoLM71**, digite 1, para permitir a análise longitudinal de pontes ferroviárias segundo a definição do modelo de carga LM71 do eurocódigo 1.

19) Em seguida, indique na variável **inputdata.section.colapsoLM71.Q**, o vetor linha das cargas concentradas, Q , como se ilustra na Figura C.6.

20) Na variável **inputdata.section.colapsoLM71.q**, digite “80” para indicar o valor da sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída, q.

Na Figura C.7 ilustram-se os parâmetros que definem as propriedades dos tipos de cargas a aplicar na ponte.

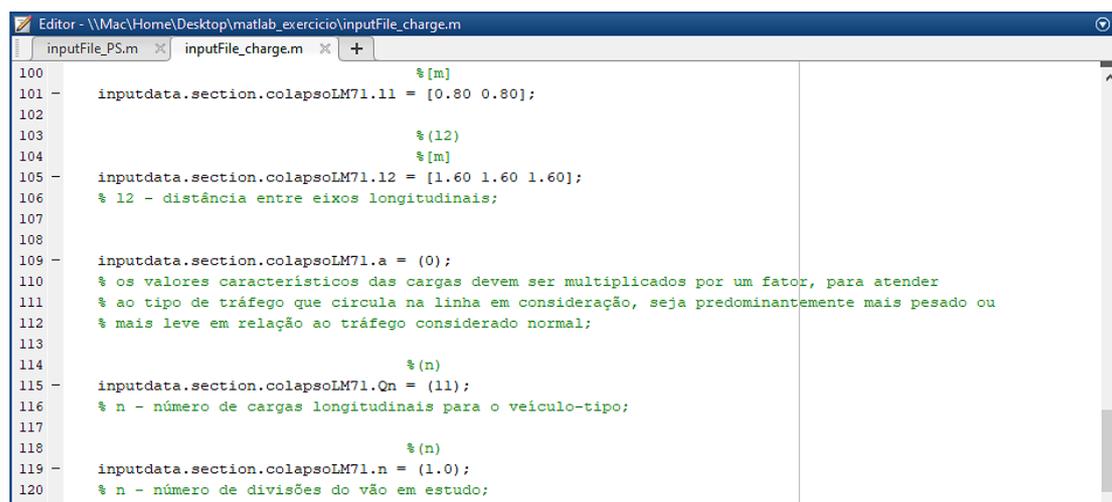


```
87
88 % AÇÕES ESPECÍFICAS DE PONTES FERROVIÁRIAS SEGUNDO O MODELO DE CARGA LM71:
89 %~~~~~
90 %Cálculo da carga de colapso
91 - inputdata.colapsoLM71 = (1); % calculo da carga de colapso 1- sim 0 - não
92
93 - inputdata.section.colapsoLM71.Q = [180 180 180 180];
94   % Q - valor das cargas transmitidas por cada eixo;
95
96 - inputdata.section.colapsoLM71.q = (50);
97   % q - sobrecarga constituída por uma carga uniformemente distribuída;
98
```

Figura C.7: Escolha da configuração das cargas a aplicar na ponte.

- 21) Depois, na variável **inputdata.section.colapsoLM71.I1**, indique o vetor linha da distância entre a carga uniformemente distribuída,  $q$ , e a carga concentrada,  $Q$ . O primeiro elemento igual a 0,8 m e o último elemento igual a 0,8 m.
- 22) No parâmetro **inputdata.section.colapsoLM71.I2**, indique o vetor linha da carga uniformemente distribuída,  $q$ , como se ilustra na Figura C.8.
- 23) Em seguida, digite na variável **inputdata.section.colapsoLM71.a**, o algarismo “0” para especificar o fator que as cargas devem ser multiplicadas, para atender ao tipo de tráfego que circula na linha em consideração, seja predominantemente mais pesado ou mais leve em relação ao tráfego considerado normal, como se ilustra na Figura C.8.
- 24) Introduza na variável **inputdata.section.colapsoLM71.Qn**, o algarismo “4” para especificar o número de cargas longitudinais para o comboio-tipo.
- 25) Digite na variável **inputdata.section.colapsoLM71.n**, o algarismo “1” para a definição da variável de incremento da distância para a deslocação do comboio-tipo sobre o tabuleiro da ponte.

No que se refere às propriedades da definição da disposição e dimensões das cargas, destacam-se os parâmetros descritos na Figura C.8.



```

100 % [m]
101 - inputdata.section.colapsoLM71.I1 = [0.80 0.80];
102
103 % (12)
104 % [m]
105 - inputdata.section.colapsoLM71.I2 = [1.60 1.60 1.60];
106 % 12 - distância entre eixos longitudinais;
107
108
109 - inputdata.section.colapsoLM71.a = (0);
110 % os valores característicos das cargas devem ser multiplicados por um fator, para atender
111 % ao tipo de tráfego que circula na linha em consideração, seja predominantemente mais pesado ou
112 % mais leve em relação ao tráfego considerado normal;
113
114 % (n)
115 - inputdata.section.colapsoLM71.Qn = (11);
116 % n - número de cargas longitudinais para o veículo-tipo;
117
118 % (n)
119 - inputdata.section.colapsoLM71.n = (1.0);
120 % n - número de divisões do vão em estudo;

```

Figura C.8: Parâmetros da definição da configuração do comboio-tipo

Em seguida, iremos abordar as funções de edição para estimar o custo dos elementos que formam o tabuleiro da ponte.

- 26) No parâmetro **inputdata.CostBridge**, digite 1, para estimar o custo dos elementos do tabuleiro da ponte em estudo.
- 27) Introduza na variável **inputdata.CostConcr**, o custo unitário do betão (cm<sup>3</sup>).
- 28) Digite na variável **inputdata.Coststeel**, o custo unitário do aço estrutural (kg).
- 29) No parâmetro **inputdata.CostReinf**, indique o custo unitário das armaduras ordinárias (kg).

Após a definição de todos os parâmetros do ficheiro de entrada de dados dos modelos de sobrecargas, é necessário definir os parâmetros do ficheiro **inputFile\_PS.m** que efetua chamada dos ficheiros de entrada de dados, descritos nas alíneas anterior.

- 30) Abra o ficheiro **inputFile\_PS.m**.
- 31) Defina a variável **inputdata.bridgename** com o nome do caso de estudo.
- 32) Defina a variável **inputdata.inputfilenames** com o nome do ficheiro de entrada de dados das secções transversais descritos nos exemplos anteriores.
- 33) Defina a variável **inputdata.inputfilecharge** com o nome do ficheiro de input dados da análise longitudinal, neste exercício não é efetuada a análise.
- 34) Por fim, para gravar o ficheiro, clique no botão **Save**.

Em seguida, descrevem-se as diversas opções de iniciação da ferramenta.

- 35) Inicie a ferramenta a partir da janela de comandos (*Command Window*) do *Matlab* escrevendo **mainCalculoVigasMistas**.
- 36) Escreva o nome do arquivo de entrada a partir da linha de comandos do *Matlab* escrevendo '**inputFile\_PS.m**'.
- 37) Em seguida, digite **4**, para proceder à determinação da carga de rotura e estimar o custo do tabuleiro.
- 38) Para terminar, clique em **Enter**.

#### 7.4 ANEXO D – Esquematização de diferentes soluções

Este anexo descreve como definir os tipos de secções transversais na ferramenta, destacando-se os seguintes temas: multi-viga e duplo-caixão. Para usar adequadamente a ferramenta necessita de saber como manipular os ficheiros de dados, assunto que se aborda nos tópicos seguintes.

##### Secção multi-viga

Na ferramenta, existe uma diferença importante entre as secções multi-viga de três e quatro vigas. Para introduzir secções multi-viga de três vigas é necessário dividir a secção em três subsecções (ver Figura D.1). A configuração da secção transversal refere-se ao controlo de um conjunto de opções que afetam o funcionamento do programa. Por predefinição, só é necessário criar um ficheiro de entrada de dados da secção S1 (ver Figura D.1), porque estas subsecções são iguais. Tenha presente, que é fundamental inserir as subsecções que estão sombreadas na figura A.4.1 para o correto funcionamento da ferramenta. Tenha em atenção, quando identificar os ficheiros de entrada de dados das secções transversais no ficheiro `inputFile_PS.m`, introduzir sempre com a seguinte ordem, em primeiro lugar subsecção S1 e por última subsecção S2 e assim sucessivamente nas restantes secções multi-viga.

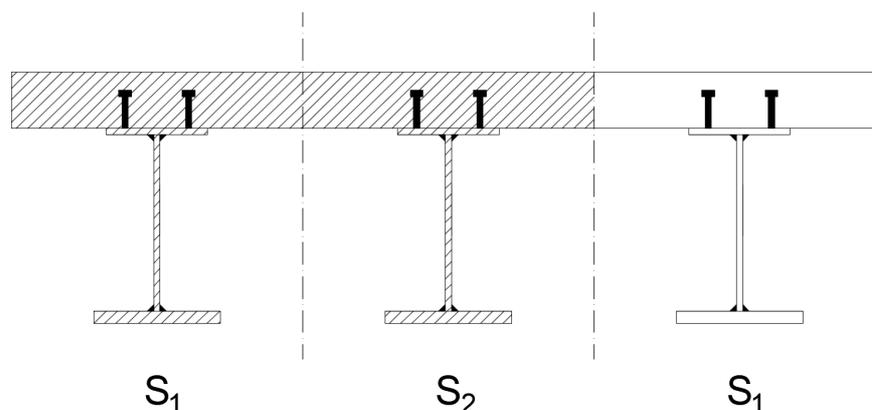


Figura D.1: Visualização da representação gráfica da secção transversal multi-viga (3 vigas).

Para secções de multi-viga de quatro vigas o procedimento é semelhante ao de três vigas, só existe a diferença na divisão da secção. É necessário dividir a secção multi-viga em quatro subsecções (ver Figura D.2). Tenha presente, que é fundamental inserir as subsecções que estão sombreadas na Figura D.2 para o correto funcionamento da ferramenta.

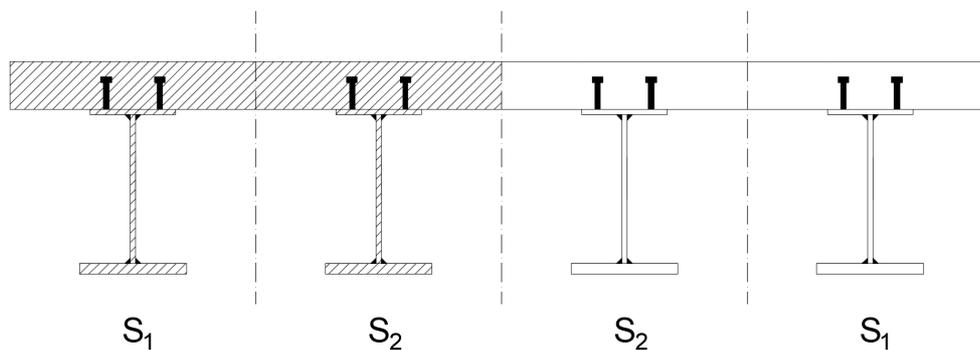


Figura D.2: Visualização da representação gráfica da secção transversal multi-viga (4 vigas).

### Secção duplo-caixão

Para secções de duplo-caixão o procedimento é semelhante às secções de multi-viga, só existe a diferença na divisão da secção. É necessário dividir a secção duplo-caixão em quatro subsecções (ver Figura D.3). Tenha presente, que é fundamental inserir as subsecções que estão sombreadas na Figura D.3 para o correto funcionamento da ferramenta.

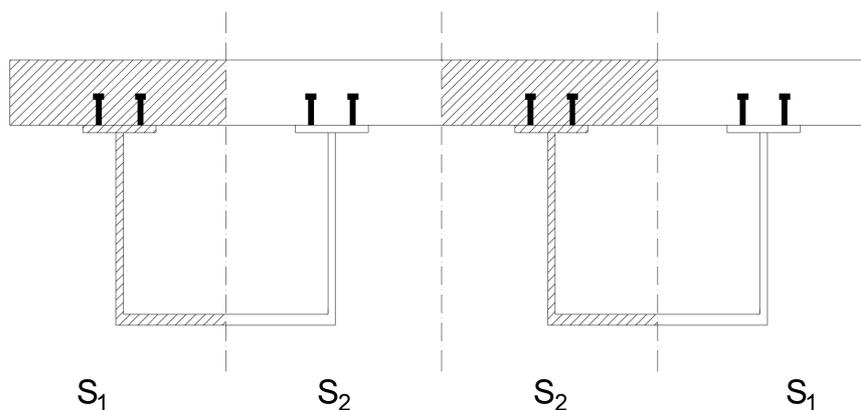


Figura D.3: Visualização da representação gráfica da secção transversal duplo-caixão.