



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Miguel Morgado Eira

Desenvolvimento de ferramenta vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Miguel Morgado Eira

Desenvolvimento de ferramenta vocacionada
para o dimensionamento de estruturas
metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente
Engenheiro Nuno Miguel Mota Pires

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho contou com a colaboração de várias pessoas que fizeram com que ele se tornasse uma experiência enriquecedora a vários níveis. Por esse motivo desejo manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a sua realização. De uma forma particular expresso a minha gratidão àqueles que deram os mais importantes contributos diretos:

- À Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente, pela disponibilidade, organização, profissionalismo, empenho e simpatia com que, de forma incansável, orientou este projeto. A sua dedicação e conhecimentos foram essenciais para o trabalho desenvolvido.
- Ao Engenheiro Nuno Miguel Mota Pires, pela simpatia com que me acolheu na CASAIS – Engenharia e Construção S.A., proporcionando sempre as condições mais favoráveis ao desenvolvimento do trabalho. O seu esforço e dedicação possibilitaram que este projeto fosse muito mais que um trabalho confinado a fins académicos.
- Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, a todos os docentes e em especial ao Professor Rui António Rodrigues Ramos, Diretor de Curso do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, pelo apoio e condições proporcionadas.
- À CASAIS – Engenharia e Construção S.A. por acolher este projeto, e em especial a todos os que integram o Departamento Técnico pela simpatia com que me receberam.

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA VOCACIONADA
PARA O DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS
DE ACORDO COM A NP EN 1993-1-1**

João Miguel Morgado Eira

Estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Universidade do Minho

O presente documento descreve o desenvolvimento de uma ferramenta informática vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1. A ferramenta *AciariUM* é direcionada para a verificação e dimensionamento aos estados limite últimos de vigas-coluna em aço sujeitas a flexão composta desviada: secções transversais em I e H, perfis dos tipos laminado a quente e reconstituído soldado. Foi desenvolvida como um instrumento de análise de elementos em aço e de verificação expedita dos resultados recolhidos a partir de programas comerciais de análise estrutural.

Porque alguns dos programas de análise estrutural disponíveis no mercado não permitem ao utilizador total controlo sobre os procedimentos que dão origem aos resultados que lhe são apresentados, o chamado efeito de “caixa negra”, justifica-se a importância de dispor de ferramentas práticas, intuitivas e de utilização simples que contrariem essa tendência e que permitam validar os resultados devolvidos por esses programas.

Um estudo comparativo focado na avaliação da eficácia e versatilidade de *software* comercial de análise estrutural permitiu reforçar as considerações do parágrafo anterior. A metodologia de cálculo implementada é resultado de pesquisa e de estudos que tiveram como objetivo a procura das soluções mais adequadas. A ferramenta foi desenvolvida em formato de ficheiro do Microsoft Office Excel utilizando programação em Visual Basic.

A *AciariUM* realiza verificações aos estados limite últimos da resistência das secções transversais e da estabilidade dos elementos. Todo o algoritmo de cálculo está disponível para consulta e edição.

A ferramenta apresenta uma estrutura coerente, organizada em interfaces dedicados a procedimentos específicos bem definidos. Dispõe de diferentes módulos de introdução de dados, sendo possível recolher automaticamente informação a partir de modelos construídos no programa *Robot Structural Analysis*, o que facilita o trabalho de validação de resultados. São apresentadas em tempo real instruções e informações relativas a todos os parâmetros. No final, é gerado um relatório de cálculo pronto para exportação.

O trabalho de validação da ferramenta foi desenvolvido com a colaboração da empresa CASAIS – Engenharia e Construção S.A. Essa validação atesta a eficiência da ferramenta *AciariUM* por comparação dos resultados por ela fornecidos com os devolvidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para o caso estudado. São apresentadas estratégias e definidos procedimentos de análise estrutural adequados ao referido caso de estudo.

Palavras-chave: ferramenta informática de cálculo; estruturas metálicas; vigas-coluna em aço; NP EN 1993-1-1; *AciariUM*; flexão composta desviada; estados limite últimos.

**DEVELOPMENT OF A NUMERICAL TOOL DEDICATED
TO THE DESIGN AND SAFETY ASSESSMENT OF STEEL STRUCTURES
ACCORDING TO NP EN 1993-1-1**

João Miguel Morgado Eira
Estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Civil
Universidade do Minho

This document describes the development of a numerical tool dedicated to the design and safety assessment of steel structures, according to NP EN 1993-1-1. The tool, named *AciariUM*, is designed to evaluate the ultimate limit states of hot rolled and welded I and H-shaped steel elements subjected to biaxial bending with axial force. *AciariUM* was developed as an instrument of steel member analysis and as a tool to be used in the validation of results obtained from commercial software.

Some of the existing structural analysis software applications available on the market do not provide the user an absolute control over the whole calculation procedure that is the base of the given results, resulting in a “black box” effect. Therefore, it is important to have practical, intuitive and simple tools that counter this trend and allow the user to validate those results.

A comparative study focused on the evaluation of efficacy and versatility of existing commercial software applications emphasises the considerations made in the last paragraph. The implemented calculation procedure is a result of research and studies conducted with the purpose of finding the most suitable solutions. This numerical tool was developed as a Microsoft Office Excel file, using automation from Visual Basic.

AciariUM runs ultimate limit state verifications of cross-sections resistance and member’s stability. The entire algorithm is available for editing.

AciariUM has a coherent structure organized in interfaces dedicated to well-defined specific procedures. Different modes of data entry are available and data can also be accessed from a structure model defined in a *Robot Structural Analysis* project, making easier the validation of results. Information and instructions concerning all parameters are presented in real time. At the end an exportable results report is generated.

The validation work was developed with the contribution of the company CASAIS – Engenharia e Construção S.A. It proved the *AciariUM* efficiency by comparing the obtained results with the ones given by the commercial software *Robot Structural Analysis* and *CYPE 3D* for the studied case. Strategies are presented and procedures are defined for structural analysis in respect to the mentioned case study.

Key-words: numerical tool; steel structures; NP EN 1993-1-1; *AciariUM*; biaxial bending with axial force; ultimate limit states.

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do trabalho	3
1.4	Metodologia do trabalho desenvolvido.....	4

Capítulo 2 – AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE CÁLCULO COMERCIAIS

2.1	Introdução e Enquadramento.....	5
2.2	Valores de cálculo das propriedades do aço estrutural.....	5
2.3	Tipos de perfis metálicos	6
2.4	Dimensionamento de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1]	6
2.4.1	Momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr})	6
2.5	<i>Softwares</i> de cálculo de Estruturas Metálicas	7
2.5.1	<i>A3C Columns Calculator (ArcelorMittal)</i>	7
2.5.2	<i>Softwares</i> de análise avançada de estruturas.....	8
2.6	Estudo comparativo de <i>softwares</i> de cálculo de Estruturas Metálicas	9
2.6.1	Modelo de Teste 1	9
2.6.1.1	Análise de estabilidade global do elemento – Método 1	11
2.6.1.2	Análise de estabilidade global do elemento – Método 2	12
2.6.2	Modelo de Teste 2	13
2.6.2.1	Análise de estabilidade global do elemento – Método 1	15
2.6.2.2	Análise de estabilidade global do elemento – Método 2	16
2.6.3	Modelo de Teste 3	17
2.6.3.1	Análise de estabilidade global do elemento – Método 1	19
2.6.3.2	Análise de estabilidade global do elemento – Método 2	20
2.6.4	Modelo de Teste 4	21

2.6.4.1	Análise de estabilidade global do elemento – Método 1	23
2.6.4.2	Análise de estabilidade global do elemento – Método 2	24
2.7	Interpretação dos resultados obtidos no estudo comparativo.....	25
2.7.1	Classificação da secção transversal.....	25
2.7.2	Verificação da resistência da secção transversal.....	26
2.7.3	Modelação das condições de apoio e travamento lateral em verificações à encurvadura e encurvadura lateral.....	27
2.7.4	Resistência do elemento à encurvadura lateral	31
2.7.4.1	<i>Robot Structural Analysis</i>	31
2.7.4.2	<i>CYPE 3D</i>	32
2.7.4.3	<i>A3C Columns Calculator</i>	33
2.7.5	Avaliação da capacidade de consideração do parâmetro z_g pelos programas.....	34
2.7.6	Avaliação da capacidade de determinação do parâmetro z_j pelos programas.....	35
2.7.7	Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão.....	35
2.7.7.1	Método alternativo 1 - Anexo A.....	36
2.7.7.2	Método alternativo 2 - Anexo B.....	36
2.7.8	Perfil ótimo para a secção transversal	37
2.8	Guia resumo de limitações e campo de aplicabilidade do <i>software</i>	38
2.8.1	<i>Robot Structural Analysis</i> :	38
2.8.2	<i>CYPE 3D</i>	38
2.8.3	<i>A3C Columns Calculator</i> :.....	39
2.9	Notas conclusivas relativamente à avaliação da performance dos programas de cálculo analisados	40

Capítulo 3 – FERRAMENTA DE CÁLCULO *ACIARIUM*

3.1	Enquadramento.....	43
3.2	Apresentação da ferramenta <i>AciariUM</i>	43
3.3	Estrutura global da ferramenta <i>AciariUM</i>	44
3.4	Estrutura interna de cada interface da ferramenta <i>AciariUM</i>	45
3.5	Interface I. Secção transversal e propriedades do material	46
3.5.1	Tipo e geometria da secção transversal	46

3.5.2	Módulo Comercial de definição da geometria da secção transversal	48
3.5.3	Módulo Manual de definição da geometria da secção transversal.....	49
3.5.4	Módulo Robot Structural Analysis de definição da geometria da secção transversal.	49
3.5.5	Propriedades do material e parâmetros gerais do cálculo.....	51
3.5.5.1	Classe de resistência do aço	51
3.5.5.2	Propriedades gerais do aço.....	51
3.5.5.3	Coefficientes parciais de segurança.....	52
3.6	Interface II. Condições de apoio, travamento e solitação do elemento.....	53
3.6.1	Módulo Manual de definição das condições de apoio, travamento e solitação.....	54
3.6.2	Módulo Robot Structural Analysis de recolha e definição das condições de apoio, travamento e solitação	54
3.6.3	Módulo Automático de Pré-Dimensionamento para modelação e determinação das condições de apoio, travamento e solitação	55
3.6.3.1	Definição das condições de apoio do sistema estrutural.....	57
3.6.3.2	Definição das condições de travamento do elemento viga-coluna.....	58
3.6.3.3	Definição das condições de carregamento.....	58
3.6.3.4	Cálculo e esboço dos diagramas de esforços	59
3.6.3.5	Recolha de resultados	59
3.7	Interface III. Resistência da secção transversal aos ELU	60
3.7.1	Classificação da secção transversal.....	61
3.7.2	Interface III para o caso de uma secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2.....	61
3.7.3	Interface III para o caso de secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2.....	62
3.7.4	Interface III para o caso de uma secção transversal da Classe 3.....	63
3.7.5	Interface III para o caso de uma secção transversal da Classe 4.....	63
3.8	Interface IV. Resistência do elemento à encurvadura.....	65
3.8.1	Encurvadura (Varejamento).....	66
3.8.2	Encurvadura Lateral (Bambeamento).....	66
3.8.2.1	Módulo Manual de definição do valor de M_{cr}	66
3.8.2.2	Módulo Automático de definição do valor de M_{cr}	66
3.8.3	Encurvadura por esforço transversal	68
3.8.3.1	Módulo de Verificação	69

3.8.3.2	Módulo de Dimensionamento	69
3.9	Interface V. Verificação da estabilidade global.....	70
3.10	Interface VI. Relatório de segurança	71
3.11	Outras funcionalidades.....	73
3.12	Resolução de problemas/erros	73
3.12.1	Dispositivo de Segurança com registo de alterações.....	73
3.12.2	Erro no algoritmo de cálculo do Visual Basic	74
3.12.3	Figura não exibida ou exibida a figura incorreta.....	74
3.12.4	Suporte.....	75
3.13	Aviso Legal	75

Capítulo 4 – MÉTODOLOGIA E EXPRESSÕES DE CÁLCULO

4.1	Enquadramento.....	77
4.2	Propriedades do material (aço).....	77
4.3	Coeficientes parciais de segurança.....	77
4.4	Propriedades mecânicas da secção transversal.....	78
4.4.1	Definição da geometria da secção transversal	78
4.4.2	Determinação das propriedades mecânicas da secção transversal	79
4.5	Determinação de reações, esforços e parâmetros relacionados com as condições de apoio e travamento do elemento viga-coluna.....	82
4.6	Classificação das secções transversais.....	83
4.7	Secções transversais da Classe 4	85
4.7.1	Considerações gerais	85
4.7.2	Método de verificação da capacidade resistente de secções da Classe 4	85
4.7.3	Determinação das propriedades efetivas das secções da Classe 4	86
4.7.4	Cálculo da área efetiva A_{eff} e do afastamento e_N entre os centros de gravidade das áreas das secções bruta e efetiva	89
4.7.5	Cálculo do módulo de flexão efetivo em torno do eixo y ($W_{eff,y}$).....	89
4.7.6	Cálculo do módulo de flexão efetivo em torno do eixo z ($W_{eff,z}$)	90
4.8	Verificação de segurança da secção transversal em ELU.....	91
4.8.1	Esforço axial de tração (N_t).....	91
4.8.2	Esforço axial de compressão (N_c)	92

4.8.3	Esforço transverso (V).....	92
4.8.3.1	Secções das Classes 1, 2 ou 3.....	92
4.8.3.2	Secções da Classe 4.....	92
4.8.4	Esforço de Flexão (M_y ou M_z).....	93
4.8.5	Esforço de flexão com esforço transverso ($M_y + V_z$ ou $M_z + V_y$).....	94
4.8.5.1	Módulos de flexão $W_{pl,v}$ e $W_{pl,r}$ - Secções das Classes 1 e 2.....	96
4.8.5.2	Módulos de flexão $W_{el,v}$ e $W_{el,r}$ - Secções da Classe 3.....	97
4.8.5.3	Módulos de flexão $W_{eff,v}$ e $W_{eff,r}$ - Secções da Classe 4.....	98
4.8.6	Flexão compsta com esforço transverso ($M_y + V_z + N$ ou $M_z + V_y + N$).....	100
4.8.6.1	Secções transversais duplamente simétricas das Classes 1 e 2.....	100
4.8.6.2	Outras secções transversais.....	100
4.8.7	Flexão composta desviada ($M_y + M_z + N$).....	101
4.8.7.1	Secções transversais duplamente simétricas das Classes 1 e 2.....	101
4.8.7.2	Secções transversais assimétricas das Classes 1 e 2.....	101
4.8.7.3	Secções transversais da Classe 3.....	101
4.8.7.4	Secções transversais da Classe 4.....	101
4.8.8	Flexão composta desviada com esforço transverso ($M_y + M_z + N + V$).....	101
4.9	Encurvadura (varejamento).....	102
4.10	Encurvadura lateral (bambeamento).....	103
4.10.1	Cálculo do momento crítico (M_{cr}).....	104
4.11	Encurvadura por esforço transverso.....	107
4.11.1	Valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transverso.....	108
4.11.2	Contribuição da alma ($V_{bw,Rd}$).....	108
4.11.3	Contribuição dos banzos, $V_{bf,Rd}$	109
4.12	Estabilidade global.....	109

Capítulo 5 – CASO PRÁTICO DE ESTUDO E VALIDAÇÃO

5.1	Enquadramento.....	113
5.2	Apresentação do caso de estudo.....	113
5.2.1	Obra.....	113
5.2.2	Caracterização geométrica da estrutura.....	114
5.2.3	Parâmetros gerais do cálculo.....	115

5.2.4	Ações atuantes.....	115
5.2.5	Combinações de ações.....	116
5.2.6	Envolventes dos diagramas de esforços	117
5.3	Cálculo do valor do momento crítico M_{cr}	117
5.3.1	Proposta adotada para o cálculo do valor do momento crítico M_{cr}	118
5.3.2	Cálculo do valor do momento crítico M_{cr} nos programas de cálculo.....	118
5.3.3	Estratégia de modelação para que seja determinado de forma eficaz o valor do momento crítico M_{cr} nos programas de cálculo	119
5.3.3.1	Estratégia de Modelação – Exemplo prático.....	120
5.4	Verificação de segurança aos estados limite últimos (ELU).....	124
5.5	Verificação de segurança aos ELU - Pilar A (Pórtico 2)	125
5.5.1	Caracterização geométrica da secção transversal $HE\ 340\ A$	126
5.5.2	Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural.....	127
5.5.3	Classificação da secção transversal $HE\ 340\ A$	128
5.5.4	Verificação da resistência da secção $HE\ 340\ A$ aos estados limite últimos	128
5.5.5	Resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento)	129
5.5.6	Resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento)	129
5.5.7	Resistência do Pilar A à encurvadura por esforço transversal (enfundamento) ..	130
5.5.8	Verificação do Pilar A à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	131
5.5.9	Relatório final de segurança (Pilar A)	132
5.6	Verificação de segurança aos ELU – Viga B_1 (Pórtico 3)	133
5.6.1	Caracterização geométrica da secção transversal PRS	134
5.6.2	Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural.....	135
5.6.3	Classificação da secção transversal PRS	135
5.6.4	Verificação da resistência da secção PRS aos estados limite últimos.....	136
5.6.5	Resistência da Viga B_1 à encurvadura (varejamento)	136
5.6.6	Resistência da Viga B_1 à encurvadura lateral (bambeamento)	137
5.6.7	Resistência da Viga B_1 à encurvadura por esforço transversal (enfundamento) .	139
5.6.8	Verificação da Viga B_1 à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	140
5.6.9	Relatório final de segurança (Viga B_1).....	141

5.7	Verificação de segurança aos ELU – Viga B ₂ (Pórtico 4)	142
5.7.1	Caracterização geométrica da secção transversal.....	143
5.7.2	Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural.....	144
5.7.3	Classificação da secção transversal <i>IPE 330</i>	145
5.7.4	Verificação da resistência da secção <i>IPE 330</i> aos estados limite últimos.....	145
5.7.5	Resistência da Viga B ₂ à encurvadura (varejamento)	146
5.7.6	Resistência da Viga B ₂ à encurvadura lateral (bambeamento)	146
5.7.7	Resistência da Viga B ₂ à encurvadura por esforço transversal (enfundamento) .	148
5.7.8	Verificação da Viga B ₂ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	148
5.7.9	Relatório final de segurança (Viga B ₂).....	149

Capítulo 6 – CONCLUSÃO

6.1	Considerações finais	151
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	153

BIBLIOGRAFIA	155
---------------------------	-----

Anexo A – ESTRUTURA DA FERRAMENTA ACIARIUM	159
---	-----

Anexo B – PEÇAS DESENHADAS DO PROJETO DE ARQUITETURA	173
---	-----

Anexo C – COMBINAÇÕES DE AÇÕES ELU	181
---	-----

Anexo D – VERIFICAÇÃO AOS ELU DO PILAR A	185
---	-----

Anexo E – VERIFICAÇÃO AOS ELU DA VIGA B₁	213
--	-----

Anexo F – VERIFICAÇÃO AOS ELU DO DA VIGA B₂	241
---	-----

Índice de Figuras

Capítulo 2 – AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE CÁLCULO COMERCIAIS

Figura 2.1 – Diagrama de comportamento do aço à tração.....	5
Figura 2.2 – Sistema estruturais com possível análise através do <i>A3C Columns Calculator</i>	8
Figura 2.3 – Modelo de Teste 1.....	9
Figura 2.4 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 1.....	10
Figura 2.5 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 1.....	10
Figura 2.6 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 1.....	11
Figura 2.7 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 1.....	12
Figura 2.8 – Modelo de Teste 2.....	13
Figura 2.9 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 2.....	14
Figura 2.10 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 2.....	15
Figura 2.11 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 2.....	15
Figura 2.12 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 2.....	16
Figura 2.13 – Modelo de Teste 3.....	17
Figura 2.14 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 3.....	18
Figura 2.15 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 3.....	19
Figura 2.16 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 3.....	19
Figura 2.17 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 3.....	21
Figura 2.18 – Modelo de Teste 4.....	21
Figura 2.19 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 4.....	21
Figura 2.20 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 4.....	22
Figura 2.21 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 4.....	24
Figura 2.22 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 4.....	24
Figura 2.23 – Área resistente ao esforço transversal, A_v	26
Figura 2.24 – Ativação do módulo de cálculo automático de comprimentos de encurvadura.	27
Figura 2.25 – Módulo B. Definição de condições de apoio e travamento lateral para análise à resistência à encurvadura e encurvadura lateral (exemplo do Modelo de Teste 3).....	28
Figura 2.26 – <i>Robot Structural Analysis</i> . Definição do tipo de carga na janela “ <i>Load Type</i> ”.	29

Figura 2.27 - Definição de condições de apoio e travamento para verificação da resistência à encurvadura e encurvadura lateral (exemplo do tramo central do Modelo de Teste 3).....	29
Figura 2.28 – Divisão do elemento em tramos de comprimentos iguais aos comprimentos entre secções lateralmente contraventadas (exemplo do Modelo de Teste 3)	30
Figura 2.29 – Valor do comprimento de encurvadura comunicado manualmente ao programa por definição do coeficiente de encurvadura β (exemplo do Modelo de Teste 3).....	30
Figura 2.30 – Definição do modelo para verificação à encurvadura lateral – <i>Robot Structural Analysis</i>	32
Figura 2.31 – Efeito da posição da carga no fenómeno de encurvadura lateral.....	34

Capítulo 3 – FERRAMENTA DE CÁLCULO ACIARIUM

Figura 3.1 – Janela de apresentação com logótipo da ferramenta de cálculo <i>AciariUM</i>	43
Figura 3.2 – Estrutura global da ferramenta <i>AciariUM</i>	44
Figura 3.3 – Barra em rodapé para navegação através dos Interfaces da ferramenta <i>AciariUM</i>	45
Figura 3.4 – Representação esquemática da estrutura interna dos Interfaces da ferramenta <i>AciariUM</i>	45
Figura 3.5 – Interface I. Secção transversal e parâmetros gerais do cálculo.....	46
Figura 3.6 – Dimensões das secções transversais em I e H	47
Figura 3.7 – Interface I (excerto). Informação relativa ao tipo e geometria do perfil transversal	48
Figura 3.8 – Módulo comercial de definição geométrica da secção transversal	48
Figura 3.9 – Módulo manual de definição geométrica da secção.....	49
Figura 3.10 – Módulo <i>Robot Structural Analysis</i> de definição geométrica da secção	49
Figura 3.11 – Seleção do elemento destacado a vermelho no programa <i>Robot Structural Analysis</i>	50
Figura 3.12 – Ativação do “ <i>Results Connect</i> ” para recolha automática das dimensões da secção transversal de um elemento selecionado num ficheiro do <i>Robot Structural Analysis</i>	50
Figura 3.13 – Instruções para utilização do Módulo <i>Robot SA</i> no Interface I da ferramenta <i>AciariUM</i>	50
Figura 3.14 – Definição da classe de resistência do aço e correspondentes valores de f_y e f_u ..	51
Figura 3.15 – Propriedades gerais do aço constituinte do elemento estrutural	51
Figura 3.16 – Janela de reposição dos valores das propriedades do material	52

Figura 3.17 – Coeficientes parciais de segurança.....	52
Figura 3.18 – Janela de reposição dos valores dos coeficientes parciais de segurança γ_{Mi}	52
Figura 3.19 – Interface II. Condições de apoio, travamento e solicitação	53
Figura 3.20 – Interface II (excerto). Módulo Manual.....	54
Figura 3.21 – Interface II (excerto). Módulo Robot Structural Analysis.....	54
Figura 3.22 – Números dos casos de carga no <i>Robot Structural Analysis</i>	54
Figura 3.23 – Posição relativa da secção transversal a verificar no elemento selecionado	54
Figura 3.24 – Instruções para utilização do Módulo Robot SA no Interface II da ferramenta <i>AciariUM</i>	55
Figura 3.25 – Interface II (excerto). Módulo Automático de determinação das condições de apoio, travamento e solicitação	56
Figura 3.26 – Interface II (excerto). Definição das condições de apoio do sistema estrutural. Plano xz.....	57
Figura 3.27 – Interface II (excerto). Definição das condições de apoio do sistema estrutural. Plano yx	57
Figura 3.28 – Interface II (excerto). Definição das condições de travamento do elemento viga-coluna para verificação à encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento). 58	
Figura 3.29 – Interface II (excerto). Grelha de definição das condições de carregamento.....	58
Figura 3.30 – Interface II (excerto). Diagramas de esforços.....	59
Figura 3.31 – Interface II (excerto). Identificação dos setores mais comprimidos da secção a verificar	59
Figura 3.32 – Interface III (excerto). Grelha de cabeçalho e classificação da secção transversal	60
Figura 3.33 – Interface III (excerto). Cálculo relativo á classificação da secção transversal ..	61
Figura 3.34 b – Interface III. Secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2.....	62
Figura 3.35 – Interface III. Secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2	62
Figura 3.36 – Interface III. Secção transversal da Classe 3	63
Figura 3.37 b – Interface III. Secção transversal da Classe 4	64
Figura 3.38 – Interface III (excerto). Cálculo relativo á determinação das propriedades efetivas de secções da Classe 4	64
Figura 3.39 – Interface IV. Fenómenos de Encurvadura.	65
Figura 3.40 – Interface IV (excerto). Encurvadura (Varejamento). Procedimentos A e B.....	66
Figura 3.41 – Interface IV (excerto). Encurvadura Lateral (Bambeamento). Procedimento C66	
Figura 3.42 – Interface IV (excerto). Janela de definição dos Coeficientes Distribuição de Momentos.....	67

Figura 3.43 – Interface IV (excerto). Janela com instruções para definição dos valores de k_z e k_w	67
Figura 3.44 – Interface IV (excerto). Janela de determinação do parâmetro z_g	68
Figura 3.45 – Interface IV (excerto): Encurvadura por esforço transverso.....	68
Figura 3.46 – Caracterização gráfica da situação definida para o que diz respeito à existência de reforços transversais da alma	68
Figura 3.47 – Interface V (excerto). Estabilidade Global	70
Figura 3.48 – Interface V (excerto). Janelas de definição dos coeficientes de momento uniforme equivalente $C_{m_y,0}$ e $C_{m_z,0}$	70
Figura 3.49 – Interface 6 (Excerto): Cabeçalho da primeira página do relatório de segurança71	
Figura 3.50 – Relatório final exportado a partir da ferramenta <i>AciariUM</i> (Anexo A).....	71
Figura 3.51 – Menu para impressão do relatório de segurança da ferramenta <i>AciariUM</i>	72
Figura 3.52 – Menu de exportação do relatório de segurança da <i>AciariUM</i> em formato PDF 72	
Figura 3.53 – Botões que ativam procedimentos específicos posicionados ao lado direito da grelha de cabeçalho principal, fora do plano de visualização	73
Figura 3.54 – Dispositivo de Segurança.....	74
Figura 3.55 – Erro relacionado com o algoritmo em Visual Basic.....	74

Capítulo 4 – MÉTODOLOGIA E EXPRESSÕES DE CÁLCULO

Figura 4.1 – Dimensões principais da secção transversal.	78
Figura 4.2 – Área resistente ao esforço transverso, A_{vz}	80
Figura 4.3 – Área resistente ao esforço transverso, A_{vy}	80
Figura 4.4 – Determinação do valor do comprimento de encurvadura em torno do eixo y	83
Figura 4.5 – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos internos (alma)	84
Figura 4.6 – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos em consola (banzos).....	84
Figura 4.7 – Determinação da secção transversal efetiva: elementos comprimidos interiores (alma).	87
Figura 4.8 – Determinação da secção transversal efetiva: elementos comprimidos em consola (banzos)	88
Figura 4.9 – Largura c correspondente às partes em consola do banzo	88
Figura 4.10 – Secção efetiva determinada supondo compressão pura: cálculo de A_{eff} e e_N	89

Figura 4.11 – Secção efetiva determinada supondo a secção bruta sujeita apenas a um momento fletor em relação ao eixo y : cálculo de $W_{eff,y}$	90
Figura 4.12 – Secção efetiva determinada supondo a secção bruta sujeita apenas a um momento fletor em relação ao eixo z : cálculo de $W_{eff,z}$	91
Figura 4.13 – Parâmetros a considerar para determinação do esforço transversal elástico resistente em função da direção considerada.....	93
Figura 4.14 – Área resistente ao esforço transversal, A_{vz} , e área restante, A_{rz}	94
Figura 4.15 – Área resistente ao esforço transversal, A_{vz} , e área restante, A_{rz}	95
Figura 4.16 – Diagrama plástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz} . Flexão em torno do eixo y	96
Figura 4.17 – Diagrama plástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy} . Flexão em torno do eixo z	97
Figura 4.18 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz} . Flexão em torno do eixo y	97
Figura 4.19 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy} . Flexão em torno do eixo z	98
Figura 4.20 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal efetiva considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz}^{EFF} . Flexão em torno do eixo y	99
Figura 4.21 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal efetiva considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy}^{EFF} . Flexão em torno do eixo z	99
Figura 4.22 – Escolha do valor do fator de imperfeição, α , em função da curva de encurvadura	103
Figura 4.23 – Escolha do valor do fator de imperfeição, α_{LT} , em função da curva de encurvadura.	104
Figura 4.24 – Posição de aplicação da carga ao nível da secção transversal (z_g).....	106
Figura 4.25 – Contribuição da alma χ_w para a resistência à encurvadura por esforço transversal	108
Figura 4.26 – Determinação dos coeficientes de momento uniforme $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$	111

Capítulo 5 – CASO PRÁTICO DE ESTUDO E VALIDAÇÃO

Figura 5.1 – Caso de estudo: representação da estrutura do edifício (vista <i>Robot Structural Analysis</i>).....	114
Figura 5.2 – Definição geométrica do “Pórtico-Tipo”	114

Figura 5.3 – Interface I (excerto): parâmetros gerais do cálculo	115
Figura 5.4 – Definição de $L_{cr,z}^{banzo}$ pelos programas de cálculo estrutural.....	119
Figura 5.5 – Exemplo prático para definição de estratégia de modelação.....	121
Figura 5.6 – Divisão da viga em segmentos para modelação nos programas de cálculo estrutural	123
Figura 5.7 – Caracterização geométrica do Pilar A	126
Figura 5.8 – Interface I (excerto): geometria da secção transversal <i>HE 340 A</i>	126
Figura 5.9 – Diagramas de esforços no Pilar A (Pórtico 2) para a combinação ELU condicionante.....	127
Figura 5.10 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação do Pilar A	127
Figura 5.11 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal <i>HE 340 A</i>	128
Figura 5.12 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal <i>HE 340 A</i> aos ELU .	128
Figura 5.13 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento)...	129
Figura 5.14 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento)	129
Figura 5.15 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Pilar A).....	130
Figura 5.16 – Janela de definição do parâmetro z_g (Pilar A).....	130
Figura 5.17 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura por esforço transverso	130
Figura 5.18 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global do Pilar A sujeito a flexão composta com compressão	131
Figura 5.19 – Janelas de definição dos coeficientes de momento uniforme (Pilar A).....	131
Figura 5.20 – Caracterização geométrica da Viga B_1	133
Figura 5.21 – Contraventamento lateral do banzo superior da Viga B.....	133
Figura 5.22 – Contraventamento lateral do banzo inferior da Viga B.....	133
Figura 5.23 – Estratégia de modelação da Viga B_1 no <i>CYPE 3D</i>	134
Figura 5.24 – Interface I (excerto): definição das dimensões do perfil <i>PRS (S4)</i>	134
Figura 5.25 – Diagramas de esforços na Viga B_1 (Pórtico 3) para a combinação ELU condicionante.....	135
Figura 5.26 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação da Viga B_1	135
Figura 5.27 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal <i>PRS</i>	135
Figura 5.28 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal <i>PRS</i> aos ELU.....	136
Figura 5.29 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B_1 à encurvadura (varejamento) .	136

Figura 5.30 – Interface I (Excerto): propriedades mecânicas da secção transversal intermédia do tramo EL3 da Viga B ₁	137
Figura 5.31 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Viga B ₁)	138
Figura 5.32 – Janela de definição do parâmetro z_g (Viga B ₁)	138
Figura 5.33 – Interface IV (Excerto): determinação do valor do momento crítico M_{cr} da Viga B ₁	138
Figura 5.34 – Interface I (Excerto): propriedades mecânicas da secção transversal PRS (S4)	138
Figura 5.35 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B ₁ à encurvadura lateral (bambeamento)	139
Figura 5.36 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B ₁ à encurvadura por esforço transversal	139
Figura 5.37 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global da Viga B ₁ sujeita a flexão composta com compressão	140
Figura 5.38 – Caracterização geométrica da Viga B ₂	142
Figura 5.39 – Estratégia de modelação da Viga B ₂ no <i>CYPE 3D</i>	143
Figura 5.40 – Interface I (excerto): definição das dimensões do Perfil <i>IPE 330</i>	143
Figura 5.41 – Diagramas de esforços na Viga B ₂ (Pórtico 4) para a combinação ELU condicionante	144
Figura 5.42 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação da Viga B ₂	144
Figura 5.43 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal <i>IPE 330</i>	145
Figura 5.44 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal <i>IPE 330</i> aos ELU	145
Figura 5.45 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B ₂ à encurvadura (varejamento)	146
Figura 5.46 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B ₂ à encurvadura lateral (bambeamento)	147
Figura 5.47 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Viga B ₂)	147
Figura 5.48 – Janela de definição do parâmetro z_g (Viga B ₂)	147
Figura 5.49 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B ₂ à encurvadura por esforço transversal	148
Figura 5.50 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global da Viga B ₂ sujeita a flexão composta com compressão	148

Índice de Quadros

Capítulo 2 – AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE CÁLCULO COMERCIAIS

Quadro 2.1 – Resultados Modelo de Teste 1: resistência da secção transversal e encurvadura	10
Quadro 2.2 – Resultados Modelo de Teste 1: resistência à encurvadura lateral	11
Quadro 2.3 - Resultados Modelo de Teste 1: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.....	12
Quadro 2.4 - Resultados Modelo de Teste 1: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.....	13
Quadro 2.5 – Resultados Modelo de Teste 2: resistência da secção transversal e encurvadura	14
Quadro 2.6 – Resultados Modelo de Teste 2: resistência à encurvadura lateral.	15
Quadro 2.7 - Resultados Modelo de Teste 2: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.....	16
Quadro 2.8 - Resultados Modelo de Teste 2: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.....	17
Quadro 2.9 – Resultados Modelo de Teste 3: resistência da secção transversal e encurvadura	18
Quadro 2.10 – Resultados Modelo de Teste 3: resistência à encurvadura lateral	19
Quadro 2.11 - Resultados Modelo de Teste 3: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.....	20
Quadro 2.12 - Resultados Modelo de Teste 3: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.....	20
Quadro 2.13 – Resultados Modelo de Teste 4: resistência da secção transversal e encurvadura	22
Quadro 2.14 – Resultados Modelo de Teste 4: resistência à encurvadura lateral	23
Quadro 2.15 - Resultados Modelo de Teste 4: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.....	23
Quadro 2.16 - Resultados Modelo de Teste 4: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.....	24

Quadro 2.17 – Identificação da forma (módulo) utilizada em cada programa para análise aos fenómenos de encurvadura (B) e encurvadura lateral (LTB) em cada Modelo de Teste	27
Quadro 2.18 – Quantificação por parte do <i>CYPE 3D</i> dos parâmetros envolvidos no cálculo de M_{cr}	31
Quadro 2.19 – Avaliação da capacidade de consideração do parâmetro z_g pelo <i>software</i>	34
Quadro 2.20 – Comparativo de soluções ótimas de dimensionamento das secções transversais	37
Quadro 2.21 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do <i>Robot Structural Analysis</i>	38
Quadro 2.22 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do <i>CYPE 3D</i>	38
Quadro 2.23 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do <i>A3C Columns Calculator</i>	39
Quadro 2.24 – Quadro de avaliação da performance do <i>software</i>	40

Capítulo 3 – FERRAMENTA DE CÁLCULO *ACIARIUM*

Quadro 3.1 – Dimensões principais da secção transversal definidas pelo utilizador na <i>AciariUM</i>	47
Quadro 3.2 – Dimensões complementares e propriedades mecânicas da secção transversal calculadas automaticamente pela ferramenta <i>AciariUM</i>	47
Quadro 3.3 – Gestão automática da informação relativa ao tipo de perfil, aos raios de concordância r e aos cordões de soldadura cs pela ferramenta <i>AciariUM</i>	49
Quadro 3.4 – Classes de resistência do aço na base de dados da ferramenta <i>AciariUM</i>	51
Quadro 3.5 – Parâmetros definidos no Interface II. Esforços atuantes e parâmetros que caracterizam a geometria do sistema estrutural	53
Quadro 3.6 – Conjuntos de conteúdos/procedimentos no Interface III	60
Quadro 3.7 – Gestão dos conteúdos/procedimentos do Interface III em função da Classe da secção	61
Quadro 3.8 – Conjuntos de conteúdos/procedimentos no Interface IV	65

Capítulo 4 – MÉTODOLOGIA E EXPRESSÕES DE CÁLCULO

Quadro 4.1 – Dimensões principais da secção transversal	78
---	----

Quadro 4.2 – Atribuição de valores aos coeficientes C_1 , C_2 e C_3	105
Quadro 4.3 – Valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$	110

Capítulo 5 – CASO PRÁTICO DE ESTUDO E VALIDAÇÃO

Quadro 5.1 – Mapa e definição geométrica das secções transversais dos elementos do “pórtico-tipo”.....	115
Quadro 5.2 – Restantes cargas permanentes (cobertura, revestimentos e pavimento).....	115
Quadro 5.3 – Ação do vento no edifício em kN/m^2 - situações	116
Quadro 5.4 – Valores recomendados para os coeficientes ψ_0 para edifícios	117
Quadro 5.5 – Resumo e comparação entre as abordagens em 5.3.1 e 5.3.2	120
Quadro 5.6 – Momento crítico calculado de acordo com 5.3.1	122
Quadro 5.7 – Momento crítico M_{cr} calculado pelos programas de cálculo de acordo com 5.3.2 sem que seja respeitada uma estratégia de modelação.....	122
Quadro 5.8 – Momento crítico M_{cr} calculado pelos programas de cálculo de acordo com 5.3.2 respeitando a estratégia de modelação definida	124
Quadro 5.9 – Identificação dos grupos de elementos e do caso mais condicionante de cada um	125
Quadro 5.10 – Propriedades mecânicas da secção transversal <i>HE 340 A</i>	126
Quadro 5.11 – Verificação da resistência da secção transversal <i>HE 340 A</i> aos ELU	129
Quadro 5.12 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento).....	129
Quadro 5.13 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento) 130	
Quadro 5.14 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	132
Quadro 5.15 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação do Pilar A	132
Quadro 5.16 – Propriedades mecânicas da secção transversal <i>PRS</i>	134
Quadro 5.17 – Verificação da resistência da secção transversal <i>PRS</i> aos ELU	136
Quadro 5.18 – Verificação da resistência da Viga B_1 à encurvadura (varejamento).....	137
Quadro 5.19 – Verificação da resistência da Viga B_1 à encurvadura lateral (bambeamento)139	
Quadro 5.20 – Verificação da resistência da Viga B_1 à encurvadura por esforço transversal 140	
Quadro 5.21 – Verificação da resistência da Viga B_1 à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	141
Quadro 5.22 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação da Viga B_1	141

Quadro 5.23 – Propriedades mecânicas da secção transversal <i>IPE 330</i>	143
Quadro 5.24 – Verificação da resistência da secção transversal <i>IPE 330</i> aos ELU.....	146
Quadro 5.25 – Verificação da resistência da Viga B_2 à encurvadura (varejamento).....	146
Quadro 5.26 – Verificação da resistência da Viga B_2 à encurvadura lateral (bambeamento)	147
Quadro 5.27 – Verificação da resistência da Viga B_2 à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)	149
Quadro 5.28 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação da Viga B_2	149

Simbolos e nomenclatura

Para os fins do presente documento utilizam-se o símbolos listados seguidamente. São ainda utilizados outros símbolos que se definem quando são referidos pela primeira vez.

x	eixo longitudinal de um elemento
y	eixo de uma secção transversal
z	eixo de uma secção transversal
b	largura de uma secção transversal
b_s	largura do banzo superior de uma secção transversal
b_i	largura do banzo inferior de uma secção transversal
h	altura de uma secção transversal
h_i	altura de uma alma.
d	altura da parte reta de uma alma
t_w	espessura da alma
t_f	espessura do banzo
t_s	espessura do banzo superior de uma secção transversal
t_i	espessura do banzo inferior de uma secção transversal
r_s	raio de concordância entre a alma e o banzo superior de uma secção transversal
r_i	raio de concordância entre a alma e o banzo inferior de uma secção transversal
cs_s	espessura do cordão de soldadura de ligação entre a alma e o banzo superior
cs_i	espessura do cordão de soldadura de ligação entre a alma e o banzo inferior
f_y	tensão de cedência
f_u	tensão última
E	módulo de elasticidade
G	módulo de distorção
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico
α (4.2)	coeficiente de dilatação térmica linear
γ_{M0}	coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
γ_{M1}	coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
γ_{M2}	coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação
A	área bruta de uma secção transversal
A_{eff}	área efetiva de uma secção transversal

$e_{N,y}$	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta, segundo o eixo y
$\Delta M_{z,Ed}$	Momento devido ao afastamento $e_{N,y}$
$e_{N,z}$	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta, segundo o eixo z
$\Delta M_{y,Ed}$	Momento devido ao afastamento $e_{N,z}$
A_w	área de uma alma
A_f	área de um banzo
η	coeficiente para calcular a área de corte
A_{vz}	área resistente ao esforço transversal V_z
A_{vy}	área resistente ao esforço transversal V_y
I	momento de inércia da secção em relação ao eixo considerado
S	momento estático de uma área relativamente a um eixo considerado
W_{pl}	módulo de flexão plástico de uma secção transversal, em relação ao eixo considerado
W_{el}	módulo de flexão elástico de uma secção transversal, em relação ao eixo considerado
W_{eff}	módulo de flexão efetivo de uma secção transversal, em relação ao eixo considerado
i	raio de giração relativamente ao eixo considerado
I_T	constante de torção de St. Venant
I_w	constante de empenamento
L	comprimento total de um elemento viga-coluna
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço axial atuante
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal atuante, na direção considerada
M_{Ed}	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo considerado
N_{Rd}	valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão de uma secção transversal
V_{Rd}	valor de cálculo do esforço transversal resistente, na direção considerada
M_{Rd}	valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo considerado
n	relação entre os valores de cálculo dos esforços normais atuante e resistente plástico de uma secção transversal bruta
a	relação entre a área da alma e a área bruta de uma secção transversal
$M_{N,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo considerado, reduzido pela interação com o esforço axial
α (4.8.7)	parâmetro para tomar em consideração o efeito de flexão desviada
β	parâmetro para tomar em consideração o efeito de flexão desviada
ρ	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos fletores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos
$M_{V,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo considerado, reduzido pela interação com o esforço transversal correspondente, isto é, $M_y + V_z$ ou $M_z + V_y$
$f_y(A_{vz})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vz} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_z no cálculo momento fletor resistente $M_{V,y,Rd}$ - Abrevia-se em $f'_{y,z}$

$f'_y (A_{vy})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vy} , para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_y no cálculo momento fletor resistente $M_{V_z,Rd}$ - Abrevia-se em $f'_{y,y}$
$M_{NV,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente, em relação ao eixo considerado, reduzido pela interação com os esforços axial e transversal correspondente, isto é, $M_y + N + V_z$ ou $M_z + N + V_y$
L_{cr}	comprimento de encurvadura em torno do eixo considerado
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido em relação ao eixo considerado
χ	coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo considerado
ϕ	valor para determinar o coeficiente de redução χ
α (4.9)	fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos
λ_I	valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada associada à encurvadura de colunas por flexão
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
ϕ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ
α_{LT}	fator de imperfeição para a encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
M_{cr}	momento crítico de encurvadura lateral
$M_{cr,E}$	momento crítico elástico de encurvadura lateral
l	comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo considerado
C_1	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos
C_2	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos
C_3	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos
k_z	fator de comprimento efetivo relativo às condições de extremidade
k_w	fator de comprimento efetivo relativo às condições de extremidade
z_g	distância em z entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte da secção transversal
z_j	parâmetro que reflete o grau de assimetria da secção transversal
$V_{b,Rd}$	valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal
$V_{b,w,Rd}$	valor de cálculo da contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal
$V_{b,f,Rd}$	valor de cálculo da contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal
a_w	distância entre reforços transversais da alma
f_{yw}	tensão de cedência da alma
f_{yf}	tensão de cedência dos banzos
χ_w	coeficiente de redução relativo à contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal
k_τ	valor mínimo do coeficiente de encurvadura por esforço transversal do painel de alma

$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos
$M_{N,f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, reduzido pela presença de um esforço normal N_{Ed}
N_{cr}	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo considerado
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por torção
$C_{my,0}$	coeficiente
$C_{mz,0}$	coeficiente
C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
k_{yy}	fator de interação
k_{yz}	fator de interação
k_{zy}	fator de interação
k_{zz}	fator de interação
u_y	fator
u_z	fator
C_{yy}	fator
C_{yz}	fator
C_{zy}	fator
C_{zz}	fator
$\bar{\lambda}_{max}$	maior dos valores de $\bar{\lambda}_y$ e $\bar{\lambda}_z$
b_{LT}	fator
c_{LT}	fator
d_{LT}	fator
e_{LT}	fator

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O projeto de estruturas de aço encontra-se regulamentado pelo conjunto de normas NP EN 1993 (Eurocódigo 3). O trabalho a ser desenvolvido tem como base a referida regulamentação e culmina numa ferramenta informática prática e intuitiva, capaz de apoiar o dimensionamento de vigas-coluna metálicas sujeitas a flexão composta desviada.

À ferramenta de cálculo desenvolvida foi atribuído o nome “*AciariUM*”, palavra latina que significa “aço”. As letras maiúsculas “UM” são uma referência à Universidade do Minho.

A eficiência dos modelos de cálculo automático existentes, com capacidade para analisar e projetar soluções adequadas do ponto de vista estrutural, é reconhecida. O uso de modelos 3D permite uma simulação precisa dos sistemas estruturais e a abrangência da totalidade do processo de dimensionamento: modelação da estrutura, cálculo de esforços, verificações de segurança e/ou dimensionamento e otimização automática. O *Robot Structural Analysis* (Autodesk) e o *CYPE 3D* (Cype) são exemplos conceituados deste tipo de *software*.

Algumas das ferramentas que estão comercialmente disponíveis não permitem, no entanto, que o utilizador controle totalmente os procedimentos que dão origem aos resultados que lhe são apresentados. Justifica-se, portanto, a importância de dispor de ferramentas que, contrariando esta tendência, permitam validar os resultados devolvidos por programas comerciais de análise estrutural. A ferramenta desenvolvida foi concebida com o objetivo de permitir ao profissional que a opera um controlo total sobre todos os procedimentos, próximo àquele que obteria se efetuasse um cálculo manual. Todo o algoritmo e procedimento de cálculo relativo a cada parâmetro está constantemente disponível para consulta e edição. Não se ambiciona, portanto, substituir os programas de cálculo existentes, na medida em que a ferramenta não foi exatamente concebida para os mesmos fins, mas sim complementá-los.

O presente trabalho é direcionado para a análise de vigas-coluna em aço constituídas por perfis transversais em I ou H dos tipos laminado a quente ou reconstituído soldado.

As regras estabelecidas pela NP EN 1993-1-1 [1] estabelecem o processo de dimensionamento desde a fase de quantificação de esforços até à fase de verificação de segurança e disposições construtivas.

O dimensionamento de elementos em aço de acordo com a EN NP 1993-1-1 [1] tem por base a definição de quatro classes de secções transversais, definidas de acordo com a secção 5.5.2 do mesmo regulamento. Esta classificação é função da relação entre a largura e a espessura dos componentes comprimidos da secção transversal e tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de instabilidade local.

Os valores de cálculo da resistência de uma secção transversal, calculados de acordo com 6.2 da NP EN 1993-1-1 [1], dependem da classificação dessa secção. O efeito combinado das ações que nela atuam não deve exceder a resistência correspondente a essa combinação [1].

É também particularmente importante o estudo dos fenómenos de instabilidade (encurvadura, encurvadura lateral e encurvadura por esforço transversal) já que com muita frequência são utilizadas peças de reduzida espessura e grande esbelteza. O fenómeno de encurvadura (ou varejamento) afeta elementos esbeltos comprimidos axialmente e é verificado de acordo com 6.3.1 da NP EN 1993-1-1 [1]). O fenómeno de encurvadura lateral (ou bambeamento) afeta os banzos comprimidos de elementos sujeitos a esforços de flexão e é verificado de acordo com 6.3.2 da mesma norma. O fenómeno de encurvadura por esforço transversal (ou enfunamento) afeta principalmente almas delgadas e é verificado de acordo com a secção 5 da NP EN 1993-1-5 [3]). Para ter em conta estes efeitos são usados coeficientes de redução da capacidade resistente das secções.

O contributo da empresa CASAIS – Engenharia e construção, S.A. permitiu aplicar a ferramenta desenvolvida a casos práticos e adotar uma metodologia de constante otimização da ferramenta por forma a adequá-la aos objetivos deste trabalho e das partes envolvidas.

1.2 Objetivos

Com a realização deste trabalho pretende-se alcançar os seguintes objetivos gerais:

- Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo vocacionada para o dimensionamento à flexão composta desviada de vigas-coluna metálicas constituídas por secções transversais em I ou H dos tipos laminado a quente ou reconstituído soldado;
- Criação de um suporte bibliográfico completo que oriente a utilização da ferramenta de cálculo desenvolvida e que seja capaz de esclarecer a metodologia adotada em cada procedimento;
- Aplicação da ferramenta desenvolvida a casos práticos identificados no âmbito da atividade desenvolvida pela empresa CASAIS – Engenharia e Construção S.A.;

- Desenvolvimento de estratégias de análise estrutural e definição de procedimentos de análise e otimização estrutural adequados aos casos estudados.

1.3 Organização do trabalho

Numa primeira fase do trabalho, documentada no Capítulo 2 deste documento, foi realizado um estudo comparativo focado na avaliação da eficácia e versatilidade de *software* comercial de análise estrutural (analisando de forma geral o seu funcionamento e os principais resultados devolvidos) com vista a tirar conclusões objetivas relativamente às suas performances e colecionar bagagem que pudesse orientar a construção da ferramenta de cálculo. Foram utilizados os programas *Robot Structural Analysis (Autodesk)*, o *CYPE 3D (Cype)* e o *A3C Columns Calculator (Arcelor Mittal)*. Verificou-se que, em muitos casos, os resultados fogem ao controlo do utilizador, na medida em que lhes são apresentados sem que este possa ter acesso ao procedimento que lhes deu origem. Esta constatação reforçou a importância de dispor de ferramentas de utilização simples que permitam validar de forma sistemática os principais parâmetros devolvidos pelos programas comerciais de análise e dimensionamento estrutural.

A construção da ferramenta de cálculo serviu-se das conclusões recolhidas na primeira fase, apoiou-se na bibliografia disponível, e beneficiou da colaboração dos parceiros envolvidos. O Capítulo 3 deste documento assemelha-se a um manual de utilização. Documentam-se em detalhe a estrutura global da ferramenta de cálculo, a estrutura interna de cada interface e orientações para a sua utilização.

O Capítulo 4 deste documento é uma memória descritiva e justificativa da metodologia e expressões utilizadas pela ferramenta de cálculo. A metodologia de cálculo adotada respeita a bibliografia consultada. Tem por base o conjunto de normas NP EN 1993 (Eurocódigo 3), mais especificamente as partes 1 e 5.

Em cooperação com a empresa CASAIS – Engenharia e construção, S.A. a ferramenta desenvolvida no contexto deste projeto foi aplicada a casos práticos identificados no âmbito da atividade desenvolvida por esta entidade. Este trabalho é documentado no Capítulo 5 deste documento. Os resultados obtidos são validados por comparação com os devolvidos pelos programas comerciais de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*. São apresentadas estratégias e definidos procedimentos de análise estrutural adequados aos casos estudados.

No Capítulo 7 são apresentadas algumas considerações finais relativamente ao trabalho desenvolvido. A ferramenta criada é editável com o objetivo de motivar desenvolvimentos futuros. Nesse sentido, algumas propostas são apresentadas neste último capítulo.

1.4 Metodologia do trabalho desenvolvido

O trabalho desenvolvido apoiou-se fortemente na bibliografia referida e no contributo que deram ambas as partes envolvidas nesta parceria entre a Universidade do Minho e a CASAIS - Engenharia e Construção S.A.

Na realização deste projeto foi indispensável concentrar esforços para o desenvolvimento de competências na utilização de programas como o Microsoft Excel e o Visual Basic que servem como suporte à ferramenta de cálculo desenvolvida.

O contacto entre os autores deste projeto e os suportes de programas comerciais de análise estrutural permitiu um benefício mútuo. O suporte do programa *A3C Columns Calculator* (Arcelor Mittal) foi contactado para reportar um problema com a impossibilidade de o *software* considerar a posição de aplicação do carregamento ao nível da secção transversal do elemento a ser verificado. Em resposta o problema foi prontamente corrigido. A Top Informática foi contactada com algumas questões e sugestões relativamente ao programa *CYPE 3D* que culminaram numa reunião presencial na sua sede com vista a discutir os referidos assuntos. Também o suporte do *Robot Structural Analysis* foi contactado por correio eletrónico.

A escolha das metodologias de cálculo adotadas teve por base a realização de estudos e investigação com vista á procura da solução mais equilibrada: para cada problema a solução implementada deve ser eficiente, ter larga aceitação por parte da bibliografia consultada, e ser geral na medida em que é válida para o maior número de casos.

Avaliação de programas de cálculo comerciais

2.1 Introdução e Enquadramento

No contexto deste trabalho entende-se pertinente referir os aspectos que estão na base do cálculo de estruturas em aço de acordo com o regulamento NP EN 1993-1-1 [1], que são resumidamente documentados neste capítulo.

De seguida, o capítulo centra-se num estudo comparativo de programas de cálculo disponíveis comercialmente, com o objetivo de comparar as suas performances e testar as suas limitações.

Pretende-se que esta análise sirva de ponto de partida para a construção da ferramenta que esta dissertação se propõe, ao evidenciar e comparar as várias abordagens escolhidas por outros autores.

2.2 Valores de cálculo das propriedades do aço estrutural

O diagrama tensão-extensão (Figura 2.1), obtido por caracterização do comportamento até à rotura de um provete submetido a um esforço normal de tração, fornece dados importantes para determinação de determinadas propriedades: Módulo de Elasticidade (E); Valor Nominal da Tensão de Cedência (f_y); Valor Nominal da Tensão Última à Tração (f_u).

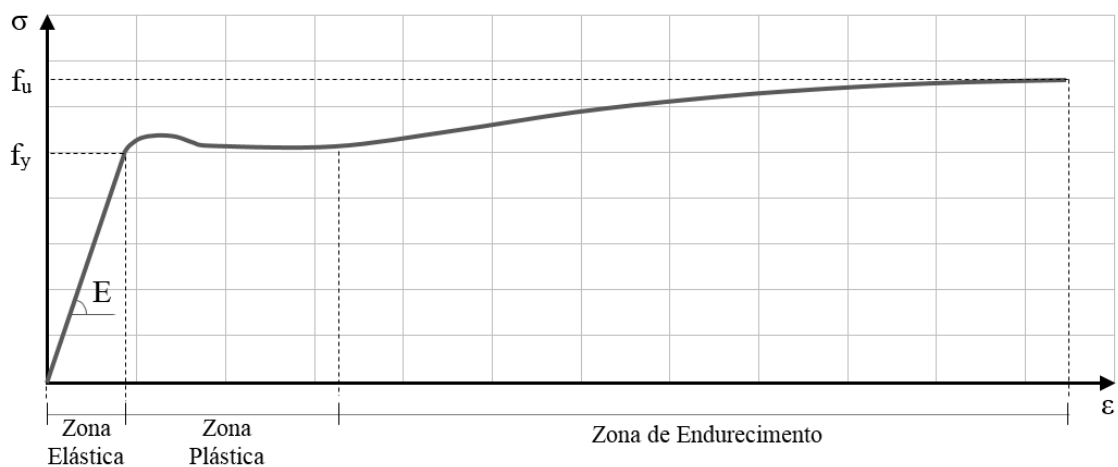


Figura 2.1 – Diagrama de comportamento do aço à tração [8].

Os valores de f_y e f_u dependem do tipo de aço e deverão ser recolhidos diretamente da norma do produto ou do Quadro 3.1 do regulamento NP EN 1993-1-1 [1].

No mesmo regulamento, secção 3.2.6, são definidas também as propriedades dos materiais a adotar no dimensionamento para o caso de aços estruturais por ele abrangidos [1].

2.3 Tipos de perfis metálicos

Distinguem-se vários tipos de perfis estruturais metálicos: perfis laminados, perfis soldados, perfis formados a frio, perfis tubulares.

O presente trabalho é direcionado para a verificação de elementos em aço constituídos por perfis transversais em I e H dos tipos laminado a quente e reconstituído soldado. Este capítulo restringe o estudo a perfis laminados comerciais, cujas propriedades geométricas se encontram devidamente definidas em tabelas destinadas ao efeito fornecidas pelos fabricantes.

2.4 Dimensionamento de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1]

A parte 1 do Eurocódigo 3 (NP EN 1993-1-1 [1]) estabelece os princípios de base para o projeto de estruturas de aço [1]. Os capítulos 6 e 7 do referido documento definem o procedimento de cálculo para verificação aos estados limite últimos e de utilização, respetivamente.

Entende-se também pertinente, para o contexto do trabalho desenvolvido neste capítulo, detalhar os princípios adotados para quantificação do valor do momento crítico para a encurvadura lateral (M_{cr}), uma vez que se considera este em particular um aspecto suscetível de gerar dúvidas e/ou dificuldades (consultar 2.4.1).

2.4.1 Momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr})

Existe um número considerável de propostas de cálculo para o momento crítico de encurvadura lateral M_{cr} . Por coerência com o *software* de cálculo analisado na secção 2.5 deste capítulo, adota-se como válida para qualquer sistema estrutural a expressão (2.1) proposta por Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6], de acordo com o Anexo F da ENV 1993-1-1 [2],

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z l)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} \quad (2.1)$$

em que E é o módulo de elasticidade do material (210GPa); l é o comprimento do tramo entre secções lateralmente contraventadas (m); I_z é o momento de inércia em relação ao eixo z (m⁴);

I_w é a constante de empenamento da secção transversal (m^6); I_T é a constante de torção de St. Venant (m^4) e G é o módulo de distorção (80,77GPa).

Os fatores de comprimento efetivo k_z e k_w dependem das condições de suporte nas secções de extremidade do segmento de barra correspondente ao comprimento l : o fator k_z refere-se a rotações das secções extremas em torno do eixo de menor inércia z ; o fator k_w refere-se à restrição ao empenamento nas mesmas secções. Os fatores k_z e k_w variam entre 0,5 (deformações impedidas) e 1,0 (deformações livres), sendo iguais a 0,7 no caso de deformações livres numa extremidade e impedidas na outra. Na maior parte as situações práticas estas restrições são apenas parciais, razão pela qual se recomenda conservativamente $k_z = k_w = 1,0$ [6].

O parâmetro z_g é a coordenada em z do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal.

O parâmetro z_j reflete o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y [6], e toma o valor zero para secções duplamente simétricas.

Os parâmetros C_1 , C_2 e C_3 , são coeficientes que têm em conta a distribuição de momentos e são selecionados a partir do Quadro F.1.2 do Anexo F da ENV 1993-1-1 [2].

2.5 Softwares de cálculo de Estruturas Metálicas

Existem no mercado ferramentas e programas de cálculo capazes de auxiliar o dimensionamento de estruturas em aço. A análise a ser levada a cabo neste capítulo centra-se num número limitado desses programas, sendo considerados os de maior prestígio.

Os programas e ferramentas em análise têm em comum a adoção das regras e procedimentos de cálculo preconizados pelo Eurocódigo 3. É no entanto de esperar diferentes abordagens e diferentes limitações nos exemplos considerados.

2.5.1 A3C Columns Calculator (ArcelorMittal)

Alguns fabricantes de perfis metálicos disponibilizam gratuitamente ferramentas de cálculo simples para auxiliar o dimensionamento dos elementos que comercializam. São normalmente ferramentas muito acessíveis mas pouco versáteis e com algumas limitações.

A *ArcelorMittal*, uma empresa metalúrgica líder a nível mundial, disponibiliza gratuitamente um conjunto de ferramentas de cálculo de elementos metálicos, das quais se destaca para o contexto do presente projeto a *A3C Columns Calculator*.

A ferramenta realiza verificações de segurança em estado limite último e em estado limite de serviço e permite a consideração de várias combinações de ações em simultâneo. Depois de

definidas condições de apoio e travamentos laterais, materiais e cargas aplicadas, é capaz de determinar autonomamente todos os parâmetros de cálculo, incluindo os envolvidos nas verificações à encurvadura e encurvadura lateral.

Como maior limitação está o facto de permitir apenas verificações em elementos (vigas-coluna), simplesmente apoiados ou em consola. As condições de apoio do elemento em aço são o ponto de partida da ferramenta para a determinação dos esforços instalados, pelo que não é possível contornar esta limitação.

No plano zx (planta) o elemento é simplesmente apoiado, sendo os fenómenos de encurvadura e encurvadura lateral analisados de forma coerente com esse pressuposto.

Cada travamento lateral restringe completamente (banzos superior e inferior) a translação em y da secção a que diz respeito, não sendo possível restringir apenas um dos banzos. Estes travamentos não criam qualquer impedimento á rotação dessas secções. Travamentos intermédios podem ser acrescentados e posicionados livremente.

A Figura 2.2 ilustra os dois sistemas estruturais cuja análise sob vários esquemas de carregamento é possível recorrendo ao *A3C Columns Calculator*.

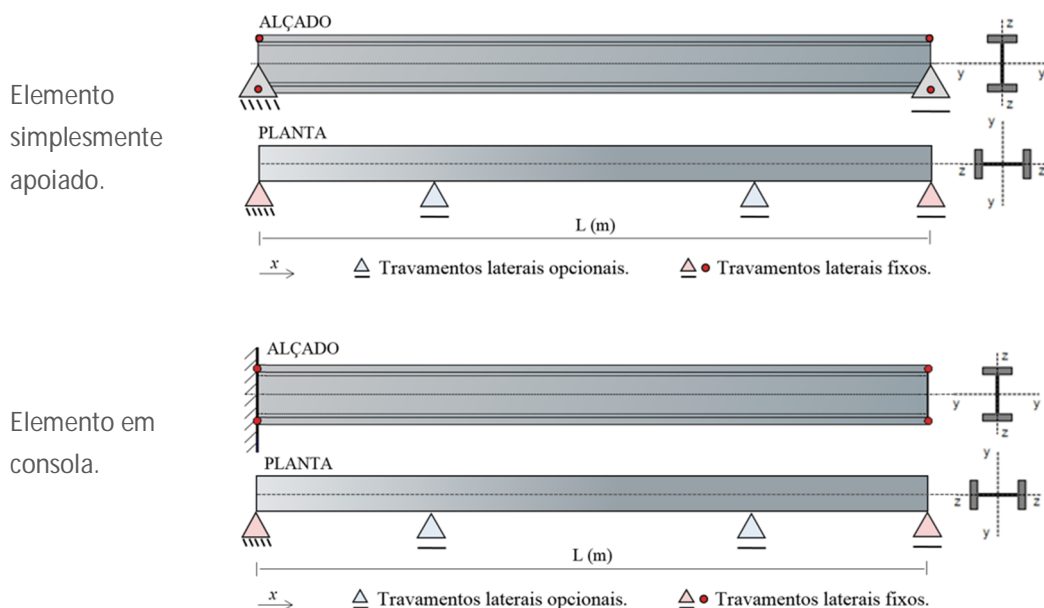


Figura 2.2 – Sistema estruturais com possível análise através do *A3C Columns Calculator*.

2.5.2 Softwares de análise avançada de estruturas

No cenário atual maior destaque é normalmente atribuído aos programas de análise avançada de estruturas *Robot Structural Analysis (Autodesk)* e *CYPE 3D (Cype)*.

Este tipo de programas permite a modelação, quantificação de esforços, verificação e otimização de estruturas com geometrias muito variadas.

2.6 Estudo comparativo de *softwares* de cálculo de Estruturas Metálicas

Por forma a comparar o desempenho dos *softwares* referidos em 2.5, são criados modelos simples para teste. As variantes são escolhidas por forma a testar aspetos específicos. Entende-se que importantes disparidades poderão vir relacionadas com a atribuição de valores aos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , na quantificação do momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr}) - Anexo F da ENV 1993-1-1 [2], e aos coeficientes de momento uniforme equivalente C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} , na quantificação dos fatores de interação para verificação à flexão composta com compressão - Anexos A e B da NP EN 1993-1-1 [1], pelo que são seleccionados casos notáveis simples que não suscitam dúvidas em relação à quantificação destes parâmetros.

Quatro abordagens distintas são consideradas para o teste dos mesmos modelos: solução analítica resolvida de forma manual, soluções fornecidas pelo *Robot Structural Analysis*, pelo *CYPE 3D* e pelo *A3C Columns Calculator*.

2.6.1 Modelo de Teste 1

O primeiro Modelo de Teste tem como objetivo estudar um dos esquemas estruturais e de carregamento mais básico e simples.

A análise é centrada na secção de meio vão de uma viga realizada com o perfil *IPE 500*, simplesmente apoiada, sem travamentos laterais intermédios e na qual atua o esquema de cargas representado na Figura 2.3.

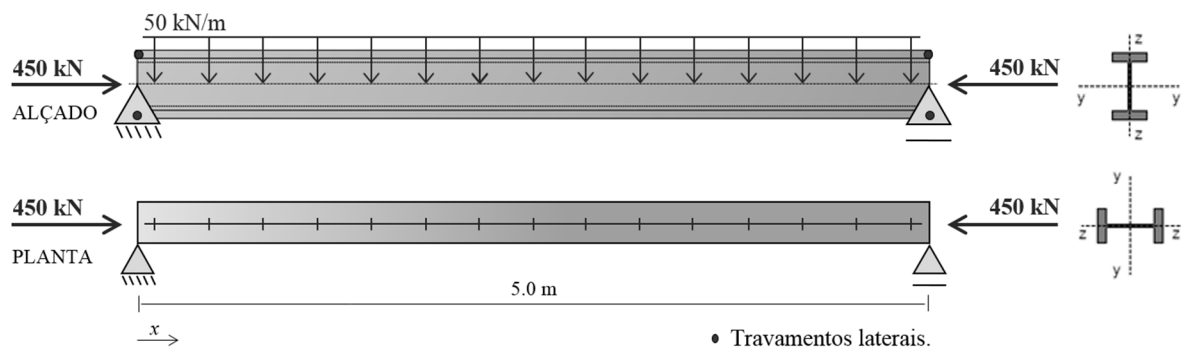


Figura 2.3 – Modelo de Teste 1.

Na secção em análise atua um esforço axial de 450kN e esforço transversal nulo.

O diagrama de momentos de fletores é esboçado na Figura 2.4. Tem o seu máximo na secção de meio vão com o valor de 156.25kN.m.

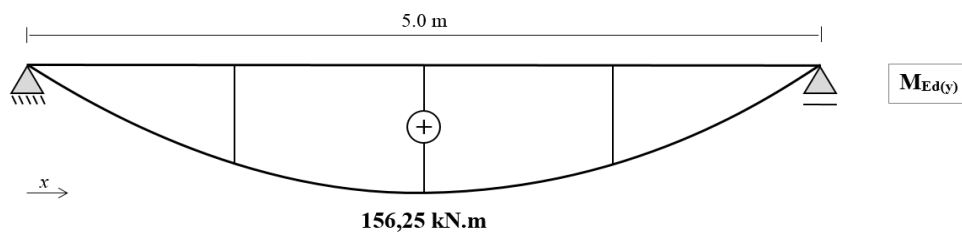


Figura 2.4 – Diagrama de momentos flectores na viga de teste 1.

Os Quadros 2.1 a 2.4 resumem os resultados da análise aos estados limite últimos do Modelo de Teste 1 obtidos em cada um dos programas utilizados.

Quadro 2.1 – Resultados Modelo de Teste 1: resistência da secção transversal e encurvadura.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Secção Transversal	IPE 500	IPE 500	IPE 500	IPE 500	
Classe da Secção	1	1	4 ; 1 ; 2	1	[A]
Resistência das secções transversais (NP EN 1993-1-1 [1], 6.2)					
N_{Rd}	2714,76 kN	2714,77 kN	2614,71 kN	2710,84 kN	[B]
$V_{z,Rd}$	812,35 kN	812,35 kN	691,95 kN	811,69 kN	[D]
$M_{y,Rd}$	515,62 kN.m	515,65 kN.m	515,59 kN.m	515,68 kN.m	
De acordo com o Eurocódigo 3 verifica-se não necessário ter em conta a interação entre o Esforço de Compressão N e o Momento Fletor M e entre o Esforços de Corte V e o Momento Fletor M .					
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo y (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,y}$	5 m	5 m	5 m	5 m	
χ_y	0,99	0,99	0,99	0,99	
$N_{b,y,Rd}$	2678,19 kN	2678,20 kN	-	2678,57 kN	
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo z (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,z}$	5 m	5 m	5 m	5 m	
χ_z	0,46	0,46	0,47	0,46	
$N_{b,z,Rd}$	1245,29 kN	1245,29 kN	1231,25 kN	1246,54 kN	[B]

Nota: O *Cype3D* classificou a mesma secção de forma distinta para diferentes verificações: resistência à compressão (e encurvadura); resistência à flexão (e encurvadura lateral); resistência à flexão composta. As classificações apresentadas dizem respeito, pela mesma ordem, a estas verificações (consultar nota [A]).

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , para o cálculo do momento crítico elástico de encurvadura lateral (M_{cr}), são seleccionados a partir do Quadro F.1.2 do Anexo F da ENV1993-1-1 [2] (Figura 2.5).

Loading and Support Conditions	Bending Moment Diagram	Value of k	Constants		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,132	0,459	0,525
		0,5	0,972	0,304	0,980

Figura 2.5 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 1.

A viga de teste 1 é simplesmente apoiada no plano yx , o equivalente a afirmar que a rotação em torno do eixo z local é livre em ambas as extremidades. Deduz-se k_z igual a 1,0. Não estão, da mesma forma, asseguradas quaisquer restrições ao empenamento das secções de extremidades pelo que k_w é igual a 1,0.

Quadro 2.2 – Resultados Modelo de Teste 1: resistência à encurvadura lateral.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Resistência do elemento à encurvadura lateral (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.2)					
l	5,0 m	5,0 m	5,0 m	5,0 m	
C_1	1,13	1,13	1,13	1,13	[G]
C_2	0,46	0,46	1,00	0,45	[G]
C_3	0,53	0,53	1,00	-	[G] [I]
$k_z ; k_w$	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	
$z_g ; z_j$	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0,25 m ; 0 m	[K]
M_{cr}	632,63 kN.m	632,57 kN.m	631,52 kN.m	442,58 kN.m	[K]
χ_{LT}	0,66	0,66	0,66	0,55	[K]
$M_{b,Rd}$	339,99 kN.m	339,99 kN.m	339,72 kN.m	282,55 kN.m	[K]

2.6.1.1 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1

A determinação dos coeficientes $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$, para o método alternativo 1 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.6). Em função deles são determinados os coeficientes de momento uniforme equivalente C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} .


Diagrama de momentos	$C_{mi,0}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Figura 2.6 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 1.

Em que: N_{Ed} – valor de cálculo do esforço axial atuante; $N_{cr,i}$ – valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y ou z .

Apresentam-se no Quadro 2.3 os resultados obtidos relativamente á análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão, adotando o Método 1 previsto no Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1] para quantificação dos fatores de interação.

Quadro 2.3 - Resultados Modelo de Teste 1: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1 [1].

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1 (Anexo A)					
$N_{cr,y}$	39960,05 kN	39958,81 kN	39960,05 kN	-	
$N_{cr,z}$	1775,56 kN	1775,56 kN	1775,82 kN	-	
$N_{cr,T}$	4031,75 kN	4035,88 kN	4052,72 kN	4038,87 kN	
C_{my}	1,00	1,00	1,00	1,00	[M]
C_{mLT}	1,23	1,23	1,23	1,23	[M]
$k_{yy}; k_{zy}$	1,29 ; 0,68	1,30 ; 0,69	1,30 ; 0,69	1,30 ; 0,69	
(1)	0,76 < 1	0,76 < 1	0,76 < 1	0,89 < 1	[L]
(2)	0,67 < 1	0,68 < 1	0,68 < 1	0,75 < 1	[L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.6.1.2 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2

A determinação dos coeficientes C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} , para o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro B.3 do Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.7).

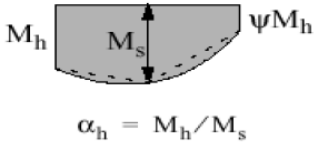
Diagrama de momentos	Domínio de aplicação		C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}	$\alpha_h = 0$
			Carga concentrada	
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,90 + 0,10\alpha_h$	$\psi = 1,0$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,90 + 0,10\alpha_h$	$C_{my} = 1,0$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)$	$C_{mLT} = 1,0$

Figura 2.7 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 1.

O método alternativo 2 envolve um procedimento de cálculo mais simples que o apresentado em 2.6.1.1, com significativamente menos parâmetros envolvidos (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 - Resultados Modelo de Teste 1: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2 [1].

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	A3C CC	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2 (Anexo B)					
C_{my}	1,00	0,90	-	1,00	[O]
C_{mLT}	1,00	0,90	-	1,00	[O]
$k_{yy}; k_{zy}$	1,01 ; 0,95	0,91 ; 0,94	- ; -	1,01 ; 0,95	[O]
(1)	$0,63 < 1$	$0,59 < 1$	-	$0,73 < 1$	[O] [L]
(2)	$0,80 < 1$	$0,80 < 1$	-	$0,89 < 1$	[O] [L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 500 OK	IPE 500 OK	-	IPE 500 OK	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.6.2 Modelo de Teste 2

O segundo Modelo de Teste apresenta mais um caso notável da tabela F.1.2 no Anexo F da ENV1993-1-1 [3], desta vez com condições de apoio e de carregamento totalmente distintas. Pretende-se avaliar a capacidade dos programas e ferramentas de entenderem os sistemas estruturais e quantificarem parâmetros como os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 e os fatores de comprimento efetivo k_z e k_w para situações diferentes.

A análise é centrada na secção de meio vão de uma viga realizada com o perfil *IPE 330*, bi-encastrada em ambos os planos (xy e xz), sem travamentos laterais intermédios e na qual atua o esquema de cargas representado na Figura 2.8.

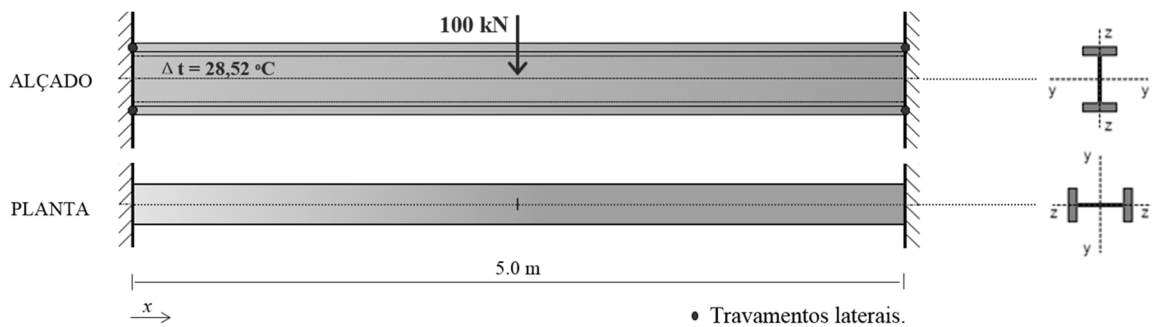


Figura 2.8 – Modelo de Teste 2.

Na secção em análise atua um esforço axial de 450kN e esforço transverso de 50kN. O esforço de compressão pode ser simulado nos programas de cálculo com a introdução de uma variação de temperatura positiva capaz de provocar esse efeito, de acordo com a Equação (2.2),

$$\frac{NL}{EA} = \Delta t \times \alpha \times L \Leftrightarrow \frac{450 \times 5,0}{210E^6 \times 62,6E^{-4}} = \Delta t \times 12E^{-6} \times 5,0 \Leftrightarrow \Delta t = 28,52 \text{ °C} \quad (2.2)$$

em que N é o esforço axial atuante (450 kN); L é o comprimento do elemento (5,0 m); E é o módulo de elasticidade do material (210 GPa); Δt é a variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$); α é o coeficiente de dilatação térmica linear do material ($12\text{E}^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

O diagrama de momentos de fletores é esboçado na Figura 2.9. Tem os seus máximos nas secções de meio vão e de extremidade com os valores 62.5 kN.m e -62.5 kN.m, respetivamente.

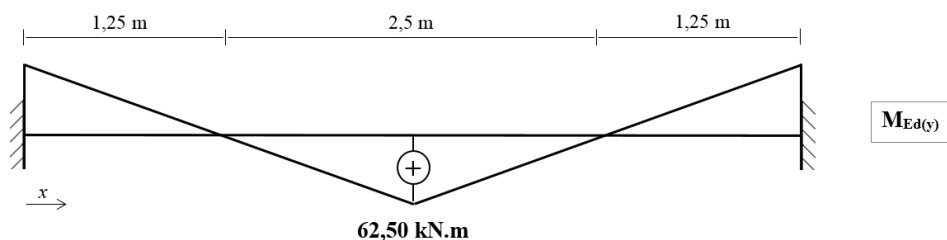


Figura 2.9 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 2

O *A3C Columns Calculator* não é capaz de realizar verificações em elementos com o sistema estrutural definido para a viga de teste 2, razão pela qual não foram produzidos resultados.

Os Quadros 2.5 a 2.8 resumem os resultados da análise aos estados limite últimos do Modelo de Teste 2 obtidos em cada um dos programas utilizados.

Quadro 2.5 – Resultados Modelo de Teste 2: resistência da secção transversal e encurvadura.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Secção Transversal	IPE 330	IPE 330	IPE 330	IPE 330	
Classe da Secção	2	1	3 ; 1 ; 3	-	[A]
Resistência das secções transversais (NP EN 1993-1-1 [1], 6.2)					
N_{Rd}	1471,34 kN	1471,25 kN	1471,25 kN	-	
$V_{z,Rd}$	418,06 kN	418,00 kN	335,80 kN	-	[D]
$M_{y,Rd}$	189,02 kN.m	189,03 kN.m	188,94 kN	-	
$M_{N,y,Rd}$	165,27 kN.m	165,27 kN.m	-	-	
De acordo com o Eurocódigo 3 verifica-se não necessário ter em conta a interação entre o Esforço de Compressão N e o Momento Fletor M_z e entre o Esforços de Corte V e o Momento Fletor M .					
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo y (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,y}$	2,5 m	2,5 m	2,5 m	-	
χ_y	1,00	1,00	1,00	-	
$N_{b,y,Rd}$	1473,21 kN	1473,25 kN	1473,25 kN	-	
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo z (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,z}$	2,5 m	2,5 m	2,5 m	-	
χ_z	0,75	0,75	0,75	-	
$N_{b,z,Rd}$	1110,24 kN	1110,17 kN	1110,17 kN	-	

Nota: O Cype3D classificou a mesma secção de forma distinta para diferentes verificações: resistência à compressão (e encurvadura); resistência à flexão (e encurvadura lateral); resistência à flexão composta. As classificações apresentadas dizem respeito, pela mesma ordem, a estas verificações (consultar nota [A]).

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , para o cálculo do momento crítico elástico de encurvadura lateral (M_{cr}), são selecionados a partir do Quadro F.1.2 do Anexo F da ENV1993-1-1 [2] (Figura 2.10).

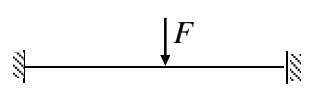
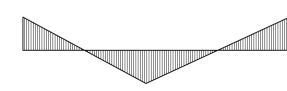
Loading and Support Conditions	Bending Moment Diagram	Value of k	Constants		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,565	1,257	2,640
		0,5	0,938	0,715	4,800

Figura 2.10 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 2.

A viga de teste 2 é bi-encastrada no plano xy , o equivalente a afirmar que a rotação em torno do eixo z local é impedida em ambas as extremidades. Deduz-se, portanto, k_z igual a 0,5. Mesmo se tratando de uma viga bi-encastrada considera-se que não estão asseguradas restrições ao empenamento das secções de extremidades pelo que k_w é igual a 1,0.

Quadro 2.6 – Resultados Modelo de Teste 2: resistência à encurvadura lateral.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Resistência do elemento à encurvadura lateral (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.2)					
l	5,0 m	5,0 m	5,0 m	5,0 m	
C_1	0,94	0,94	1,0	-	[G]
C_2	0,72	0,71	1,0	-	[G]
C_3	4,80	4,80	1,0	-	[G]
$k_z ; k_w$	0,5 ; 1,0	0,5 ; 1,0	0,5 ; 0,5	-	[F] [H]
$z_g ; z_j$	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	-	
M_{cr}	301,28 kN.m	292,98 kN.m	481,81 kN.m	-	[G] [H]
χ_{LT}	0,73	0,72	0,82	-	[G] [H]
$M_{b,Rd}$	137,86 kN.m	136,57 kN.m	155,68 kN.m	-	[G] [H]

2.6.2.1 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1

A determinação dos coeficientes $C_{m_y,0}$ e $C_{m_z,0}$, para o método alternativo 1 de quantificação dos fatores de interação para a análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.11). Em função deles são determinados os coeficientes de momento uniforme equivalente C_{m_y} , C_{m_z} e C_{mLT} ,

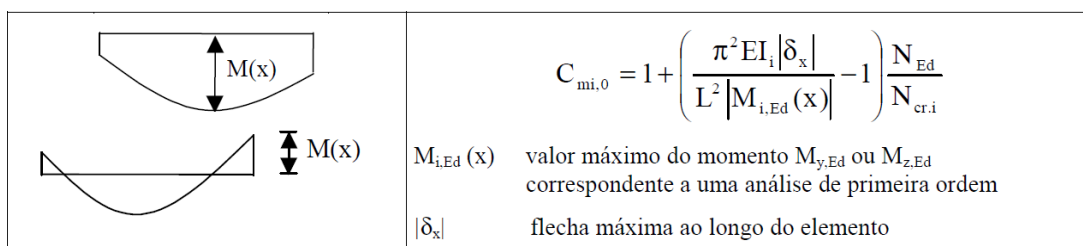


Figura 2.11 – Coeficiente $C_{m_y,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 2.

em que I_i é o momento de inércia da secção em relação ao eixo considerado (y ou z).

A flecha máxima (δ_z) na viga de teste 2, considerando as suas condições de apoio e o carregamento atuante, acontece na secção de meio vão e é dada pela Equação (2.3),

$$\delta_z = \frac{P \cdot L^3}{192 EI} = \frac{100 \times 5,0^3}{192 \times 200 \cdot 10^6 \times 11770 \cdot 10^{-8}} = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (2.3)$$

em que P é o valor da carga vertical concentrada a meio vão.

Quadro 2.7 - Resultados Modelo de Teste 2: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1 [1].

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1 (Anexo A)					
$N_{cr,y}$	39031,52 kN	39021,24 kN	39031,52	-	
$N_{cr,z}$	2613,62 kN	2613,63 kN	2613,52	-	
$N_{cr,T}$	4425,09 kN	4340,32 kN	4428,27	-	
C_{my}	1,00	1,00	1,00	-	[M]
C_{mLT}	1,15	1,15	1,15	-	[M]
$k_{yy}; K_{zy}$	1,15 ; 0,63	1,15 ; 0,63	1,16 ; 1,10	-	[C]
(1)	0,83 < 1	0,83 < 1	0,74 < 1	-	[C] [L]
(2)	0,69 < 1	0,69 < 1	0,82 < 1	-	[C] [L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 330 OK	IPE 330 OK	IPE 300 ↓	-	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.6.2.2 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2

A determinação dos coeficientes C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} , para o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro B.3 do Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.12).

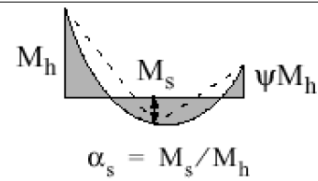
Diagrama de momentos	Domínio de aplicação		C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}	
			Carga concentrada	
 <p>$\alpha_s = M_s/M_h$</p>	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$\alpha_s = 1,0$ $\psi = 1,0$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$	$C_{my} = 1,0$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$C_{mLT} = 1,0$

Figura 2.12 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 2.

Os resultados da análise são apresentados no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Resultados Modelo de Teste 2: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2 [1].

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	A3C CC	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2 (Anexo B)					
C_{my}	1,00	0,90	-	-	[O]
C_{mLT}	1,00	0,90	-	-	[O]
$k_{yy}; k_{zy}$	1,00 ; 0,96	0,90 ; 0,95	-	-	[O]
(1)	$0,76 < 1$	$0,72 < 1$	-	-	[O]
(2)	$0,84 < 1$	$0,84 < 1$	-	-	[O]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 330 OK	IPE 330 OK	-	-	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.6.3 Modelo de Teste 3

O terceiro Modelo de Teste introduz neste capítulo a análise de elementos travados lateralmente em pontos intermédios. Pretende-se analisar a capacidade dos programas e ferramentas de interpretarem corretamente a posição destes travamentos, por forma a quantificarem comprimentos de encurvadura e parâmetros associados.

A análise é centrada na secção de meio vão de uma viga simplesmente apoiada realizada com o perfil *IPE 360*, com travamentos laterais nas secções correspondentes a 25% e 75% do vão (coincidentes com o ponto de aplicação das cargas), e na qual atua o esquema de cargas na Figura 2.13.

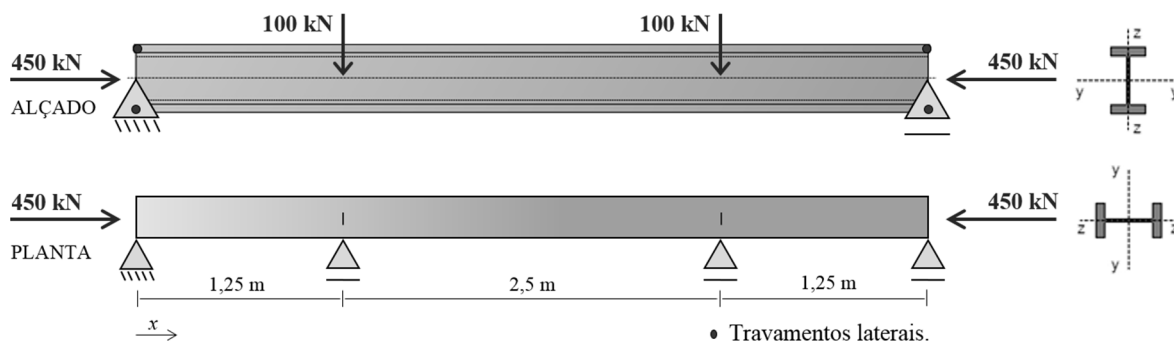


Figura 2.13 – Modelo de Teste 3.

Na secção em análise atua um esforço axial de 450kN e esforço transversal de 100kN.

O diagrama de momentos de fletores é esboçado na Figura 2.14. Tem o seu máximo entre as secções de aplicação das cargas com o valor de 125kN.m.

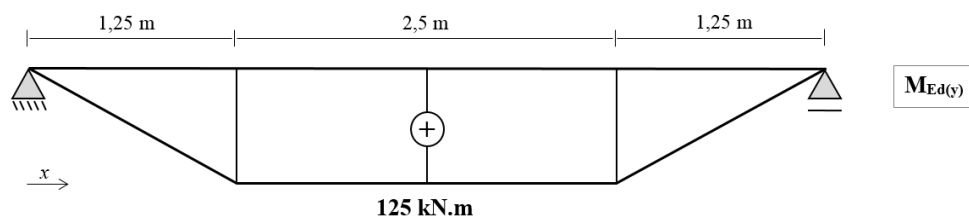


Figura 2.14 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 3.

Os Quadros 2.9 a 2.12 resumem os resultados da análise aos estados limite últimos do Modelo de Teste 3 obtidos em cada um dos programas utilizados.

Quadro 2.9 – Resultados Modelo de Teste 3: resistência da secção transversal e encurvadura.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Secção Transversal	IPE 360	IPE 360	IPE 360	IPE 360	
Classe da Secção	2	2	4 ; 1 ; 2	1	[A]
Resistência das secções transversais (NP EN 1993-1-1, 6.2)					
N_{Rd}	1709,14 kN	1709,14 kN	1708,45 kN	1711,03 kN	[B]
$V_{z,Rd}$	476,73 kN	476,73 kN	390,75 kN	476,19 kN	[D]
$M_{y,Rd}$	239,50 kN.m	239,50 kN.m	239,47 kN.m	239,46 kN.m	
$M_{N,y,Rd}$	221,42 kN.m	221,44 kN.m	221,33 kN.m	212,59 kN.m	
De acordo com o Eurocódigo 3 verifica-se não necessário ter em conta a interação entre o Esforço de Compressão N e o Momento Fletor M e entre o Esforços de Corte V e o Momento Fletor M.					
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo y (NP EN 1993-1-1, 6.3.1.1)					
$L_{cr,y}$	5 m	5 m	5 m	5 m	
χ_y	0,96	0,96	0,96	0,96	
$N_{b,y,Rd}$	1647,64 kN	1647,64 kN	-	1648,35 kN	
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo z (NP EN 1993-1-1, 6.3.1.1)					
$L_{cr,z}$	5 m	5 m	5 m	5 m	
χ_z	0,78	0,78	0,78	0,78	
$N_{b,z,Rd}$	1336,76 kN	1336,76 kN	1336,21 kN	1335,31 kN	[B]

Nota: O Cype3D classificou a mesma secção de forma distinta para diferentes verificações: resistência à compressão (e encurvadura); resistência à flexão (e encurvadura lateral); resistência à flexão composta. As classificações apresentadas dizem respeito, pela mesma ordem, a estas verificações (consultar nota [A]).

Identifica-se o tramo central (entre travamentos intermédios) como o mais condicionante. Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , para o cálculo do momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr}), são seleccionados para o tramo referido a partir do Quadro F.1.1 do Anexo F da ENV1993-1-1 [2] (Figura 2.15).

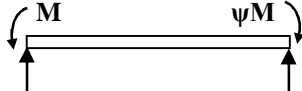

Loading and Support Conditions	Bending Moment Diagram	Value of k	Constants		
			C ₁	C ₂	C ₃
		1,0	1,000	---	1,000
		0,7	1,000	---	1,113
		0,5	1,000	---	1,144

Figura 2.15 – Coeficientes C₁, C₂ e C₃ para o Modelo de Teste 3.

O comprimento l entre secções lateralmente contraventadas é igual a 2,5m. Considera-se que não existem restrições em relação à rotação em torno do eixo z e ao empenamento das secções de extremidade do tramo considerado. Deduz-se, portanto, k_z e k_w iguais a 1,0.

Quadro 2.10 – Resultados Modelo de Teste 3: resistência à encurvadura lateral

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Resistência do elemento à encurvadura lateral (NP EN 1993-1-1, 6.3.2)					
l	2,5 m	2,5 m	2,5 m	2,5 m	[E]
C_1	1,00	1,00	1,00	1,00	[G]
C_2	0,00	0,00	1,00	0,0	[G]
C_3	1,00	1,00	1,00	-	[G] [I]
$k_z ; k_w$	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	[F] [H]
$z_g ; z_j$	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0,18 m ; 0 m	[K]
M_{cr}	681,49 kN.m	679,87 kN.m	681,66 kN.m	681,62 kN.m	
χ_{LT}	0,84	0,84	0,84	0,84	
$M_{b,Rd}$	201,33 kN.m	201,26 kN.m	201,32 kN.m	201,34 kN.m	

2.6.3.1 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1

A determinação dos coeficientes $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$, para o método alternativo 1 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.16), para o tramo entre travamentos laterais mais desfavorável (troço central). Em função deles são determinados os coeficientes de momento uniforme equivalente C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} .

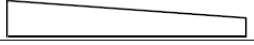
Diagrama de momentos	$C_{mi,0}$	
	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$	$M_1 = \psi M_1$
$-1 \leq \psi \leq 1$		$\psi = 1,0$

Figura 2.16 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 3.

Em que: N_{Ed} – valor de cálculo do esforço axial atuante; $N_{cr,i}$ – valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y ou z .

Quadro 2.11 - Resultados Modelo de Teste 3: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1 (Anexo A)					
$N_{cr,y}$	13488,59 kN	13484,94 kN	13488,59 kN	13484,97 kN	
$N_{cr,z}$	3460,28 kN	3460,28 kN	3458,78 kN	3460,28 kN	
$N_{cr,T}$	5634,57 kN	5612,80 kN	5641,20 kN	5641,61 kN	
C_{my}	1,00	1,00	1,00	1,00	[M]
C_{mLT}	1,12	1,12	1,12	1,12	[M]
$k_{yy}; k_{zy}$	1,15 ; 0,63	1,14 ; 0,62	1,16 ; 0,63	1,15 ; 0,62	
(1)	0,99 < 1	0,97 < 1	0,97 < 1	0,99 < 1	[L]
(2)	0,72 < 1	0,71 < 1	0,72 < 1	0,72 < 1	[L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 360 OK	IPE 360 OK	IPE 360 OK	IPE 360 OK	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.6.3.2 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2

A determinação dos coeficientes C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} , para o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro B.3 do Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.17).

Quadro 2.12 - Resultados Modelo de Teste 3: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	A3C CC	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2 (Anexo B)					
C_{my}	0,90	0,90	-	1,00	[O]
C_{mLT}	0,90	0,90	-	1,00	[O]
$k_{yy}; K_{zy}$	0,94 ; 0,96	0,94 ; 0,96	- ; -	1,04 ; 0,97	[O]
(1)	0,86 < 1	0,84 < 1	-	0,92 < 1	[O] [L]
(2)	0,93 < 1	0,92 < 1	-	0,94 < 1	[O] [L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 360 OK	IPE 360 OK	-	IPE 360 OK	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).


Diagrama de momentos	Domínio de aplicação	C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}		$M_1 = \psi M_1$
		Carga uniforme	Carga concentrada	
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$		$\psi = 1,0$

Figura 2.17 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 3.

2.6.4 Modelo de Teste 4

O quarto Modelo de Teste tem como objetivo avaliar a abordagem de cálculo tomada pelos programas e ferramentas para realização de verificações em consolas, principalmente no que diz respeito à quantificação do momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr}).

A análise é centrada na secção de encastramento de uma viga em consola realizada com perfil *IPE 400*, com travamentos laterais em ambas as secções de extremidade, e na qual atua o esquema de cargas representado na Figura 2.18.

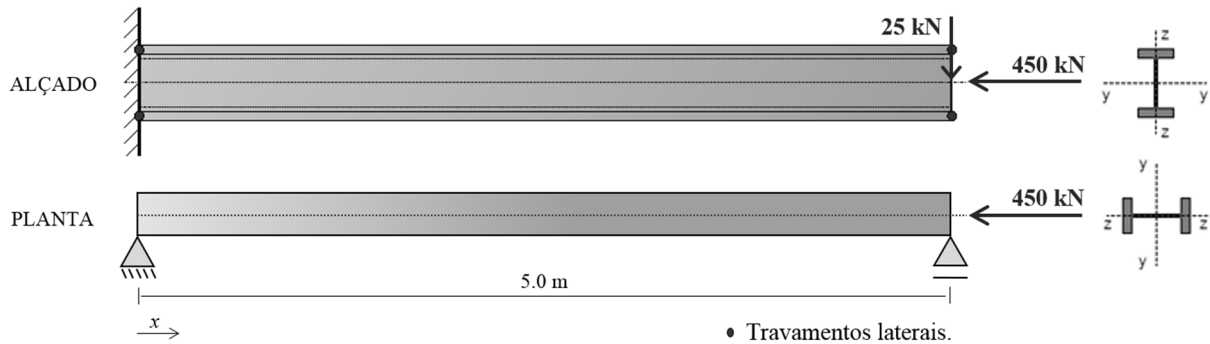


Figura 2.18 – Modelo de Teste 4.

Na secção em análise atua um esforço axial de 450kN e esforço transversal de 25kN. O diagrama de momentos de fletores é esboçado na figura 2.19. Tem o seu máximo na secção de encastramento com o valor de 125kN.m.

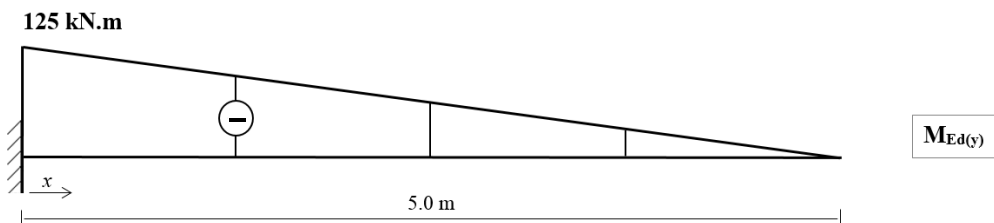


Figura 2.19 – Diagrama de momentos fletores na viga de teste 4

Os Quadros 2.13 a 2.16 resumem os resultados da análise aos estados limite últimos do Modelo de Teste 4 obtidos em cada um dos programas utilizados.

Quadro 2.13 – Resultados Modelo de Teste 4: resistência da secção transversal e encurvadura

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Secção Transversal	IPE 400	IPE 400	IPE 400	IPE 400	
Classe da Secção	1	1	4 ; 1 ; 1	1	[A]
Resistência das secções transversais (NP EN 1993-1-1 [1], 6.2)					
N_{Rd}	1984,89 kN	1984,89 kN	1934,71 kN	1982,38 kN	[B]
$V_{z,Rd}$	579,27 kN	579,27 kN	466,73 kN	581,40 kN	[D]
$M_{y,Rd}$	307,18 kN.m	307,21 kN.m	307,15 kN.m	307,13 kN.m	
$M_{N,y,Rd}$	301,56 kN.m	301,59 kN.m	301,61 kN.m	282,17 kN.m	
De acordo com o Eurocódigo 3 verifica-se não necessário ter em conta a interação entre o Esforço de Compressão N e o Momento Fletor M_z e entre o Esforços de Corte V e o Momento Fletor M .					
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo y (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,y}$	10 m	10 m	10 m	10 m	
χ_y	0,87	0,87	0,88	0,87	
$N_{b,y,Rd}$	1732,28 kN	1732,28 kN	-	1732,28 kN	
Resistência do elemento à encurvadura em torno do eixo z (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1)					
$L_{cr,z}$	5 m	5 m	5 m	5 m	
χ_z	0,40	0,40	0,41	0,41	
$N_{b,z,Rd}$	802,90 kN	802,90 kN	797,88 kN	802,90 kN	[B]

Nota: O Cype3D classificou a mesma secção de forma distinta para diferentes verificações: resistência à compressão (e encurvadura); resistência à flexão (e encurvadura lateral); resistência à flexão composta. As classificações apresentadas dizem respeito, pela mesma ordem, a estas verificações (consultar nota [A]).

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , para o cálculo do momento crítico elástico de encurvadura lateral (M_{cr}), são seleccionados a partir do Quadro F.1.1 do Anexo F da ENV1993-1-1 [3] (Figura 2.20).

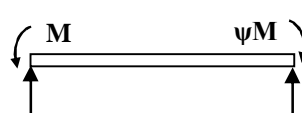
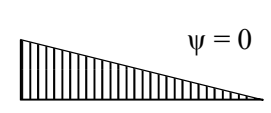
Loading and Support Conditions	Bending Moment Diagram	Value of k	Constants		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,879	---	0,939
		0,7	2,092	---	1,473
		0,5	2,150	---	2,150

Figura 2.20 – Coeficientes C_1 , C_2 e C_3 para o Modelo de Teste 4.

A viga de teste 4 é simplesmente apoiada no plano yx , o equivalente a afirmar que a rotação em torno do eixo z local é livre em ambas as extremidades. Deduz-se k_z igual a 1,0.

Quadro 2.14 – Resultados Modelo de Teste 4: resistência à encurvadura lateral.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Resistência do elemento à encurvadura lateral (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.2)					
l	5,0 m	5,0 m	5,0 m	5,0 m	
C_1	1,88	1,88	1,88	1,78	[G] [J]
C_2	0,00	0,00	1,00	0,00	[G]
C_3	0,94	0,94	1,00	-	[G] [I]
$k_z ; k_w$	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	1,0 ; 1,0	
$z_g ; z_j$	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0 m ; 0 m	0,20 m ; 0 m	[K]
M_{cr}	562,40 kN.m	550,92 kN.m	562,79 kN.m	531,94 kN.m	[K]
χ_{LT}	0,76	0,76	0,76	0,75	[K]
$M_{b,Rd}$	233,83 kN.m	233,45 kN.m	233,85 kN.m	230,03 kN.m	[K]

2.6.4.1 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1

A determinação dos coeficientes $C_{m_y,0}$ e $C_{m_z,0}$, para o método alternativo 1 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.21). Em função deles são determinados os coeficientes de momento uniforme equivalente C_{m_y} , C_{m_z} e C_{mLT} .

Quadro 2.15 - Resultados Modelo de Teste 4: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 1.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 1 (Anexo A)					
$N_{cr,y}$	4793,96 kN	4793,63 kN	4793,96 kN	4793,63 kN	
$N_{cr,z}$	1092,54 kN	1092,53 kN	1092,68 kN	1092,54 kN	
$N_{cr,T}$	2828,85 kN	2715,74 kN	2834,67 kN	2836,8502 kN	
C_{m_y}	0,91	0,91	0,91	0,91	[M]
C_{mLT}	1,17	1,18	1,16	1,17	[M]
$k_{yy} ; K_{zy}$	1,22 ; 0,59	1,23 ; 0,60	1,21 ; 0,59	1,22 ; 0,60	
(1)	0,91 < 1	0,92 < 1	0,91 < 1	0,92 < 1	[L]
(2)	0,87 < 1	0,88 < 1	0,88 < 1	0,89 < 1	[L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 400 OK	IPE 400 OK	IPE 400 OK	IPE 400 OK	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

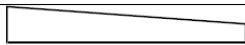
Diagrama de momentos		$C_{mi,0}$	$\psi M_1 = 0$ $\psi = 0,0$
M_1			
$-1 \leq \psi \leq 1$		$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$	

Figura 2.21 – Coeficiente $C_{my,0}$ de acordo com o Método 1 – Modelo de Teste 4.

Em que: N_{Ed} – valor de cálculo do esforço axial atuante; $N_{cr,i}$ – valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y ou z.

2.6.4.2 Análise de estabilidade global do elemento (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2

A determinação dos coeficientes C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} , para o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação para análise à estabilidade global do elemento, é feita de acordo com o Quadro B.3 do Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1] (Figura 2.22).


Diagrama de momentos	Domínio de aplicação	C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}		$\psi M_1 = 0$ $\psi = 0,0$
		Carga uniforme	Carga concentrada	
M		$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Figura 2.22 – Coeficientes C_{my} e C_{mLT} de acordo com o Método 2 – Modelo de Teste 4.

Quadro 2.16 - Resultados Modelo de Teste 4: análise de estabilidade global do elemento em flexão composta com compressão – Método 2.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	A3C CC	Obs.
Estabilidade Global (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3) – Método 2 (Anexo B)					
C_{my}	0,60	0,90	-	0,60	[O]
C_{mLT}	0,60	0,90	-	0,60	[O]
$k_{yy}; K_{zy}$	0,67 ; 0,78	1,00 ; 0,91	- ; -	0,67 ; 0,84	[O]
(1)	$0,62 < 1$	$0,80 < 1$	-	$0,62 < 1$	[O] [L]
(2)	$1,01 > 1$	$1,05 > 1$	-	$1,02 > 1$	[O] [L]
Dimensionamento da secção transversal					
Secção Transversal	IPE 450 ↑	IPE 450 ↑	-	IPE 450 ↑	

(1) Condição associada à encurvadura em torno de y (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.61)).

(2) Condição associada à encurvadura em torno de z (NP EN 1993-1-1 [1], Exp.(6.62)).

2.7 Interpretação dos resultados obtidos no estudo comparativo

As considerações tomadas neste subcapítulo são resultado da interpretação dos resultados obtidos no estudo comparativo realizado em 2.6.

Fazem-se corresponder as notas tomadas nesta secção com as observações marcadas na última coluna dos Quadros 2.1 a 2.16. O símbolo [] corresponde ao início da nota a que se refere, o símbolo \dashv corresponde ao seu fim.

2.7.1 Classificação da secção transversal

Os *softwares* utilizados foram, em geral, eficazes ao realizar a classificação das secções transversais de acordo com a secção 5.5.2 da NP EN 1993-1-1 [1]. Algumas notas devem no entanto ser deixadas em relação à forma como o *CYPE 3D* realiza a classificação dessas secções.

[A] O *CYPE 3D* adotou uma abordagem diferente dos restantes programas realizando classificações distintas da mesma secção transversal para diferentes verificações relativamente ao mesmo modelo de teste:

- verificação da resistência à compressão (e encurvadura), classificando a secção transversal supondo-a sujeita a compressão pura;
- verificação da resistência à flexão (e encurvadura lateral), classificando a secção transversal supondo-a sujeita a flexão simples;
- verificação da resistência à flexão composta (análise de estabilidade global), classificando a secção com base na solicitação real na secção transversal (flexão composta).

Trata-se de uma abordagem diferente que em nada afeta os resultados finais uma vez que nenhum parâmetro é transportado dos procedimentos anteriores para o procedimento de verificação final à estabilidade global do elemento, procedimento esse que reúne a consideração de todos os fenómenos estudados em procedimentos anteriores. Isto significa que, neste último procedimento, o *CYPE 3D* recalcula os valores dos parâmetros N_{Rd} , M_{Rd} , χ_y , χ_z e χ_{LT} com base na classificação da secção transversal que considera o estado real de solicitação na peça, classificação coerente com a realizada pelos outros programas. [~~A~~]

[B] Este é o caso dos modelos de teste 1, 3 e 4, onde a classificação da secção como Classe 4 nos cálculos relativos à verificação da resistência da secção à compressão (e encurvadura) levou à consideração de uma área efetiva, A_{eff} , reduzida em relação à área bruta, que teve como consequência resultados inferiores no que diz respeito aos valores de cálculo das resistências à compressão da secção transversal, N_{Rd} (NP EN 1993-1-1 [1], 6.2.4), e à encurvadura do elemento comprimido, $N_{b,Rd}$ (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.1.1). [~~B~~]

[C] O *CYPE 3D* despreza para o cálculo de classificação das secções transversais os raios de concordância que fazem a ligação entre a alma e os banzos. Este aspeto pode traduzir-se em classificações mais desfavoráveis das referidas secções quando comparadas com os resultados que se obtêm considerando a existência desses raios.

É o que acontece para o caso do modelo de teste 2, em que, para os cálculos relativos à análise de estabilidade global do elemento, é atribuída a Classe 3 à secção transversal em vez da Classe 2 que lhe seria atribuída se não fossem desprezados os raios de concordância. Para o caso referido isto refletiu-se nos valores de N_{Rd} , M_{Rd} , χ_y , χ_z e χ_{LT} considerados para verificação à estabilidade global do elemento e levou à adoção de expressões diferentes para a determinação dos fatores de iteração k_{ij} (Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1]) – Quadro 2.7 [€]

2.7.2 Verificação da resistência da secção transversal

Os resultados obtidos relativamente à resistência da secção transversal são em geral satisfatórios.

[D] Na quantificação da resistência ao esforço transversal o *CYPE 3D* assume uma simplificação na quantificação da área de corte (A_v) ao não ter em conta os raios de concordância entre a alma e banzos da secção, o que se traduz num valor conservativo de $V_{z,Rd}$ (resistência ao esforço transversal). O *CYPE 3D* assume simplificadamente que a área de corte é dada pela expressão (2.4), enquanto o Eurocódigo 3 propõe a expressão (2.5) para o caso de secções laminadas em I [1], de acordo com a Figura 2.23,

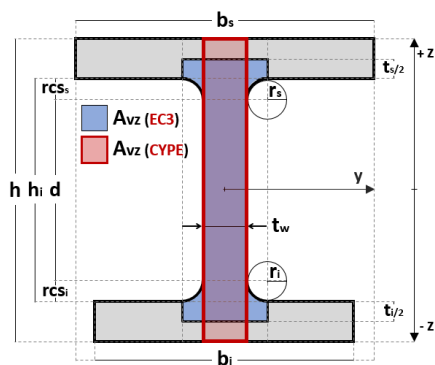


Figura 2.23 – Área resistente ao esforço transversal, A_v .

$$A_{v(CYPE3D)} = h \times t_w \quad (2.4)$$

$$A_{v(EC3)} = A - 2b t_f + (t_w + 2r) t_f \geq \eta h_w t_w \quad (2.5)$$

em que A é a área da secção transversal; h é a altura da secção transversal; b é a largura dos banzos da secção transversal; h_w é a altura da alma da secção transversal; t_w é a espessura da alma da secção transversal; t_f é a espessura dos banzos da secção transversal; r é o raio de concordância entre alma e banzos da secção transversal. [D]

2.7.3 Modelação das condições de apoio e travamento lateral em verificações à encurvadura e encurvadura lateral

Os programas apresentam várias formas (módulos) de caracterizar as condições de travamento dos elementos para análises à encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento). O utilizador deverá ser capaz de avaliar qual a mais indicada a cada situação e, em cada caso, verificar por consulta dos relatórios de cálculo do programa se está a ser feita a quantificação correta dos parâmetros que caracterizam a geometria do sistema estrutural.

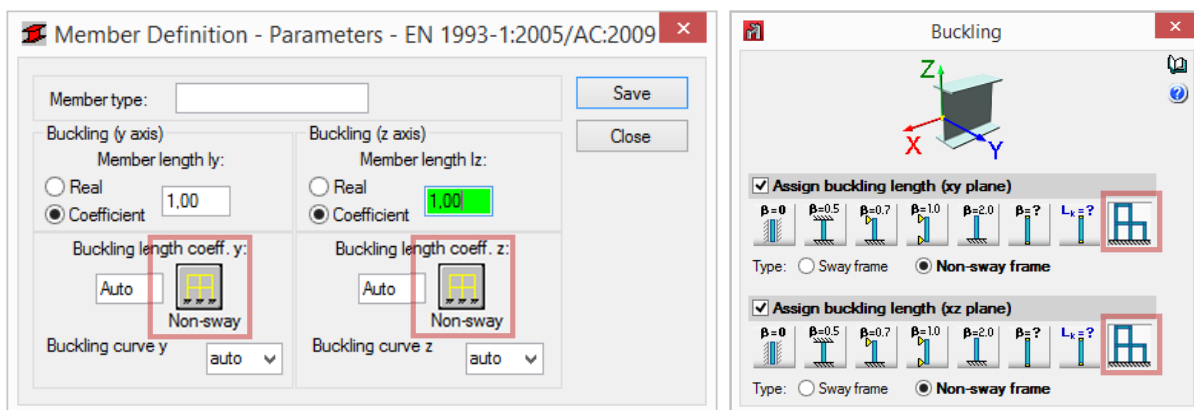
O Quadro 2.17 identifica, para cada Modelo de Teste, a forma (módulo) que foi utilizada em cada programa para a análise aos fenómenos de encurvadura (B) e encurvadura lateral (LTB). Os módulos são identificados em coerência com as descrições que em seguida se apresentam.

Quadro 2.17 – Identificação da forma (módulo) utilizada em cada programa para análise aos fenómenos de encurvadura (B) e encurvadura lateral (LTB) em cada Modelo de Teste

		Modelo Teste 1	Modelo Teste 2	Modelo Teste 3	Modelo Teste 4
<i>Robot SA</i>	B	Módulo A	Módulo A	Módulo B	Módulo A
	LTB	Módulo C	Módulo C	Módulo B	Módulo C
<i>CYPE 3D</i>	B	Módulo A	Módulo A	Módulo C	Módulo A
	LTB	Módulo C	Módulo C	Módulo C	Módulo C
<i>A3C CC</i>	B	Módulo B	Módulo B	Módulo B	Módulo B
	LTB	Módulo B	Módulo B	Módulo B	Módulo B

Módulo A: Cálculo automático de comprimentos de encurvadura (varejamento) para o caso de elementos sem travamentos intermédios – *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*.

Os programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* dispõe de módulos de cálculo eficientes que permitem determinar automaticamente comprimentos de encurvadura (varejamento). O módulo fica ativo quando a correspondente opção é selecionada (Figura 2.24). A eficiência do Módulo A é limitada a barras contínuas sem condições de travamento em pontos intermédios.



a) *Robot Structural Analysis*.

b) *CYPE 3D*.

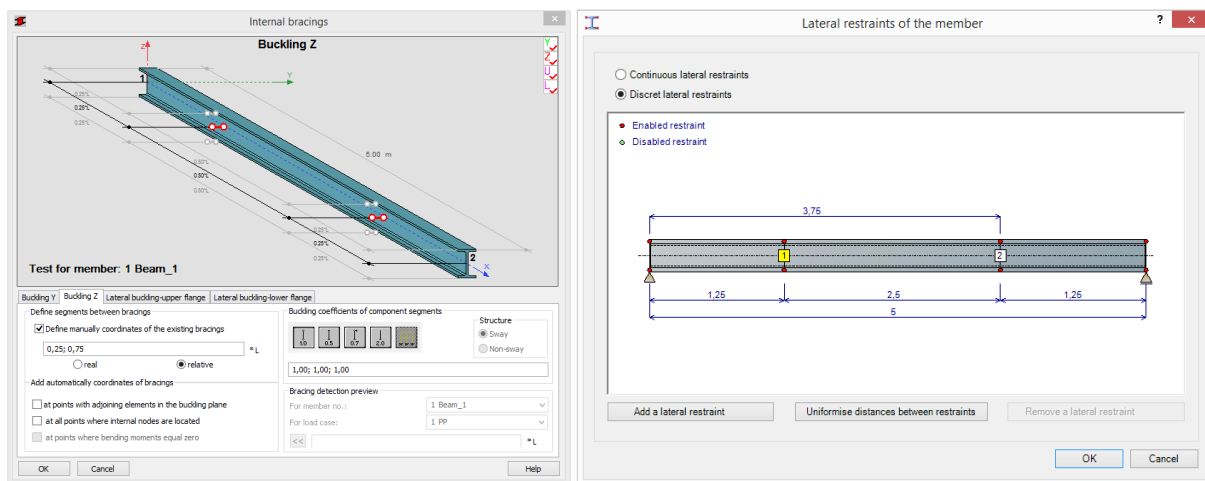
Figura 2.24 – Ativação do módulo de cálculo automático de comprimentos de encurvadura.

Módulo B: Cálculo automático dos parâmetros relacionados com a análise à encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento) para o caso de elementos com ou sem travamentos intermédios – Robot SA e A3C Columns Calculator.

O *Robot Structural Analysis* e o *A3C Columns Calculator* dispõe de interfaces gráficas que permitem o posicionamento no espaço de travamentos laterais. A partir desse posicionamento determinam de forma eficiente todos os parâmetros relacionados com a análise aos fenómenos de encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento).

O *Robot Structural Analysis* (Figura 2.25a) permite identificar de forma independente a posição de quatro tipos de travamento: travamento do elemento na direção y; travamento do elemento na direção z; travamento lateral do banzo superior; travamento lateral do banzo inferior.

O *A3C Columns Calculator* (Figura 2.25b) permite a identificação no espaço das secções lateralmente contraventadas. Cada travamento lateral restringe completamente (banzos superior e inferior) a translação em y da secção a que diz respeito, não sendo possível restringir apenas um dos banzos.



a) Autodesk Robot Structural Analysis

b) A3C Columns Calculator

Figura 2.25 – Módulo B. Definição de condições de apoio e travamento lateral para análise à resistência à encurvadura e encurvadura lateral (exemplo do Modelo de Teste 3).

No caso do *Robot Structural Analysis* o bom funcionamento do módulo fica dependente da correta definição do tipo de carga (“Load Type”), de acordo com a Figura 2.26.

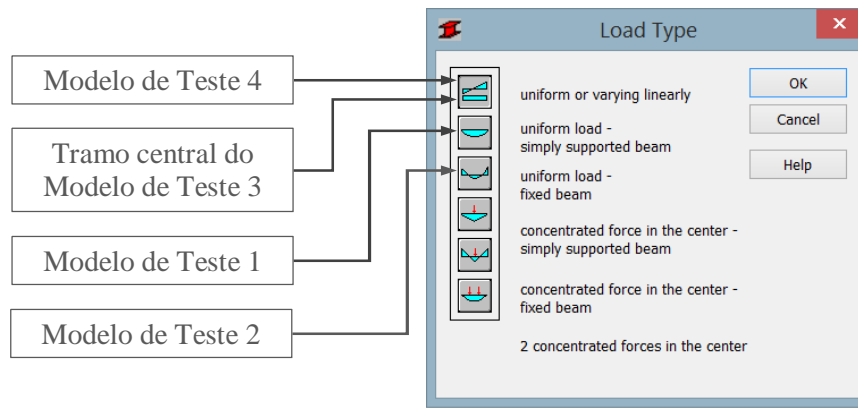
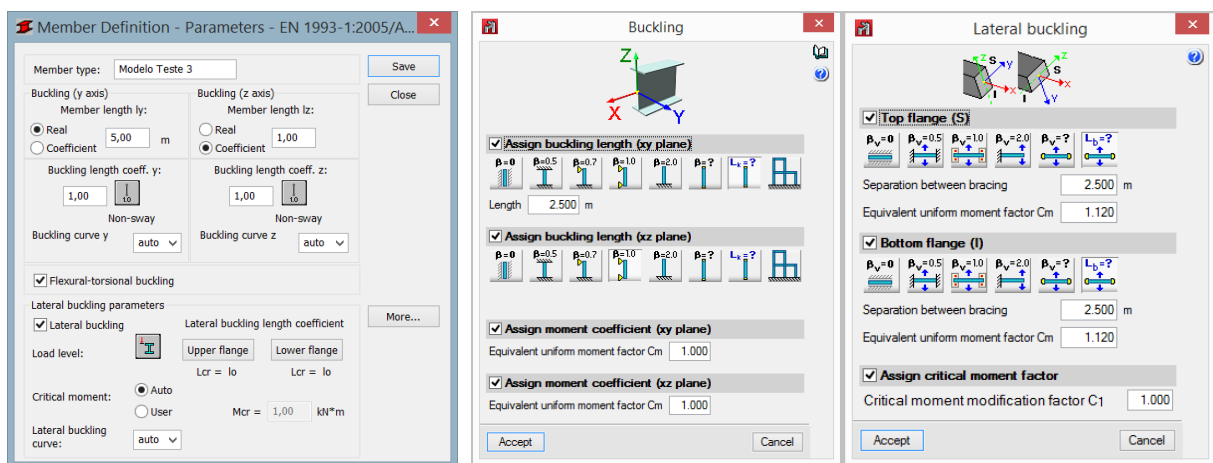


Figura 2.26 – Robot Structural Analysis. Definição do tipo de carga na janela “Load Type”.

Módulo C: Definição manual de comprimentos de encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento) para elementos com ou sem travamentos intermédios – Robot Structural Analysis e CYPE 3D.

O *Robot Structural Analysis* e o *CYPE 3D* permitem caracterizar as condições de travamento dos elementos por definição manual dos comprimentos de encurvadura (varejamento) em torno dos eixos y e z , e do que definem como sendo os comprimentos de encurvadura lateral (bambeamento) de cada banzo, de acordo com a Figura 2.27.



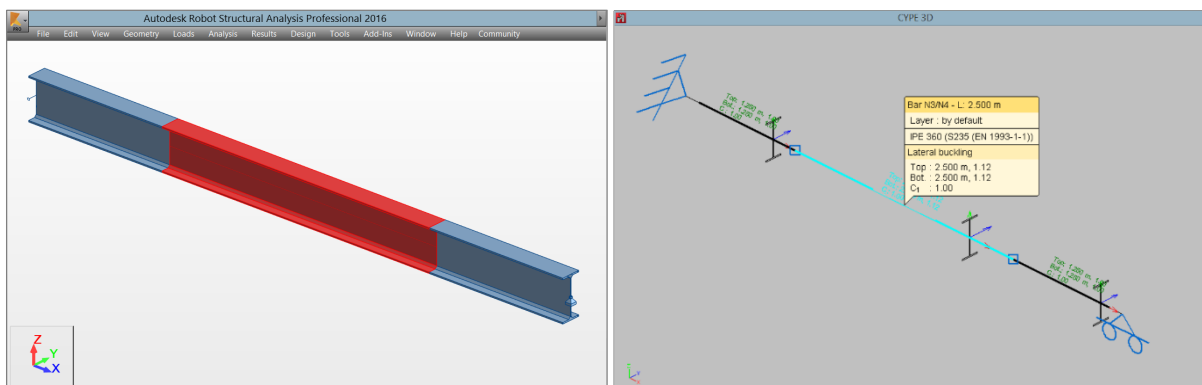
a) Robot Structural Analysis

b) CYPE 3D

Figura 2.27 - Definição de condições de apoio e travamento para verificação da resistência à encurvadura e encurvadura lateral (exemplo do tramo central do Modelo de Teste 3)

[E] Relativamente à análise à encurvadura lateral (bambeamento), nos casos em que existem travamentos intermédios dos banzos superior e/ou inferior, considera-se necessário adequar estratégias de modelação que permitam a determinação correta dos parâmetros envolvidos no cálculo do valor do momento crítico M_{cr} de acordo com a proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6]. Propõe-se a estratégia que será apresentada em detalhe na secção 5.3.3 deste documento, e que foi desenvolvida no contexto do estudo documentado nesse capítulo. Sugere a modelação do elemento em tramos de comprimentos iguais aos comprimentos entre secções

lateralmente contraventadas, considerando para o efeito o contraventamento do banzo comprimido por ser aquele que é suscetível de sofrer do fenómeno de instabilidade em causa (Figura 2.28).



a) Robot Structural Analysis (Autodesk)

b) CYPE 3D

Figura 2.28 – Divisão do elemento em tramos de comprimentos iguais aos comprimentos entre secções lateralmente contraventadas (exemplo do Modelo de Teste 3).

Nesta última situação, para cada tramo do elemento de barra será necessário definir individualmente os parâmetros referidos no primeiro parágrafo deste módulo.

Nesse caso, se o comprimento de encurvadura for comunicado ao programa por definição do valor do coeficiente de encurvadura β (tal que; $L_{cr} = \beta \times L$), deve ter-se em consideração de que se está a defini-los para tramos que são frações da barra real [15], e que, para o programa, L corresponderá portanto ao comprimento desse tramo (Figura 2.29).

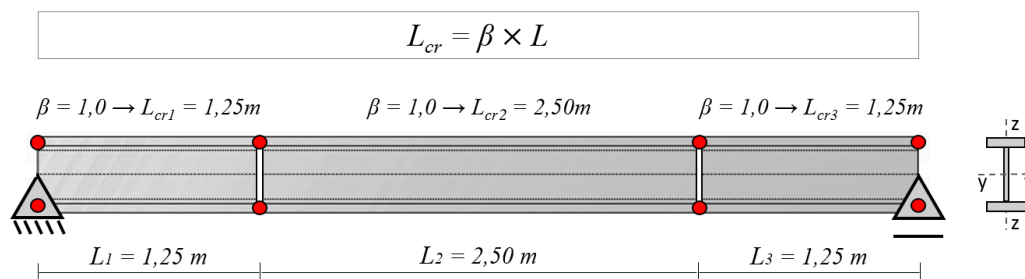


Figura 2.29 – Valor do comprimento de encurvadura comunicado manualmente ao programa por definição do coeficiente de encurvadura β (exemplo do Modelo de Teste 3).

No Modelo de Teste 3 a referida estratégia foi utilizada como forma de traduzir no programa *CYPE 3D* as condições de travamento para o que diz respeito à análise à encurvadura lateral (bambeamento). O elemento foi dividido em tramos de acordo com a Figura 2.28: a distância entre secções lateralmente contraventadas l no tramo condicionante (o tramo central) é igual a 2,5m; não existem restrições à rotação ou ao empenamento das secções de extremidade do tramo pelo que $k_z = k_w = 1,0$.

De acordo com Quadro 2.18, apenas a Abordagem 2, a que utiliza a referida estratégia, permite a quantificação correta dos parâmetros envolvidos no cálculo de M_{cr} por parte do *CYPE 3D*.

Quadro 2.18 – Quantificação por parte do *CYPE 3D* dos parâmetros envolvidos no cálculo de M_{cr} .

	<i>CYPE 3D</i> – Abordagem 1	<i>CYPE 3D</i> – Abordagem 2
Modelação	O elemento é modelado como uma barra única. Define-se para o elemento:	O elemento é modelado em tramos de comprimento igual às distâncias entre secções lateralmente contraventadas (Figura 2.5). Define-se para o tramo central do elemento:
	$L_{cr}^{LT} = 2,5 \text{ m}^{(1)}$	$\beta = 1,0 \rightarrow L_{cr}^{LT} = 2,5 \text{ m}^{(1)}$
l	$l = L = 5,0 \text{ m}^{(2)}$	2,5 m
C_l	1,0 (definido manualmente)	1,0 (definido manualmente)
$k_z ; k_w$	$k_z = L_{cr}^{LT} / L = 0,5 ; k_w = k_z = 0,5^{(2)}$	$k_z = L_{cr}^{LT} / L = 1,0 ; k_w = k_z = 1,0$
M_{cr}	681,66 kN.m ⁽³⁾	681,66 kN.m ⁽³⁾
χ_{LT}	0,84	0,84
$M_{b,Rd}$	201,32 kN.m	201,32 kN.m

(1) L_{cr}^{LT} é o comprimento de encurvadura lateral do banzo comprimido pelo esforço de flexão;

(2) Os parâmetros destacados a vermelho não traduzem a realidade do Modelo de Teste 3;

(3) Para este caso específico as duas abordagens acabam por chegar ao mesmo valor do momento crítico de encurvadura lateral (M_{cr}). Isto só acontece porque o *CYPE 3D* toma para qualquer situação $k_w = k_z$, o que, por coincidência, está coerente com a realidade do Modelo de Teste 3. Embora os valores de k_w e k_z determinados de acordo com a Abordagem 1 sejam diferentes dos obtidos na Abordagem 2, nas duas situações $k_w = k_z$ o que faz com que a relação k_z/k_w na Equação (2.1) iguale a unidade, conduzindo ao mesmo valor de M_{cr} . [E]

Para o caso do *Robot Structural Analysis*, e relativamente à análise à encurvadura lateral (bambeamento), nos casos em que existem travamentos intermédios dos banzos superior e/ou inferior, só se justifica a utilização deste módulo em situações excepcionais, já que se considera o Módulo B mais simples e muito eficiente.

2.7.4 Resistência do elemento à encurvadura lateral

Todas as abordagens utilizam para quantificação do momento crítico para a encurvadura lateral (M_{cr}) a expressão (2.1) anteriormente apresentada na secção 2.4 deste capítulo.

2.7.4.1 *Robot Structural Analysis*

O *Robot Structural Analysis* promove uma interpretação correta da geometria dos modelos ao quantificar autonomamente todos os parâmetros de forma bastante aproximada à solução construída analiticamente. Esta eficácia torna-se possível através de um intuitivo conjunto de interfaces de definição das condições de apoio e de solicitação do sistema estrutural,

especialmente concebidos para a definição de parâmetros destinados à verificação à encurvadura lateral (Figura 2.30).

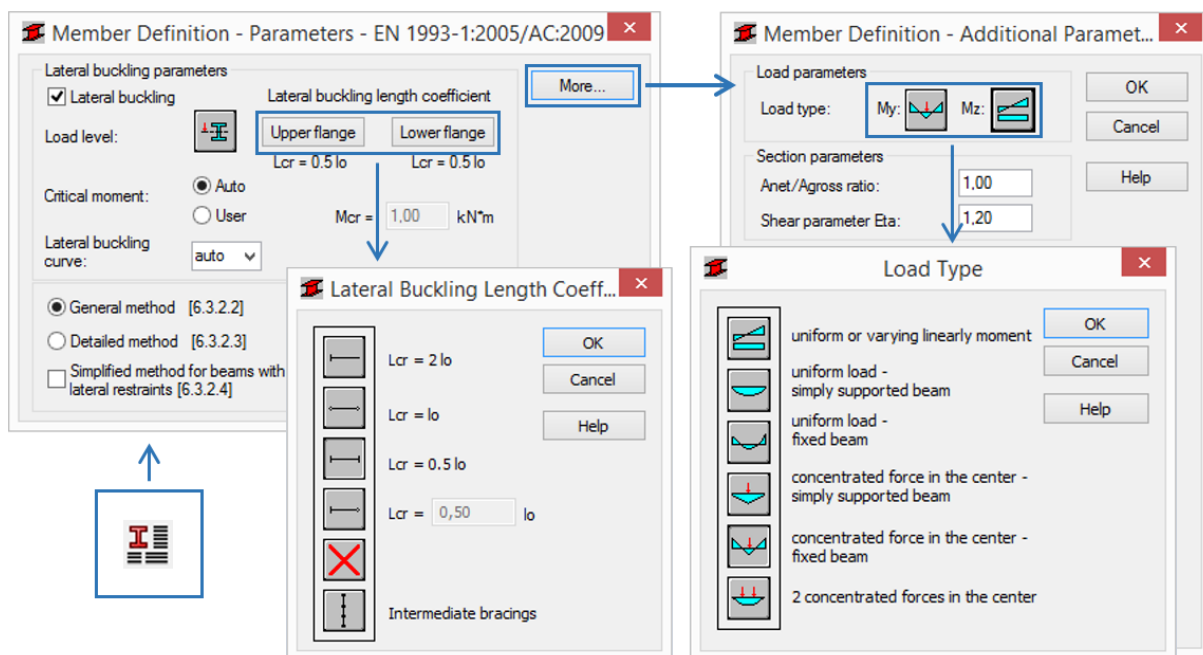


Figura 2.30 – Definição do modelo para verificação à encurvadura lateral – *Robot Structural Analysis*.

[F] Ao valor de k_w o *Robot Structural Analysis* atribuí por defeito o valor 1,0, decisão conservativa que se considera adequada, embora se entenda constituir uma limitação que traz problemas para os casos em que se considera garantida a restrição ao empenamento nas extremidades ($k_w \neq 1,0$). [F]

2.7.4.2 CYPE 3D

O *CYPE 3D* é capaz de produzir resultados satisfatórios num considerável, ainda que limitado, conjunto de situações.

[G] O programa não é capaz de quantificar de forma autónoma os valores dos coeficientes que têm em conta a distribuição de momentos (C_1 , C_2 e C_3). O *software* solicita a introdução pelo utilizador do valor do coeficiente C_1 , não aceitando valores inferiores a 1,0 para este coeficiente, e assume por defeito o valor 1,0 para os coeficientes C_2 e C_3 que não são alteráveis.

Por consideração da expressão (2.1) entende-se que o problema de quantificação dos coeficientes C_2 e C_3 é anulado, não resultando em qualquer incorreção, quando os parâmetros z_g e z_j são nulos, já que nesse caso se anulam as parcelas $C_2 \cdot z_g$ e $C_3 \cdot z_j$.

Embora o *software* seja capaz de ter em conta o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y , isto é, quantificar o parâmetro z_j , resultados desadequados serão em regra

produzidos quando z_j for diferente de zero, já que, nesse caso, na Equação (2.1), o parâmetro z_j deixará de anular a parcela $C_3 \cdot z_j$.

O *software* não possibilita a definição da posição de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal (consultar estudo de avaliação da consideração do parâmetro z_g pelos *softwares* na secção 2.7.5 deste capítulo), o que significa que para o parâmetro z_g será considerado o valor nulo em todas as situações.

Conclui-se que o *CYPE 3D* será capaz de produzir resultados satisfatórios relativamente à verificação à encurvadura lateral, especialmente no que diz respeito à quantificação do momento crítico (M_{cr}), para os casos em que a carga é aplicada ao nível do centro de corte da secção transversal ($z_g = 0$) e que a secção é duplamente simétrica ($z_j = 0$). [E]

[H] Ainda neste contexto, especial atenção deve ser dada ao parâmetro k_w . Recomendações indicam que para este deve ser considerado de forma conservativa o valor 1.0 (o equivalente a assumir que não existem restrições ao empenamento nas extremidades), no entanto o *CYPE 3D* assume para este parâmetro o mesmo valor que for atribuído a k_z em cada caso, não sendo possível alterá-lo. A definição do valor de k_w produz alterações significativas no valor do momento crítico (M_{cr}) usado para quantificar o coeficiente de redução à encurvadura lateral (χ_{LT}), e consequentemente no valor final de cálculo do momento fletor resistente á encurvadura lateral ($M_{b,Rd}$). [H]

2.7.4.3 A3C Columns Calculator

[I] O *A3C Columns Calculator* foi capaz de definir os coeficientes C_1 e C_2 com sucesso. Não define, no entanto, um valor para o coeficiente C_3 . Este aspeto não é um problema dentro do campo de aplicação do *software*, cuja biblioteca de perfis transversais dispõe de apenas perfis em I e H, secções bissimétricas. O parâmetro z_j tomará sempre, portanto, o valor zero anulando a parcela $C_3 \cdot z_j$ na expressão (2.1). [I]

[J] Diferenças nos valores dos parâmetros C_1 e C_2 , relativamente aos definidos nas outras abordagens, podem ser justificadas pelo facto de o programa utilizar uma versão diferente da norma regulamentar onde constam os quadros de definição dos referidos parâmetros. Neste aspeto o programa é coerente como o livro [6]. [J]

[K] O *A3C Columns Calculator* contempla campos destinados à escolha da posição do ponto de aplicação da carga em z . No entanto, assume sempre que a carga está aplicada ao nível da face superior da secção (consultar estudo de avaliação de consideração do parâmetro z_g pelo *software* – secção 2.7.6 deste capítulo). Esta consideração resulta num efeito desfavorável (ou seja, conservativo) para a maior parte dos casos correntes, provocando a diminuição do momento crítico (M_{cr}) e, consequentemente, do valor de cálculo do momento resistente à

encurvadura lateral ($M_{b,Rd}$). Por consideração da expressão (2.1) é possível concluir que este problema se anula quando o coeficiente $C_2 = 0$. [K]

Conclui-se portanto que o *A3C Columns Calculator* será capaz de produzir resultados satisfatórios relativamente à verificação à encurvadura lateral, especialmente no que diz respeito à quantificação do momento crítico (M_{cr}), para os casos em que a carga é aplicada ao nível do topo da secção transversal ($z_g = h / 2$) e que a secção (bissimétrica) consta na sua biblioteca de perfis.

2.7.5 Avaliação da capacidade de consideração do parâmetro z_g pelos programas

A consideração da posição de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal é importante no que diz respeito à avaliação da resistência à encurvadura lateral de elementos em aço. O posicionamento da carga poderá causar um efeito favorável ou desfavorável ao fenómeno, de acordo com o esquematizado na Figura 2.31.

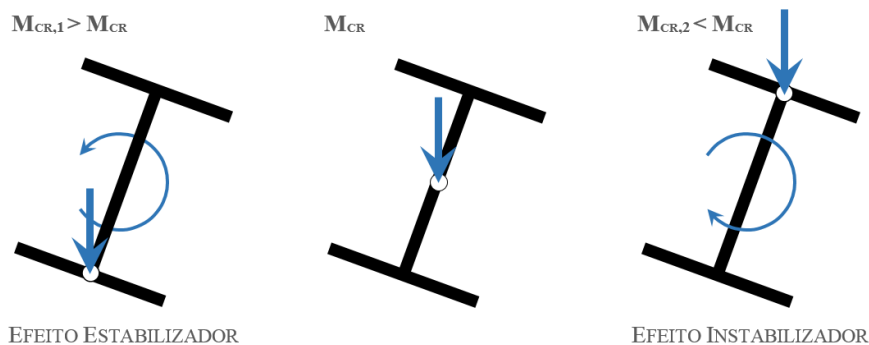


Figura 2.31 – Efeito da posição da carga no fenómeno de encurvadura lateral

No Modelo de Teste 1 é alterada a posição de aplicação da carga para a face inferior da secção transversal e posteriormente para a sua face superior, de forma a avaliar a capacidade do *software* ter em conta o efeito favorável e desfavorável, respetivamente, desta alteração (Quadro 2.19). O parâmetro z_g deve variar. O aumento do parâmetro z_g deve resultar no aumento do valor do momento crítico (M_{cr}) e conseqüente no aumento do valor de cálculo do momento resistente à encurvadura ($M_{b,Rd}$). A diminuição de z_g deverá causar o efeito contrário.

Quadro 2.19 – Avaliação da capacidade de consideração do parâmetro z_g pelo *software*.

	Solução Analítica			Robot Structural Analysis			CYPE 3D			A3C Columns Calculator		
Resistência à Encurvadura Lateral (NP EN 1993-1-1, 6.3.2)												
Posição da Carga	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo	Base	Centro	Topo
z_g (m)	-0,25	0	0,25	-0,25	0	0,25	-	0	-	-	-	0,25
M_{cr} (kN.m)	904,0	632,6	442,7	647,6	632,6	442,7	-	631,5	-	-	-	442,6
$M_{b,Rd}$ (kN.m)	387,6	340,0	282,4	293,2	340,0	282,4	-	339,7	-	-	-	282,6
Dimensionamento	IPE450	IPE500	IPE500	IPE450	IPE500	IPE500	-	IPE500	-	-	-	IPE500

O mesmo estudo foi conduzido para os casos dos restantes modelos de teste com resultados semelhantes.

A posição da carga em relação ao centro de corte da secção transversal mostra-se suficiente para condicionar a escolha do perfil ótimo.

O *Robot Structural Analysis* permitiu com sucesso alterar o ponto de aplicação da carga para coordenadas z_g positivas, fornecendo resultados muito satisfatórios. O mesmo não aconteceu ao alterar o ponto de aplicação da carga para coordenadas z_g negativas. A quantificação de z_g neste caso é correta mas o valor do momento crítico (M_{cr}) não é o esperado. Admite-se a hipótese de o *Robot Structural Analysis* estar a aplicar um coeficiente de redução sobre a ação favorável. Neste aspeto o *software* está sempre do lado da segurança.

O *CYPE 3D* não considera este fenómeno admitindo por defeito a carga sempre aplicada ao nível do centro de corte da secção transversal. Trata-se de uma limitação importante por não estar do lado da segurança nos casos em que a carga está aplicada em pontos com coordenada z_g positiva.

O *A3C Columns Calculator* contempla campos destinados à escolha da posição do ponto de aplicação da carga em z . No entanto, no cálculo final assume que a carga está sempre aplicada ao nível da face superior da secção. Assim, os resultados serão excessivamente conservativos sempre que a carga estiver aplicada a um nível que não o correspondente à face superior da secção transversal. ⁽¹⁾

(1) Na sequência deste trabalho o suporte do programa foi consultado e o problema foi corrigido.

2.7.6 Avaliação da capacidade de determinação do parâmetro z_j pelos programas

O parâmetro z_j tem em conta a assimetria da secção transversal, e tomará o valor zero se esta for simétrica em relação ao eixo y .

O *A3C Columns Calculator* é a única das ferramentas analisadas que não quantifica este valor. A biblioteca de perfis da ferramenta justifica este aspeto, uma vez que nela constam apenas perfis em I e H, secções bissimétricas.

2.7.7 Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão (NP EN 1993-1-1 [1], 6.3.3)

De acordo com a NP EN 1993-1-1 [1] os elementos solicitados à flexão composta com compressão deverão satisfazer as condições propostas nas expressões (2.6) e (2.7). A verificação pressupõe a determinação dos fatores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} . A NP EN 1993-1-1 [1] propõe dois métodos alternativos de determinação destes fatores nos Anexos A e B do mesmo documento. Os dois métodos são postos à prova para cada um dos modelos de teste apresentados neste capítulo,

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (2.7)$$

em que N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ são valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respetivamente, em relação aos eixos y e z ; $\Delta M_{y,Ed}$ e $\Delta M_{z,Ed}$ são momentos devidos ao deslocamento do eixo neutro para secções da Classe 4; χ_y e χ_z são coeficientes de redução para a encurvadura por flexão; χ_{LT} é o coeficiente de redução devido à encurvadura lateral.

[L] A dependência destes resultados do valor do coeficiente de redução devido à encurvadura lateral (χ_{LT}), que é diretamente dependente do valor do momento crítico (M_{cr}), faz com que todas as limitações associadas à verificação dos elementos à encurvadura lateral (secção 2.7.4) sejam transferidas também para este cálculo através deste coeficiente. [H]

2.7.7.1 Método alternativo 1 - Anexo A (NP EN 1993-1-1 [1])

Os programas e ferramentas testados revelaram-se bastante eficazes na aplicação dos procedimentos de cálculo relativos a estas verificações, sendo capazes de determinar de forma satisfatória todos os parâmetros envolvidos no cálculo.

[M] Os coeficientes $C_{my,0}$, $C_{mz,0}$ e C_{mLT} foram, nos casos abordados, determinados de forma autónoma e com sucesso pelo *Robot Structural Analysis* e *A3C Columns Calculator*. No *CYPE 3D* os valores devem ser determinados pelo utilizador e introduzidos nos campos destinados a esse efeito. Através deles o programa é então capaz de determinar os coeficientes C_{my} e C_{mz} . [M]

O *CYPE 3D*, além das fragilidades associados à determinação do valor de χ_{LT} , vê ainda em determinados casos os seus resultados alterados por problemas na classificação da secção transversal (secção 2.7.1 deste capítulo), como é o caso do Modelo de Teste 3.

2.7.7.2 Método alternativo 2 - Anexo B (NP EN 1993-1-1 [1])

O método alternativo 2 envolve um procedimento de cálculo mais simples com significativamente menos parâmetros envolvidos. Na maior parte dos casos abordados produziu resultados mais conservativos e menos consensuais entre as abordagens de cálculo adotadas do que o método referido em 2.7.7.1.

[N] O *CYPE 3D* não tem como opção a realização do cálculo utilizando o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação (Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1]). [N]

[O] Os programas e ferramentas forneceram em todos os testes valores diferentes para os coeficientes C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} de determinação dos fatores de interação. Os valores menos consensuais atribuídos a estes parâmetros tem influência direta sobre os valores dos coeficientes de interação k_{ij} e conseqüentemente sobre a verificação final de segurança à flexão composta com compressão. Considera-se mais eficaz o *A3C Columns Calculator* por ter produzido resultados mais próximos da solução analítica construída. [☹]

2.7.8 Perfil ótimo para a secção transversal

Apesar de diferenças significativas entre as abordagens serem encontradas em determinados parâmetros ao longo do processo de dimensionamento, verifica-se para os casos em estudo que as várias abordagens tendem a indicar como ótimo o mesmo perfil (Quadro 2.20).

Quadro 2.20 – Comparativo de soluções ótimas de dimensionamento das secções transversais.

	Solução Analítica	<i>Robot Structural Analysis</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C Columns Calculator</i>	Obs.
Modelo de Teste 1					
Método Alternativo 1	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	
Método Alternativo 2	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	IPE 500 OK	
Modelo de Teste 2					
Método Alternativo 1	IPE 330 OK	IPE 330 OK	IPE 300 ↓	-	[P]
Método Alternativo 2	IPE 330 OK	IPE 330 OK	-	-	
Modelo de Teste 3					
Método Alternativo 1	IPE 360 OK	IPE 360 OK	IPE 360 OK	IPE 360 OK	
Método Alternativo 2	IPE 360 OK	IPE 360 OK	-	IPE 360 OK	
Modelo de Teste 4					
Método Alternativo 1	IPE 400 OK	IPE 400 OK	IPE 400 OK	IPE 400 OK	
Método Alternativo 2	IPE 450 ↑	IPE 450 ↑	-	IPE 450 ↑	[Q]

[P] É importante notar que em situações limite estas diferenças podem facilmente significar a sugestão como ótimo de um perfil diferente, sendo no entanto muito improvável que a sugestão recaia sobre um perfil com dimensões não imediatamente inferiores ou superiores. [☹]

[Q] Os resultados fornecidos quando utilizado o método alternativo 2 de quantificação dos fatores de interação para verificação à flexão composta com compressão (Anexo B da NP EN 1993-1-1 [1]) são, na maior parte dos casos testados, mais conservativos e menos consensuais entre as abordagens adotadas. Mesmo assim, apenas para o caso do Modelo de Teste 4 o perfil indicado como ótimo foi diferente nos dois métodos (método alternativo 1 e método alternativo 2). [☹]

2.8 Guia resumo de limitações e campo de aplicabilidade do *software*

Um guia resumo de limitações e campo de aplicabilidade do *software* estudado é apresentado nos Quadros 2.21 a 2.23. A coluna “secção” remete para desenvolvimento sobre cada aspeto em secções anteriores deste capítulo. A coluna “norma” remete para disposições regulamentares dispostas para cada aspeto.

2.8.1 *Robot Structural Analysis*:

Quadro 2.21 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do *Robot Structural Analysis*.

Limitações do <i>software</i>	Norma	Secção
Consideração conservativa do valor k_w com o valor 1,0 sem possibilidade de ser feita alteração.	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.1 [F]
Quantificação dos parâmetros C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} contestável para o caso do método alternativo 2. Recomenda-se verificação destes parâmetros em cada cálculo.	Anexo B, NP EN 1993-1-1	2.7.7.2 [O]
Campo de aplicabilidade		
Qualquer situação.		

2.8.2 *CYPE 3D*

Quadro 2.22 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do *CYPE 3D*.

Limitações do <i>software</i>	Norma	Secção
A classificação da secção transversal não considera os raios de concordância entre a alma e os banzos.	(5.5.2), NP EN 1993-1-1	2.7.1 [C]
Utilização de uma fórmula simplificada conservativa para o cálculo da área resistente ao corte da secção transversal.	(6.2.6), NP EN 1993-1-1	2.7.2 [D]
Dificuldades na definição das condições de travamento lateral.	-	2.7.3 [E]
Incapacidade de definir autonomamente o coeficiente C_1 , que deve ser introduzido pelo utilizador.	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.2 [G]
Consideração dos coeficientes C_2 e C_3 com o valor 1,0 sem possibilidade de ser feita alteração.	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.2 [G]
Impossibilidade de consideração da carga aplicada a um nível que não o correspondente ao centro de corte da secção ($z_g = 0$).	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.2 [G]
Consideração do valor de k_w com o mesmo valor de k_z sem possibilidade de diferenciação entre os dois.	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.2 [H]

Incapacidade de definir automaticamente os coeficientes de momento uniforme equivalente (C_{my} , C_{mz} e C_{mLT}), que devem ser introduzidos pelo utilizador.	Anexo A, NP EN 1993-1-1	2.7.7.1 [M]
Não é incluída a opção de utilizar o método alternativo 2 para a quantificação dos fatores de interação.	Anexo B, NP EN 1993-1-1	2.7.7.2 [N]

Campo de aplicabilidade

Casos em que a carga é aplicada ao nível do centro de corte da secção transversal ($z_j = 0$) e que a secção é simétrica em relação ao eixo y ($z_j = 0$).

Casos em que k_w toma o mesmo valor que k_z .

2.8.3 A3C Columns Calculator:

Quadro 2.23 – Guia resumo de limitações e campo de aplicação do A3C Columns Calculator

Limitações do <i>software</i>	Norma	Secção
Capaz de produzir resultados apenas para um conjunto limitado de sistemas estruturais.	-	2.5.1
Não consideração do coeficiente C_3 .	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.3 [I]
Impossibilidade de consideração da carga aplicada a um nível que não o correspondente ao topo da secção transversal ($z_g = h / 2$) ⁽¹⁾	Anexo F, ENV1993-1-1	2.7.4.3 [K]
A quantificação dos parâmetros C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} pode ser discutível para o caso do método alternativo 2. Recomenda-se verificação destes parâmetros em cada cálculo.	Anexo B, NP EN 1993-1-1	2.7.7.2 [O]

Campo de aplicabilidade

Sistemas estruturais com geometria de acordo com a secção 2.6.1.1 deste capítulo.

Secções em I e H pré-definidas.

Casos em que a carga é aplicada ao nível do topo da secção transversal ($z_g = h/2$).⁽¹⁾

(1) Na sequência deste trabalho o suporte do programa foi consultado e o problema foi corrigido.

2.9 Notas conclusivas relativamente à avaliação da performance dos programas de cálculo analisados

O Quadro 2.24 classifica o desempenho dos programas testados através de um sistema de avaliação devidamente legendado, com especial enfoque na capacidade de o *software* quantificar os principais parâmetros relativos ao dimensionamento de vigas-coluna em aço de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1] e tendo por base a seguinte escala:

- 1 Efetua o cálculo autonomamente com sucesso e sem limitações.
- 2 O parâmetro é introduzido manualmente pelo utilizador.
- 3 A metodologia de cálculo está correta mas o parâmetro é suscetível de ser influenciado por outros que são definidos de forma discutível.
- 4 Em algumas situações efetua o cálculo de forma discutível.
- 5 Não efetua o cálculo.

Quadro 2.24 – Quadro de avaliação da performance do *software*.

	<i>Robot S.A.</i>	<i>CYPE 3D</i>	<i>A3C C.C.</i>
Versatilidade de sistemas estruturais	Versátil	Versátil	Limitado
Classificação da secção	● 1	● 4	● 1
Resistência da secção transversal			
Determinação de N_{cRd}	● 1	● 3	● 1
Determinação de V_{cRd}	● 1	● 4	● 1
Determinação de M_{cRd}	● 1	● 1	● 1
Resistência do elemento à encurvadura			
Determinação de comprimentos de encurvadura (l_{cr})	● 1	● 1	● 1
Determinação de $N_{b,Rd}$	● 1	● 3	● 1
Resistência do elemento à encurvadura lateral			
Determinação dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3	● 1	● 2	● 1
Capacidade de ter em conta a posição de aplicação da carga em z (z_g)	● 1	● 5	● 5
Capacidade de ter em conta o grau de assimetria da secção (z_j)	● 1	● 3	● 5
Capacidade de ter em conta as restrições nas secções de extremidade (k_z e k_w)	● 4	● 4	● 4
Determinação de M_{cr}	● 1	● 3	● 3
Determinação de M_{bRd}	● 1	● 3	● 3
Análise da estabilidade global do elemento			
Método alternativo 1			
Determinação de C_{my} , C_{mz} e C_{mLT}	● 1	● 2	● 1
Determinação dos fatores de iteração k_{ij}	● 1	● 3	● 3
Verificação das condições de segurança	● 1	● 3	● 3
Método alternativo 2			
Determinação de C_{my} , C_{mz} e C_{mLT}	● 4	● 5	● 4
Determinação dos fatores de iteração k_{ij}	● 3	● 5	● 3
Verificação das condições de segurança	● 3	● 5	● 3

Pode-se afirmar como conclusão que o *Robot Structural Analysis* é o *software* mais adequado no que diz respeito ao dimensionamento de vigas-coluna em aço de acordo com a norma NP EN 1993-1-1 [1]. Prima pela eficácia do processo de cálculo, pela versatilidade e pela forma intuitiva como dispõe as interfaces de modelação das condições de apoio e solicitação da estrutura.

Dentro de um limitado campo de aplicação, cada um dos outros programas e ferramentas de cálculo testados (*CYPE 3D* e *A3C Columns Calculator*) será capaz de alcançar resultados também satisfatórios. Para isso, será importante que o utilizador tenha presentes as limitações, pressupostos e especificidades de cada programa.

É essencial controlar e validar de forma sistemática os principais parâmetros devolvidos pelos programas, de modo a produzir resultados com segurança.

Reunidas estas condições, e atendendo ao aspeto mais importante, isto é, o resultado final do processo de verificação e dimensionamento, importa referir que as várias abordagens tendem a indicar como ótimo o mesmo perfil, o que por si só demonstra a eficiência dos programas de cálculo apresentados.

Ferramenta de Cálculo *AciariUM*

3.1 Enquadramento

O presente capítulo tem como objetivo apresentar a ferramenta de cálculo desenvolvida no contexto desta dissertação, definir a sua estrutura por forma esclarecer a organização dos seus conteúdos, e fornecer orientações para a sua utilização.

3.2 Apresentação da ferramenta *AciariUM*

A ferramenta *AciariUM* (Figura 3.1) foi desenvolvida como meio de análise de elementos em aço e de verificação expedita dos resultados recolhidos a partir de programas comerciais de análise estrutural. Permite ao utilizador um controlo total sobre os resultados, na medida em que todo o algoritmo e procedimento de cálculo relativo a cada parâmetro está constantemente disponível para consulta e edição.

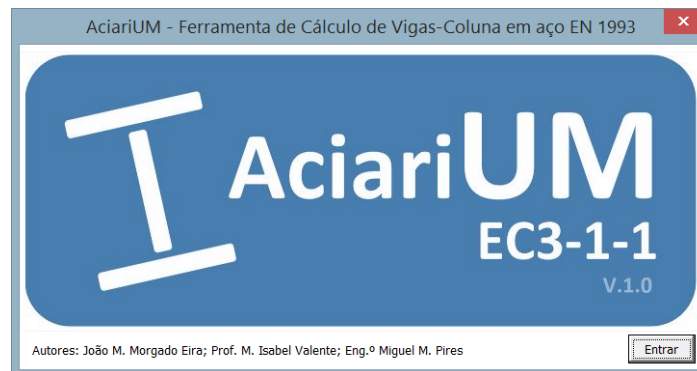


Figura 3.1 – Janela de apresentação com logótipo da ferramenta de cálculo *AciariUM*.

A ferramenta *AciariUM* é direcionada para a análise e dimensionamento de vigas-coluna em aço sujeitas a flexão composta desviada. Permite modelação das condições de apoio e solitação do elemento em aço, determinação de esforços, e realização de verificações relacionadas com a resistência da secção transversal e fenómenos de instabilidade. Estão abrangidas secções transversais em I e H monossimétricas e bissimétricas, perfis dos tipos laminado a quente e reconstituído soldado.

A ferramenta de cálculo é apresentada em formato de ficheiro do Office Excel 2013 com permissão para macros (ficheiro *.xslm*). O código em Visual Basic gere principalmente conteúdo gráfico e processos de otimização. A pasta “Conteúdo Gráfico” contém figuras que são chamadas pela ferramenta *AciariUM* em função das opções do seu algoritmo. O funcionamento correto da ferramenta implica que esta pasta esteja guardada na mesma pasta onde está guardado o referido ficheiro *.xslm*.

3.3 Estrutura global da ferramenta *AciariUM*

A ferramenta é apresentada ao utilizador dividida em diferentes interfaces/separadores que devem funcionar pela ordem em que são apresentados na Figura 3.2.

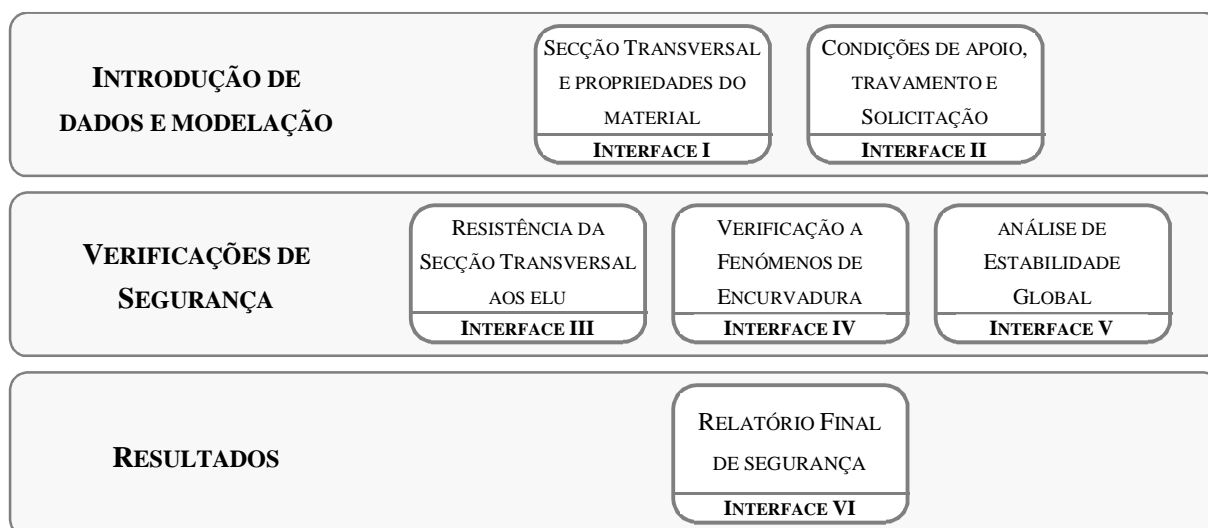


Figura 3.2 – Estrutura global da ferramenta *AciariUM*.

Cada interface/separador é dedicado a procedimentos específicos devidamente definidos:

- Interface I – Caracterização geométrica e mecânica da secção transversal, definição das propriedades do material e parâmetros gerais do cálculo;
- Interface II – Determinação/definição dos esforços de cálculo na secção a verificar e dos parâmetros que caracterizam a geometria do elemento em análise (comprimento, comprimentos de encurvadura e comprimentos entre secções lateralmente contraentadas);
- Interface III – Classificação e verificação da resistência da secção transversal aos estados limite últimos;
- Interface IV – Verificações de segurança à encurvadura (varejamento), encurvadura lateral (bambeamento) e encurvadura por esforço transversal (enfundamento);
- Interface V – Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão;
- Interface VI – Relatório final.

A navegação através dos Interfaces na ferramenta *AciariUM* faz-se selecionando o separador pretendido a partir da barra em rodapé (Figura 3.3).

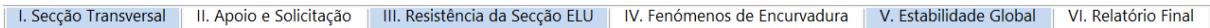


Figura 3.3 – Barra em rodapé para navegação através dos Interfaces da ferramenta *AciariUM*.

3.4 Estrutura interna de cada interface da ferramenta *AciariUM*

Os interfaces, de uma forma geral, partilham de uma estrutura interna comum, de acordo com o esquema na Figura 3.4.

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					E				
IPÉ	h	b _x	b _y	t _v	t _t	t _r	r _x	r _y	r _z	r _z	A	z _{CG}	y _{CG}	h ₁	d	cs _x	cs _y	I _y	W _{y,ref}	W _{y,pl}	W _{y,z}	I _y	A _{ref}	I _z	W _{z,ref}	W _{z,pl}	W _{z,z}	I _z	A _{ref}	I _x	I _y	I _z	I _x x 10 ⁹
f _y [MPa]	300	150	150	7	11	11	15	15	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356,1	557,1	557,1	628,4	12,5	25,7	603,7	80,5	80,5	125,2	3,3	34,0	20,1	125,9		0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE										CLASSE					
N _{Ed}	200,00	kN	V _{Ed,z}	6,27	kN	M _{Ed,y}	74,64	kN.m	V _{Ed,y}	5,00	kN	M _{Ed,z}	10,00	kN.m	1

A. TÍTULO DO CONJUNTO DE PROCEDIMENTOS (REFERÊNCIA NORMATIVA) **INFO?**

PARÂMETROS ALTERÁVEIS: 50,00 kN **OK** 60% [SIGNIFICA QUE ESTÃO VERIFICADAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA]

PARÂMETROS NÃO ALTERÁVEIS: 100,00 kN **KO** 120% [SIGNIFICA QUE NÃO ESTÃO VERIFICADAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA]

Notas com instruções e recomendações.

Júlio M. M. Eira, Prof. Isabel Vileta, Eng.º Miguel Pires, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, CASAIIS

Figura 3.4 – Representação esquemática da estrutura interna dos Interfaces da ferramenta *AciariUM*.

Em cabeçalho está fixa a grelha de definição da secção transversal e das correspondentes propriedades mecânicas, a identificação dos esforços na secção transversal a ser verificada e a respetiva classificação (com exceção dos interfaces anteriores aos procedimentos de definição destes parâmetros).

Os conteúdos restantes (conjuntos de procedimentos) são móveis (permitem *scroll down*). Aparecem abaixo agrupados de forma independente dos restantes

São alteráveis apenas os parâmetros destacados com letra de cor azul em fundo branco. As células não alteráveis estão bloqueadas para edição.

Notas com instruções e recomendações acompanham os campos de definição de cada parâmetro. Para que sejam exibidas bastará que seja selecionada a célula correspondente.

O ícone “*INFO*” tem como função fornecer ao utilizador informações ou instruções adicionais sobre a definição de parâmetros. Depois de pressionado o ícone, e nos casos em que ele tem ligação ativa, é aberta uma janela onde são comunicadas ao utilizador as instruções referidas.

É respeitado um constante procedimento de determinação da capacidade resistente da secção transversal e comparação com o valor do correspondente esforço atuante. Associado a cada verificação de segurança, individualmente, surge o ícone “*OK*” ou “*KO*” que sinaliza, respetivamente, o cumprimento ou não cumprimento desses requisitos, e o correspondente rácio

de eficiência ζ (ou E_f) que indica a percentagem da resistência que está a ser “utilizada” pelo efeito das ações correspondentes (Equação (3.1)).

$$E_d / R_d = \zeta \tag{3.1}$$

em que:

- E_d valor de cálculo do efeito da(s) ação/ações;
- R_d valor de cálculo da resistência correspondente.
- ζ rácio de eficiência em percentagem (%);

3.5 Interface I. Secção transversal e propriedades do material

O Interface I apresenta-se de acordo com a Figura 3.5 (ver em escala maior no Anexo A.1).

INTERFACE I. SECÇÃO TRANSVERSAL E PROPRIEDADES DO MATERIAL

MODULO DE CÁLCULO: COMERCIAL

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε								
IPE 300	h	b ₂	b ₁	t _w	t _f	t _s	r _s	r ₁	A	z _{CG}	y _{CG}	h ₁	d	cs ₂	cs ₁	I _y	W _{el,y}	W _{pl,y}	W _{pl,y}	I _z	W _{el,z}	W _{pl,z}	W _{pl,z}	I _z	W _{el,z}	W _{pl,z}	W _{pl,z}	I _t	I _x × 10 ⁻³	ε		
f _y [MPa]	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9			0,92

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
h	b ₂	b ₁	t _w	t _f	t _s	r _s	r ₁	A	z _{CG}	y _{CG}	h ₁	d	cs ₂	cs ₁		
IPE 300	Perfil Laminado	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,8	150,0	75,0	279	249	0,00	0,00

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA

ELEMENTO	L	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
NO.	L	m	h	b ₂	b ₁	t _w	t _f	t _s	r _s	r ₁	A	z _{CG}	y _{CG}	h ₁	d	cs ₂	cs ₁	
15	1,67	IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271,0	0,00	0,00

CLASSE DE AÇO AÇO DA CLASSE S275

PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL

E	210	GPa	α	1,20E-06	/K
G	80,77	GPa	G _m	7850	Kg/m ³
v	0,3		η	1,20	

COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

γ _{M0}	1,00
γ _{M1}	1,00
γ _{M2}	1,25

Figura 3.5 – Interface I. Secção transversal e parâmetros gerais do cálculo.

Este espaço é destinado à definição dos seguintes parâmetros:

- Tipo e geometria da secção transversal (ver 3.5.1);
- Propriedades do material (aço) e parâmetros gerais do cálculo (ver 3.5.2).

3.5.1 Tipo e geometria da secção transversal

A geometria da secção transversal é comunicada à ferramenta através da definição das suas dimensões principais, de acordo com o Quadro 3.1 que está em coerência com a Figura 3.6.

A ferramenta *AcariUM* considera as dimensões principais da secção transversal para determinar automaticamente dimensões complementares e propriedades mecânicas da secção transversal de acordo com o Quadro 3.2.

Quadro 3.1 – Dimensões principais da secção transversal definidas pelo utilizador na *AciariUM*.

Símbolo	Designação
h	altura;
b_s	largura do banzo superior;
b_i	largura do banzo inferior;
t_w	espessura da alma;
t_s	espessura do banzo superior;
t_i	espessura do banzo inferior;
r_s	raio de concordância entre a alma e o banzo superior;
r_i	raio de concordância entre a alma e o banzo inferior;
cs_s	espessura do cordão de soldadura que faz a ligação entre a alma e o banzo superior;
cs_i	espessura do cordão de soldadura que faz a ligação entre a alma e o banzo inferior.

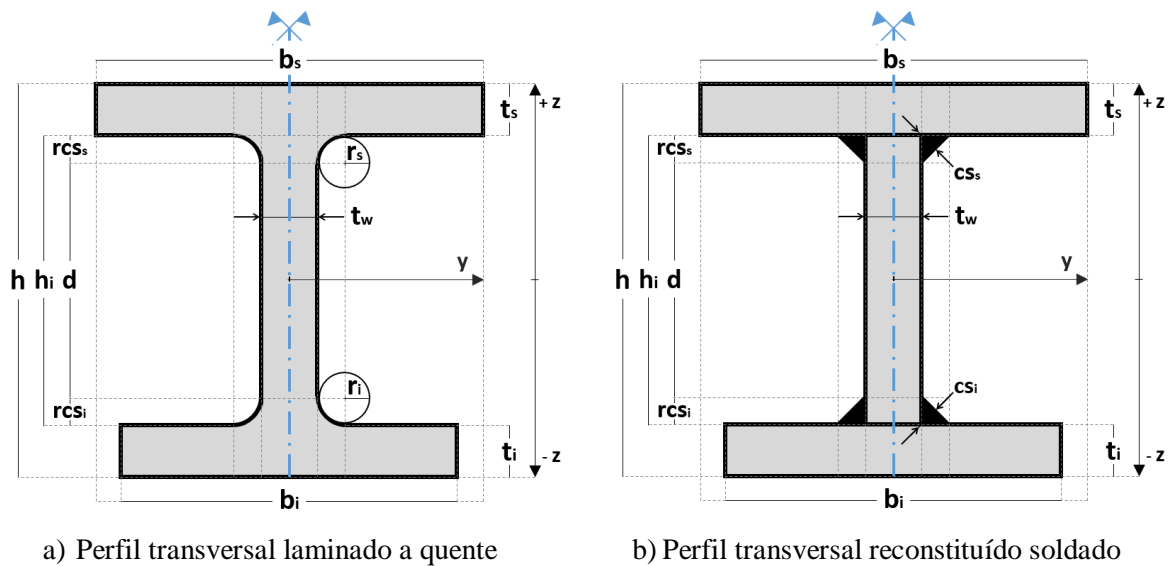
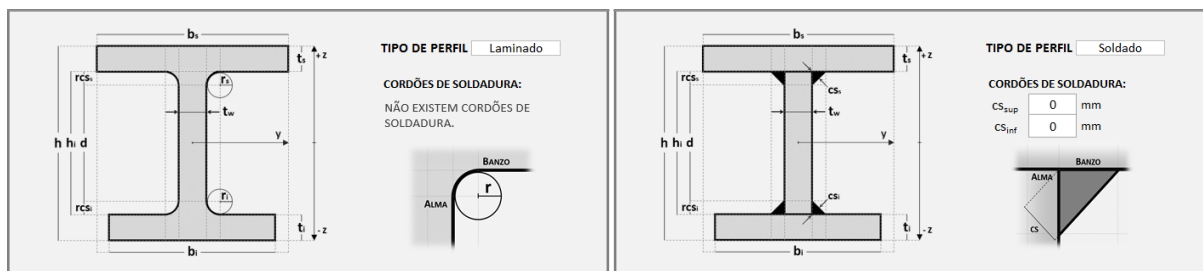


Figura 3.6 – Dimensões das secções transversais em I e H.

Quadro 3.2 – Dimensões complementares e propriedades mecânicas da secção transversal calculadas automaticamente pela ferramenta *AciariUM*.

Símbolo	Designação
h_i	altura da alma;
d	altura da parte reta da alma;
A	área;
z_{cg}	coordenada em z do centro de gravidade da secção transversal;
y_{cg}	coordenada em y do centro de gravidade da secção transversal;
I	momento de inércia em relação ao eixo considerado (y e z);
W	módulo de flexão elástico em relação ao eixo considerado (y e z);
W_{pl}	módulo de flexão plástico em relação ao eixo considerado (y e z);
A_v	área resistente ao esforço transversal na direção considerada (y e z);
I_T	constante de torção de St. Venant;
I_w	constante de empenamento.

O espaço do Interface I identificado na Figura 3.7 é informativo. Identifica o tipo de perfil transversal selecionado (perfil laminado a quente ou reconstituído soldado) e faz corresponder gráficamente os parâmetros a definir pelo utilizador às dimensões da secção transversal.






a) Perfil transversal laminado a quente

b) Perfil transversal reconstituído soldado

Figura 3.7 – Interface I (excerto). Informação relativa ao tipo e geometria do perfil transversal.

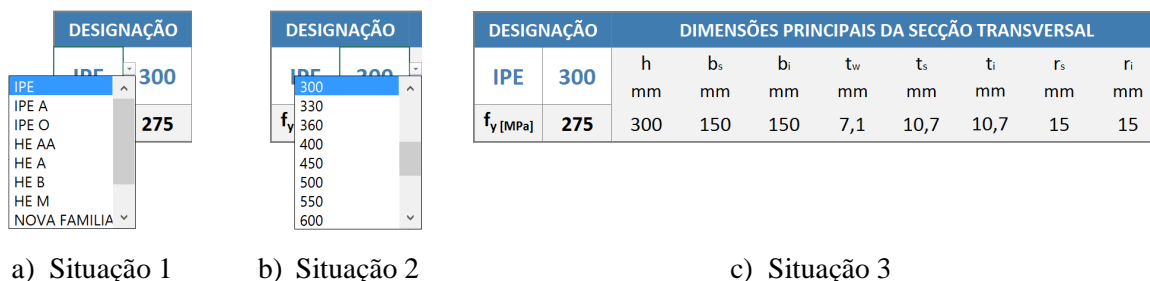
Estão disponíveis no Interface I três módulos de definição do tipo e geometria da secção transversal:

-  Módulo Comercial (3.5.2) – seleção de um perfil comercial a partir da base de dados;
-  Módulo Manual (3.5.3) – definidas manualmente as dimensões principais da secção;
-  Módulo Robot Structural Analysis (3.5.4) – as dimensões da secção transversal são recolhidas automaticamente a partir de um ficheiro do *Robot SA* aberto no computador.

3.5.2 Módulo Comercial de definição da geometria da secção transversal

A geometria da secção transversal é definida por seleção de um perfil comercial a partir de listas que estão disponíveis na base de dados na ferramenta *AciariUM*.

As listas surgem nas células do cabeçalho correspondentes ao campo “Designação”, de acordo com a Figura 3.8. Na base de dados estão depositados perfis laminados comerciais das famílias IPE, IPE A, IPE O, HE AA, HE A, HE B e HE M. É deixada em aberto a possibilidade de definição de novas famílias de perfis transversais.



a) Situação 1

b) Situação 2

c) Situação 3

Figura 3.8 – Módulo comercial de definição geométrica da secção transversal.

Para que este módulo esteja ativo basta que estejam desmarcadas as caixas de verificação correspondentes à ativação dos outros módulos.

3.5.3 Módulo Manual de definição da geometria da secção transversal

A geometria da secção transversal é definida comunicando manualmente à ferramenta de cálculo cada uma das dimensões principais da secção transversal.

O módulo ficará ativo se estiver marcada a caixa de verificação correspondente (Figura 3.9). O utilizador poderá atribuir um nome à secção definida.


 MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL INFO ?																		
	SECCÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
			h mm	b _s mm	b _i mm	tw mm	t _s mm	t _i mm	r _s mm	r _i mm	A cm ²	z _{CG} mm	y _{CG} mm	h _i mm	d mm	cs _s mm	cs _i mm	
-	-	IPE 300	Perfil Laminado	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,8	150,0	75,0	279	249	0,00	0,00

Figura 3.9 – Módulo manual de definição geométrica da secção.

A ferramenta gere automaticamente a informação relativa ao tipo de perfil escolhido, aos raios de concordância r e aos cordões de soldadura cs de acordo com o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Gestão automática da informação relativa ao tipo de perfil, aos raios de concordância r e aos cordões de soldadura cs pela ferramenta *AciariUM*.

Ação por parte do utilizador		Resposta por parte da <i>AciariUM</i>
Tipo de Perfil = Laminado	→	$cs = 0$
Tipo de Perfil = Soldado	→	$r = 0$
$r \neq 0$	→	Tipo de Perfil = Laminado; $cs = 0$
$cs \neq 0$	→	Tipo de Perfil = Soldado; $r = 0$

3.5.4 Módulo Robot Structural Analysis de definição da geometria da secção transversal

A geometria da secção transversal é recolhida automaticamente a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador.

O módulo ficará ativo se estiver marcada a caixa de verificação correspondente (Figura 3.10).


 MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA INFO ?																			
ELEMENTO	NO.	L m	SECCÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
					h mm	b _s mm	b _i mm	tw mm	t _s mm	t _i mm	r _s mm	r _i mm	A cm ²	z _{CG} mm	y _{CG} mm	h _i mm	d mm	cs _s mm	cs _i mm
15	1,67	IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271,0	0,00	0,00	

Figura 3.10 – Módulo Robot Structural Analysis de definição geométrica da secção.

Para que o módulo funcione é necessário que esteja um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador e que seja feito clique sobre o elemento que contem a secção a identificar para que este fique seleccionado (Figura 3.11).

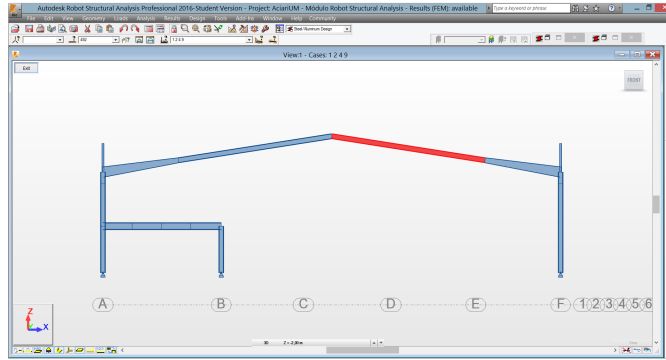


Figura 3.11 – Seleção do elemento destacado a vermelho no programa *Robot Structural Analysis*.

Depois de seleccionado o elemento, bastará abrir a ferramenta *AciariUM* e no separador “*Results Connect*”, na barra de ferramentas, pressionar o botão “*Calculate all*” (Figura 3.12).

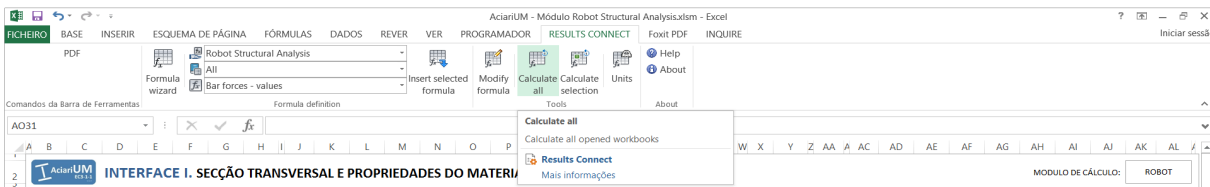


Figura 3.12 – Ativação do “*Results Connect*” para recolha automática das dimensões da secção transversal de um elemento selecionado num ficheiro do *Robot Structural Analysis*.

Depois de concluídos os referidos procedimentos a secção é automaticamente identificada. A ferramenta de cálculo recolhe, a partir do ficheiro do *Robot Structural Analysis* e nos campos destinados ao efeito, as dimensões principais da secção transversal de acordo com a Figura 3.10.

Não é possível definir no *Robot Structural Analysis* o tipo de perfil (laminado ou soldado) ou a espessura dos cordões de soldadura *cs* que fazem a ligação entre a alma e os banzos da secção transversal. Por este motivo a definição destes parâmetros na ferramenta *AciariUM* é manual e é feita uma gestão semelhante à referida no Quadro 3.3.

Estas mesmas instruções podem ser consultadas pelo utilizador na ferramenta *AciariUM* premindo o botão “*Info*” que abre a janela apresentada na Figura 3.13 (Passos 1 e 2).

Módulo Robot Structural Analysis

Função: Recolha automática das dimensões principais da secção transversal a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no Computador.

Passo 1 | Passo 2 |

Passo 1: Abrir um ficheiro do *Robot Structural Analysis* e clicar sobre o elemento a verificar para que fique selecionado.

Módulo Robot Structural Analysis

Função: Recolha automática das dimensões principais da secção transversal a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no Computador.

Passo 1 | Passo 2 |

Passo 2: No separador *Results Connect*, na barra de ferramentas da *Microsoft Excel*, pressionar o botão *Calculate all*.

Os parâmetros correspondentes à geometria da secção transversal são automaticamente identificados:

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - RECEBER PROPIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA																		
NO.	L	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT										DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
				h	b ₁	b ₂	t _{wp}	t _w	t _f	r ₁	r ₂	A	I _y	I _x	W _{pl,y}	W _{pl,x}	d	cs ₁
1	5,00	IPE 300	Perfil Laminado	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,8	150,0	75,0	279,6	248,6	0,00	0,00

Os campos com cor de letra azul em fundo branco devem ser definidos manualmente pelo utilizador.

Figura 3.13 – Instruções para utilização do Módulo Robot SA no Interface I da ferramenta *AciariUM*.

3.5.5 Propriedades do material e parâmetros gerais do cálculo

3.5.5.1 Classe de resistência do aço

A Classe de resistência do aço é definida no espaço do Interface I identificado na Figura 3.14.

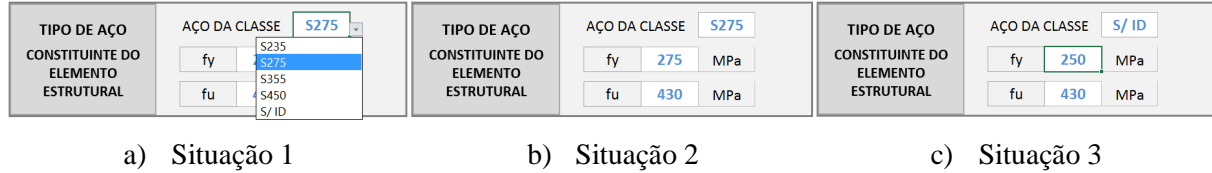


Figura 3.14 – Definição da Classe de resistência do aço e correspondentes valores de f_y e f_u .

A ferramenta tem na sua base de dados quatro Classes de aço para as quais define automaticamente os valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u de acordo com o Quadro 3.1 do regulamento NP EN 1993-1-1 [1] e o Quadro 3.4 deste documento. Os valores de f_y e f_u propostos pela ferramenta para cada Classe de aço são válidos para secções cujos componentes (alma e banzos) têm espessuras nominais t inferiores a 40mm.

Quadro 3.4 – Classes de resistência do aço na base de dados da ferramenta *AciariUM*.

Classe do Aço	Valor nominal de f_y (MPa)	Valor nominal de f_u (MPa)
S235	235	360
S275	275	430
S355	355	490
S450	440	550

As referidas Classes de aço podem ser selecionadas a partir da lista que surge na célula correspondente à sua definição (Figura 3.14 – Situação 1).

É possível a definição direta e de forma manual dos valores de f_y e f_u . São admissíveis quaisquer valores. Nesse caso o campo correspondente à definição da Classe do aço mostrará o texto “S/ ID” (Figura 3.14 – Situação 3).

3.5.5.2 Propriedades gerais do aço

As propriedades gerais do aço constituinte do elemento estrutural são definidas no espaço do Interface I identificado na Figura 3.15.

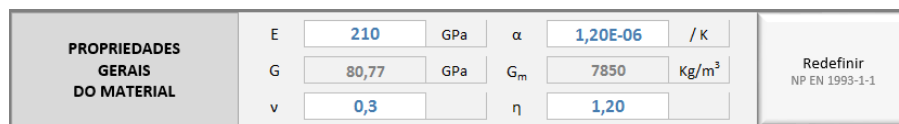


Figura 3.15 – Propriedades gerais do aço constituinte do elemento estrutural.

Na secção 3.2.6 da norma NP EN 1993-1-1 [1] são definidas as propriedades a adotar nos cálculos para o caso dos aços estruturais por ela abrangidos.

A ferramenta *AciariUM* permite a alteração livre destas propriedades. Os valores propostos pelo Eurocódigo 3 poderão ser repostos a qualquer altura clicando no botão “Redefinir” que abre a janela exibida na Figura 3.16.

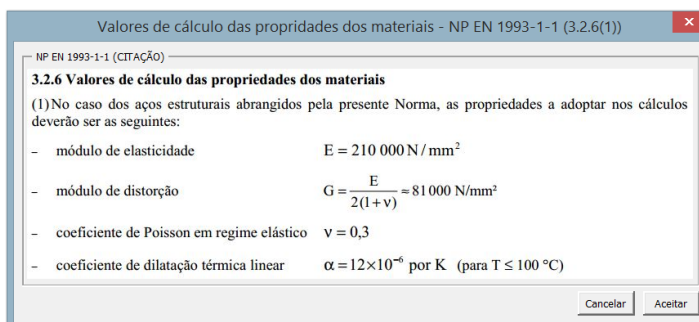


Figura 3.16 – Janela de reposição dos valores das propriedades do material.

O clique no botão “Aceitar” repõe, no espaço do Interface I identificado na Figura 3.15, as propriedades do aço estrutural propostas pela NP EN 1993-1-1 [1]. O clique no botão “Cancelar” fecha a janela sem que seja executada qualquer outra ação.

3.5.5.3 Coeficientes parciais de segurança

Os coeficientes parciais segurança são definidos no espaço do Interface I na Figura 3.17.

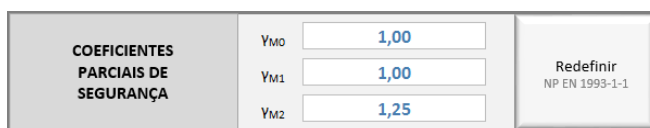


Figura 3.17 – Coeficientes parciais de segurança.

Os valores numéricos recomendados para os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} para edifícios são definidos de acordo com a secção 6.1(1) da NP EN 1993-1-1 [1].

A ferramenta *AciariUM* permite a alteração livre destes parâmetros. Os valores propostos pelo Eurocódigo 3 poderão ser repostos clicando no botão “Redefinir” que abre a janela exibida na Figura 3.18. Os botões “Aceitar” e “Cancelar” têm funções idênticas às descritas em 3.5.5.2.

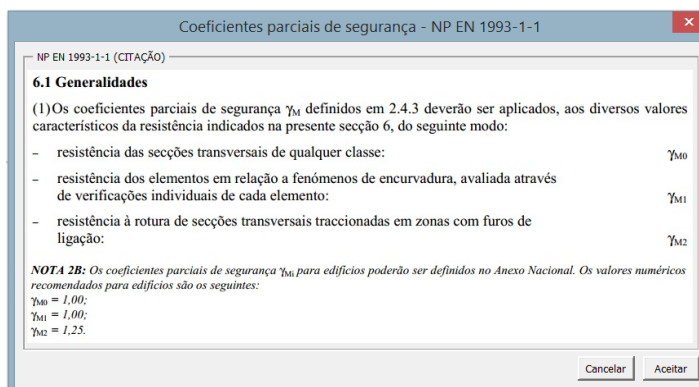


Figura 3.18 – Janela de reposição dos valores dos coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} .

3.6 Interface II. Condições de apoio, travamento e solitação do elemento

O Interface II apresenta-se de acordo com a Figura 3.19 (ver em escala maior no Anexo A.2).

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε							
IPÉ	h	b _s	b _i	t _w	t _r	t _i	r _s	r _i	A	z _{cg}	y _{cg}	h _i	d	cs _s	cs _i	I _y	W _{1,ye}	W _{1,yi}	W _{2,y}	I _y	A _{ye}	I _z	W _{1,ze}	W _{1,zi}	W _{2,z}	I _z	A _{ye}	I _t	I _x × 10 ²	ε
f _t [MPa]	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	
300	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92




Figura 3.19 – Interface II. Condições de apoio, travamento e solitação.

O Interface tem como função determinar ou identificar os esforços atuantes na secção em análise, e definir parâmetros que caracterizam a geometria do sistema estrutural (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 – Parâmetros definidos no Interface II. Esforços atuantes e parâmetros que caracterizam a geometria do sistema estrutural.

Símbolo	Designação
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal atuante (kN);
$M_{y,Ed}$	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo y (kN.m);
$V_{z,Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal atuante na direção z (kN);
$M_{z,Ed}$	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo z (kN.m);
$V_{y,Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal atuante na direção y (kN);
L	comprimento total do elemento viga-coluna (m);
$L_{cr,y}$	comprimento de encurvadura em torno do eixo y (m);
$L_{cr,z}$	comprimento de encurvadura em torno do eixo z (m);
$l_{z,sup}$	comprimento entre secções lateralmente contraentadas – banzo superior (m);
$l_{z,inf}$	comprimento entre secções lateralmente contraentadas – banzo inferior (m).

De acordo com a Figura 3.19 estão disponíveis no Interface II três módulos de definição dos referidos parâmetros:

-  Módulo Manual (3.6.1) – definidos manualmente pelo utilizador todos os parâmetros;
-  Módulo Robot Structural Analysis (3.6.2) – recolha automática de parâmetros a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador.
-  Módulo Automático de Pré-Dimensionamento (3.6.3) – modelação das condições de apoio, travamento e solitação do elemento estrutural para cálculo automático dos parâmetros pela ferramenta *AciariUM*.

A caixa de seleção à esquerda do título de cada módulo permite ativar o correspondente modo de cálculo. A caixa de verificação à direita (“*Ocultar / Mostrar*”) permite optar por ocultar ou mostrar os procedimentos relativos a cada módulo.

3.6.1 Módulo Manual de definição das condições de apoio, travamento e solicitação

No Módulo Manual o utilizador insere diretamente o valor final dos parâmetros a quantificar nos campos destinados ao efeito (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Interface II (excerto). Módulo Manual.

Este módulo é adequado para situações em que o utilizador conhece à partida os esforços de cálculo atuantes na secção condicionante. É exemplo deste tipo de situações o caso em que se pretende utilizar a ferramenta como meio de validação de resultados previamente obtidos a partir de software comercial de análise estrutural.

3.6.2 Módulo Robot Structural Analysis de recolha e definição das condições de apoio, travamento e solicitação

O Módulo Robot Structural Analysis (Figura 3.21) permite a recolha automática dos esforços atuantes na secção identificada (N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$, $V_{z,Ed}$ e $V_{y,Ed}$) a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador.

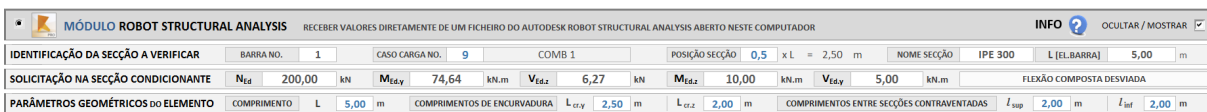


Figura 3.21 – Interface II (excerto). Módulo Robot Structural Analysis.

Cabe ao utilizador definir na ferramenta *AciariUM* o número do caso de carga que pretende considerar e a posição relativa da secção a verificar no elemento selecionado. O número dos casos de carga definidos no *Robot Structural Analysis* pode ser consultado na janela “Load Types” do programa, de acordo com a Figura 3.22. A posição relativa da secção transversal no elemento é definida de acordo com a Figura 3.23.

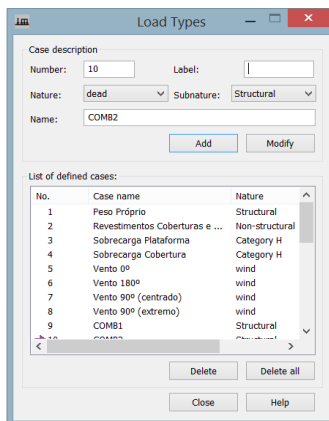


Figura 3.22 – Números dos casos de carga no *Robot Structural Analysis*.

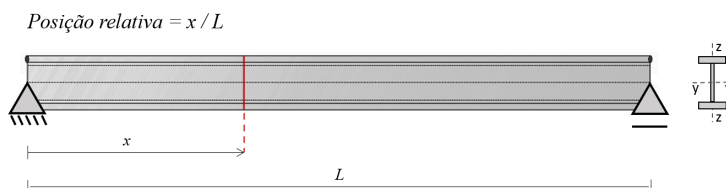


Figura 3.23 – Posição relativa da secção transversal a verificar no elemento selecionado.

O procedimento a realizar para recolha dos parâmetros é idêntico ao proposto na secção 3.5.4 deste documento, utilizando o *Results Connect*.

O comprimento total do elemento a verificar (L), os comprimentos de encurvadura ($L_{cr,y}$ e $L_{cr,z}$) e os comprimentos entre secções lateralmente contraventadas dos banzos superior e inferior ($l_{z,sup}$ e $l_{z,inf}$) são introduzidos manualmente pelo utilizador nos campos destinados ao efeito.

Estas mesmas instruções podem ser consultadas pelo utilizador na ferramenta *AciariUM* premindo o botão “Info” que abre a janela apresentada na Figura 3.24 (Passos 1, 2 e 3).

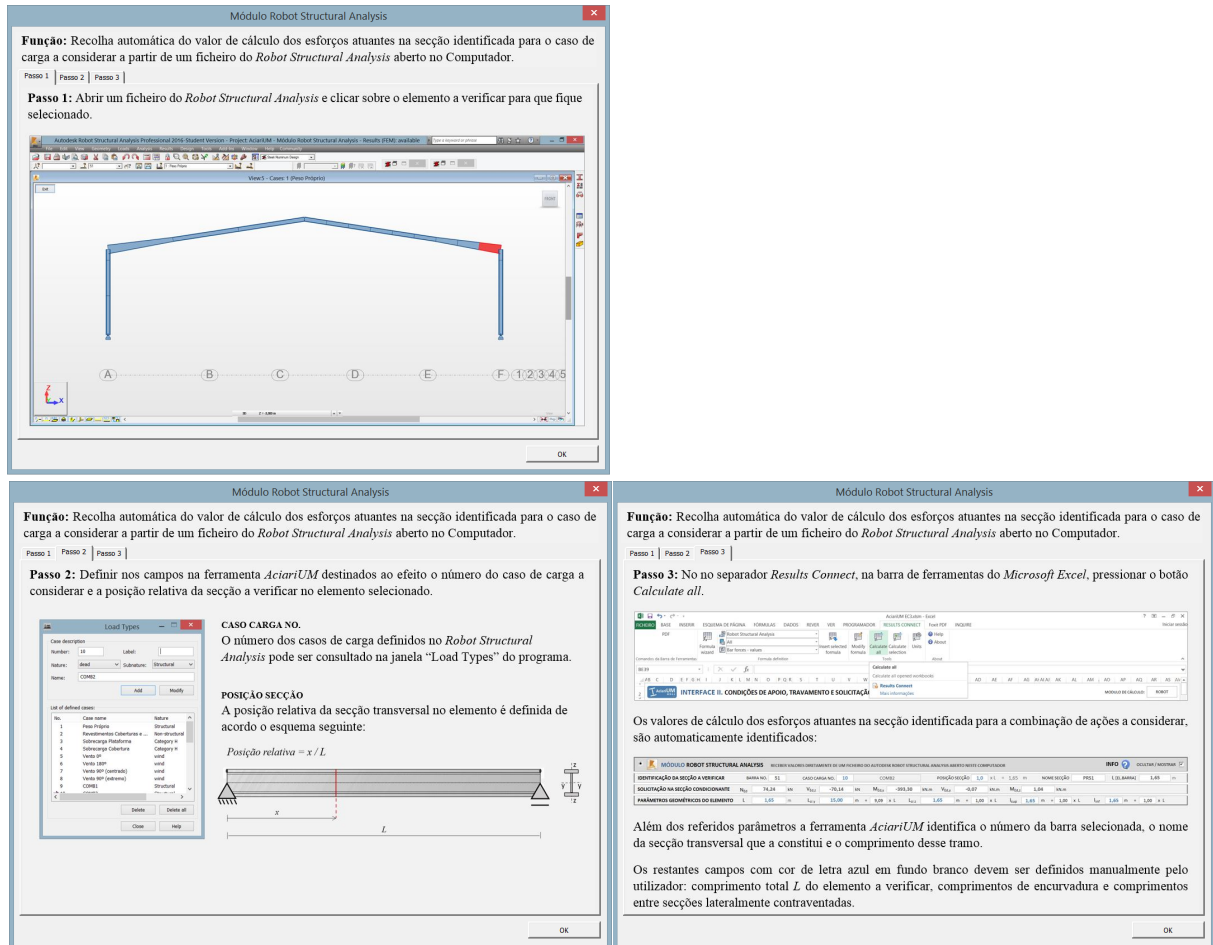


Figura 3.24 – Instruções para utilização do Módulo Robot SA no Interface II da ferramenta *AciariUM*.

3.6.3 Módulo Automático de Pré-Dimensionamento para modelação e determinação das condições de apoio, travamento e solicação

O Módulo Automático (Figura 3.25) é o mais indicado para pré-dimensionamento ou para situações em que se pretenda estimar resultados de forma rápida.

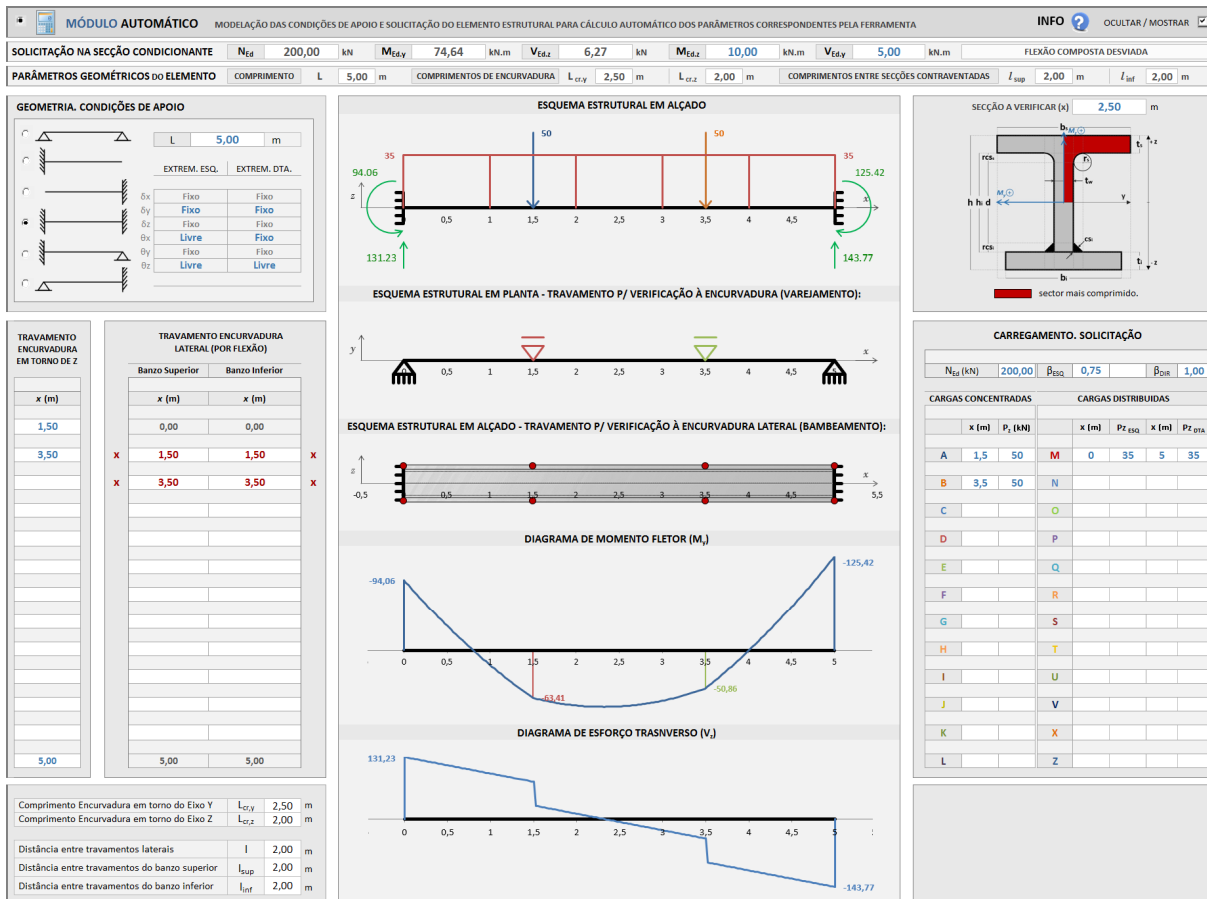


Figura 3.25 – Interface II (excerto). Módulo Automático de determinação das condições de apoio, travamento e solicitação.

Este espaço possibilita a modelação completa do sistema estrutural (condições de apoio e travamento) e correspondente solicitação, a partir da qual a ferramenta determina um conjunto de parâmetros.

Ao utilizador cabe definir:

- o comprimento total do elemento viga-coluna a analisar, L (ver 3.6.3.1);
- as condições de apoio nas extremidades do elemento (ver 3.6.3.1).
- a posição dos travamentos laterais para análise à encurvadura (varejamento) (ver 3.6.3.2).
- a posição dos travamentos laterais nos bantos superior e inferior para análise à encurvadura lateral (bambeamento) (ver 3.6.3.2).
- um conjunto de cargas verticais concentradas e distribuídas aplicadas na barra (ver 3.6.3.3).
- o valor do esforço axial N_{Ed} instalado (ver 3.6.3.3).
- a coordenada em x da secção/tramo a verificar (ver 3.6.3.5).

A ferramenta *AciariUM* parte desta informação para desenhar diagramas de momentos flectores $M_{y,Ed}$ e esforços transversos $V_{z,Ed}$, de acordo com 3.6.3.4, e devolver a informação identificada no Quadro 3.5.

O módulo automático interpreta a solicitação no elemento viga-coluna como um problema plano. Não estão, portanto, abrangidas situações em que se geram esforços de flexão em torno do eixo z . Nesses casos os valores de $M_{z,Ed}$ e $V_{y,Ed}$ poderão ser comunicado de forma manual pelo utilizador à ferramenta.

3.6.3.1 Definição das condições de apoio do sistema estrutural

As condições de apoio do elemento viga-coluna são definidas no plano xz (alçado), selecionando a partir de um conjunto de sistemas bem definidos aquele que melhor as traduz (Figura 3.26).

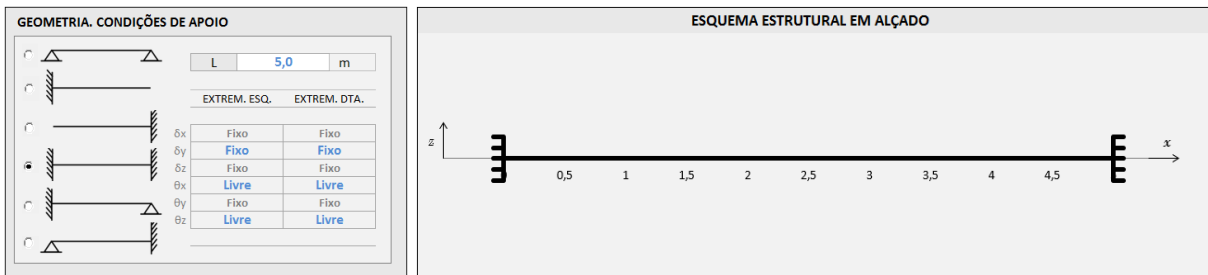


Figura 3.26 – Interface II (excerto). Definição das condições de apoio do sistema estrutural. Plano xz .

As translações horizontal (δ_x) e vertical (δ_z) no plano xz e a rotação θ_y são automaticamente classificadas como “fixas” ou “livres” para as duas extremidades depois de selecionado o esquema estrutural que melhor traduz as condições de apoio da barra.

A translação horizontal (δ_y) no plano yz e as rotações θ_x e θ_z devem receber a mesma classificação de forma manual pelo utilizador (a azul na Figura 3.26).

No plano yx (planta) as restrições definidas para as translações horizontal (δ_x) e vertical (δ_y) e para a rotação θ_z são utilizadas para que a ferramenta identifique, interprete e represente o esquema estrutural nesse plano, de acordo com a Figura 3.27. Nesta versão da ferramenta *AciariUM* a alteração das restrições referidas neste parágrafo não terá influência nos resultados, uma vez que os comprimentos de encurvadura em torno do eixo z se consideram iguais à distância entre secções lateralmente contraventadas.

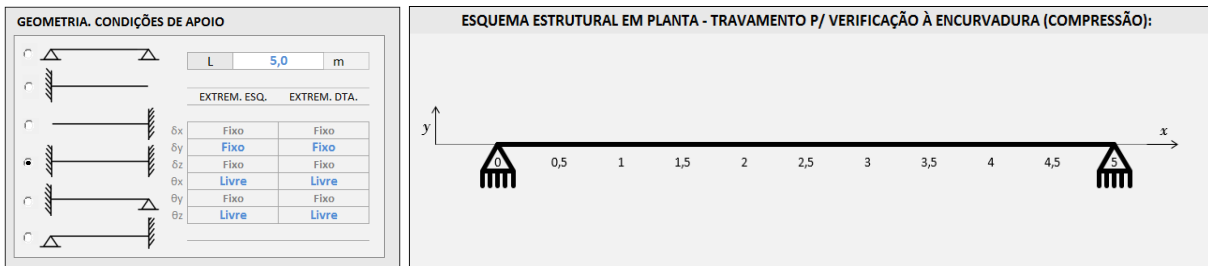


Figura 3.27 – Interface II (excerto). Definição das condições de apoio do sistema estrutural. Plano yx .

A informação relativa à rotação θ_x não é utilizada pela ferramenta.

3.6.3.2 Definição das condições de travamento do elemento viga-coluna

As condições de travamento do elemento viga-coluna são definidas individualmente para o que diz respeito às verificações à encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento), de acordo com a Figura 3.28. Para os dois casos o método baseia-se na definição das coordenadas em x de um número limitado de travamentos que restringem apenas a translação em y . Devem obrigatoriamente ser inseridos por ordem crescente das coordenadas em x da sua posição. É possível definir até treze travamentos de cada tipo.

Estes travamentos são definidos de forma independente no banzo superior e inferior para o que diz respeito às verificações à encurvadura lateral (bambeamento).

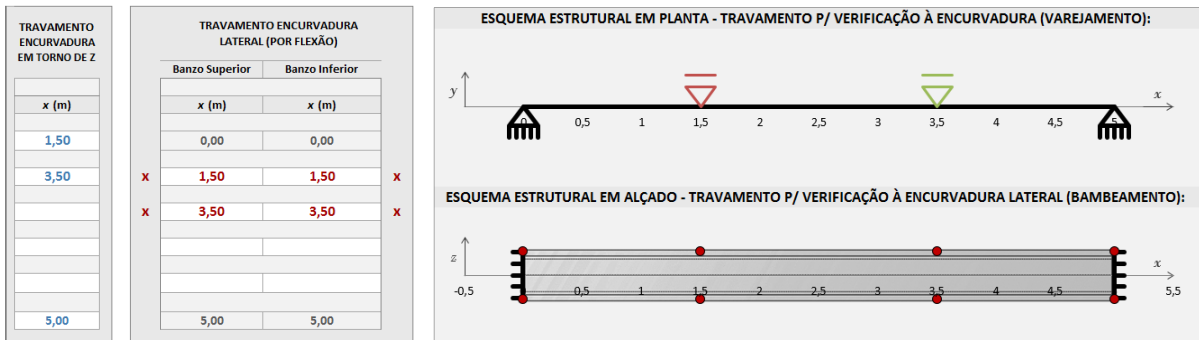


Figura 3.28 – Interface II (excerto). Definição das condições de travamento do elemento viga-coluna para verificação à encurvadura (varejamento) e encurvadura lateral (bambeamento).

As condições de apoio e travamento lateral são o ponto de partida para a determinação automática de comprimentos de encurvadura e comprimentos entre secções lateralmente contraventadas.

3.6.3.3 Definição das condições de carregamento

As condições de carregamento do sistema estrutural são traduzidas por definição de um conjunto de cargas concentradas e distribuídas aplicadas no elemento viga-coluna e do valor de cálculo do esforço normal atuante N_{Ed} . O conjunto de cargas verticais é definido em z , na direção normal à barra. As cargas distribuídas podem ser retangulares, triangulares ou trapezoidais. O carregamento é definido pela coordenada em x (m) do seu ponto de aplicação e pela sua intensidade (em kN), na grelha apresentada na Figura 3.29.

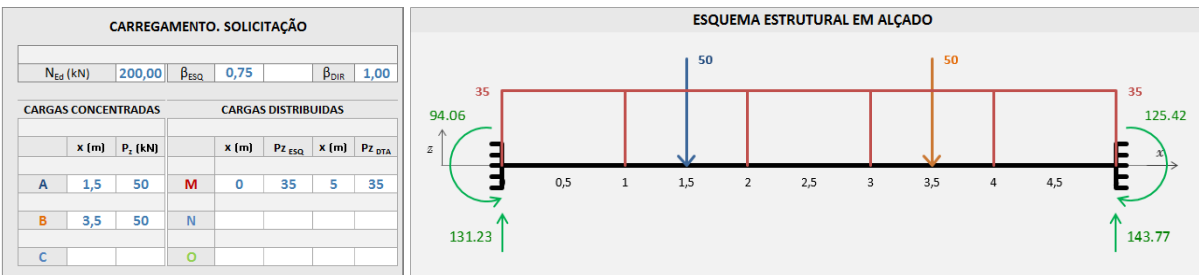


Figura 3.29 – Interface II (excerto). Grelha de definição das condições de carregamento.

Os parâmetros β_{ESQ} e β_{DIR} são fatores de redistribuição do momento fletor por forma a ter em conta alguma capacidade de rotação permitida por encastramentos não perfeitos ou ligações de continuidade nas extremidades esquerda e direita, respetivamente, da barra.

3.6.3.4 Cálculo e esboço dos diagramas de esforços

Para cada carga definida ao nível do elemento viga-coluna a ferramenta calcula as forças de reação que resultam nos apoios e os esforços de corte e de flexão que surgem em cada ponto ao longo do desenvolvimento da barra.

Os valores finais das reações nos apoios são incluídos no esquema de cargas apresentado de acordo com a Figura 3.25.

Os diagramas de esforços transversos e momentos fletores são obtidos por sobreposição dos efeitos de cada carga, e são automaticamente esboçados da forma que se ilustra na Figura 3.30.

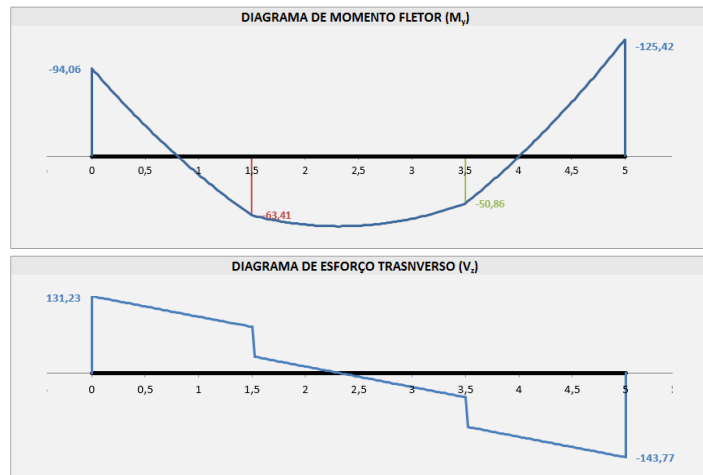


Figura 3.30 – Interface II (excerto). Diagramas de esforços.

3.6.3.5 Recolha de resultados

Terminada a modelação das condições de apoio, travamento e solitação do elemento estrutural, cabe ao utilizador identificar a coordenada em x (no elemento) da secção que pretende verificar para obter resultados.

A ferramenta exhibe, para a secção transversal identificada, o esquema onde identifica os setores mais comprimidos dessa secção (Figura 3.31).

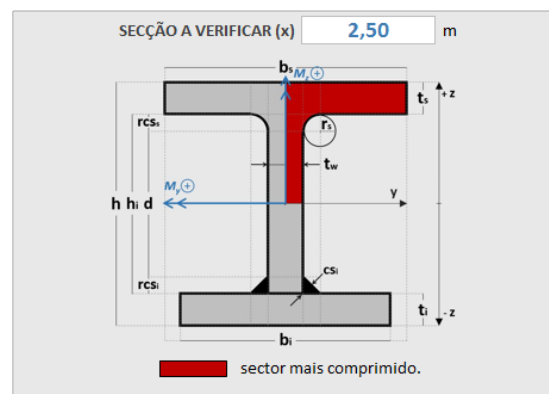


Figura 3.31 – Interface II (excerto). Identificação dos setores mais comprimidos da secção a verificar.

Finalmente, a *AciariUM* filtra e devolve, para a secção identificada e correspondente tramo do elemento de barra, a informação identificada no Quadro 3.5. Embora este módulo não inclua o cálculo de esforços no plano xy , o valor de $V_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ podem ser comunicados de forma manual pelo utilizador à ferramenta.

3.7 Interface III. Resistência da secção transversal aos ELU

No Interface III (Figura 3.32) é classificada a secção transversal e verificada a sua resistência aos estados limite últimos. Não é solicitada a intervenção por parte do utilizador neste interface. Nas secções 4.6 e 4.8 serão apresentados com mais detalhe os princípios relacionados com a classificação de secções transversais e verificação de estados limite últimos, respetivamente.

INTERFACE III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL [ELU]															SECÇÃO BISSIMÉTRICA																
DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε							
IPE	h	b _y	b _z	t _w	t _z	t _y	r _s	r _i	A	z _{co}	y _{co}	h ₁	d	cs _x	cs _y	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl}	I _z	A _w	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl}	W _{tr}	I _z	A _w	I _t	I _x 10 ³	ε
f _y [MPa]	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	
300	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92	
SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE										N _{Ed}	200,00	kN	V _{Ed,z}	6,27	kN	M _{Ed,y}	74,64	kN.m	V _{Ed,y}	5,00	kN	M _{Ed,z}	10,00	kN.m	CLASSE		1				
CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO															A secção IPE300 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1.										CLASSE	1					

Figura 3.32 – Interface III (excerto). Grelha de cabeçalho e classificação da secção transversal.

O interface gere automaticamente os conteúdos (ou conjuntos de procedimentos) que exhibe. Distinguem-se os conjuntos de procedimentos A a H definidos no Quadro 3.6. Surgem no Interface III da ferramenta *AciariUM* pela mesma ordem que aqui são referidos.

Quadro 3.6 – Conjuntos de conteúdos/procedimentos no Interface III.

Ref ^a	Designação	Cálculo ⁽¹⁾
A	Verificação da resistência da secção transversal a esforços simples.	4.8.1 a 4.8.4
B	Avaliação da necessidade de consideração do efeito do esforço transversal no cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.	4.8.5
C	Interações [M + V]: cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com o esforço transversal.	4.8.5
D	Interações [M + N + V]: cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com os esforços axial e transversal, para o caso de secções transversais bissimétricas das Classes 1 ou 2.	4.8.6
E	Interação [M _y + M _z + N + V]: verificação à flexão composta desviada, para o caso de secções transversais bissimétricas das Classes 1 ou 2.	4.8.7.1
F	Interação [M _y + M _z + N + V]: verificação à flexão composta desviada, para o caso de secções transversais monossimétricas das Classes 1 ou 2.	4.8.7.2
G	Interação [M _y + M _z + N + V]: verificação à flexão composta desviada, para o caso de secções transversais da Classe 3	4.8.7.3
H	Interação [M _y + M _z + N + V]: verificação à flexão composta desviada, para o caso de secções transversais da Classe 4.	4.8.7.4

(1) secção deste documento onde constam a metodologia e as expressões usadas para efeitos de cálculo no referido procedimento.

A gestão dos conteúdos exibidos é feita pelo Interface III em função da Classe da secção transversal, de acordo com o definido no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Gestão dos conteúdos/procedimentos do Interface III em função da Classe da secção.

Classe da Secção Transversal	Procedimentos	Consultar
Secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2	A; B; C; D; E	3.7.2
Secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2	A; B; C; F	3.7.3
Secção transversal da Classe 3	A; B; C; G	3.7.4
Secção transversal da Classe 4	A; B; C; H	3.7.5

3.7.1 Classificação da secção transversal

O cálculo relativamente á classificação da secção transversal é ocultado por defeito. O clique na caixa de verificação correspondente permite que ele seja exibido para consulta (Figura 3.33).

The screenshot displays the classification process for a section under composite bending. It is divided into two main parts: one for bending around the Y-axis and another for bending around the Z-axis. Each part includes a table for the top flange (BANZO SUPERIOR) and bottom flange (BANZO INFERIOR), detailing parameters like width (b), thickness (t), radius (r), and distance from the neutral axis (c). It also includes a table for the web (ALMA) classification, showing the web thickness (d) and distance from the neutral axis (t). The interface shows the section is classified as Class 1 for both axes.

Figura 3.33 – Interface III (excerto). Cálculo relativo á classificação da secção transversal.

3.7.2 Interface III para o caso de uma secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2

No caso de uma secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2 o Interface III exhibe os conjuntos de procedimentos A, B, C, D e E, de acordo com a Figura 3.34 (ver Anexo A.3.1).

The screenshot shows the resistance data for a section. It starts with a table of main dimensions (IPE 300) and complementary dimensions (A, OG). This is followed by a table of principal moments of inertia (EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y and Z). Below that is a table for the conditioning section load (SOLICITAÇÃO NA SEÇÃO CONDICIONANTE). The main part of the screenshot is a table for the resistance of the section to simple stresses (RESISTÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES), which lists various stress types (Traction, Compression, Bending Moment, etc.) and their corresponding resistance values and utilization percentages.

Figura 3.34 a – Interface III. Secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2 (Parte 1).

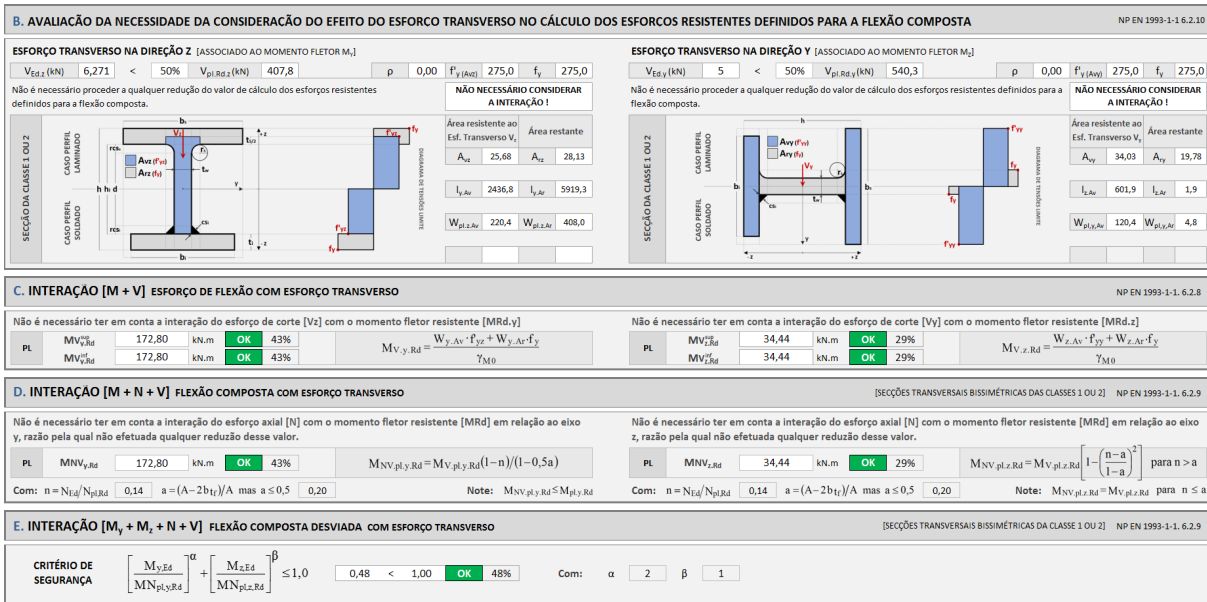


Figura 3.34 b – Interface III. Secção transversal bissimétrica da Classe 1 ou 2 (Parte 2).

3.7.3 Interface III para o caso de secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2

No caso de uma secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2 o Interface III exhibe os conjuntos de procedimento A, B, C e F, de acordo com a Figura 3.35 (ver Anexo A.3.2).

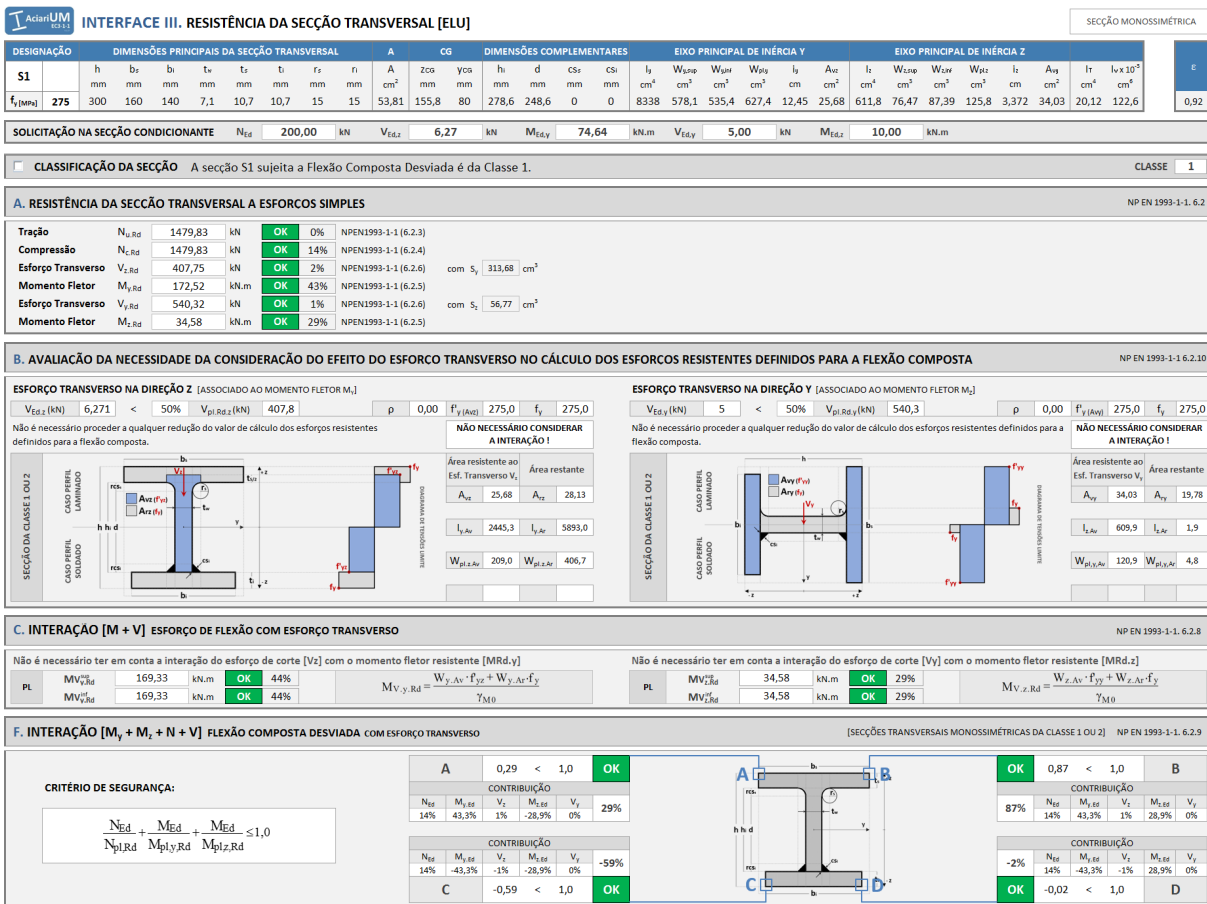


Figura 3.35 – Interface III. Secção transversal monossimétrica da Classe 1 ou 2.

3.7.4 Interface III para o caso de uma secção transversal da Classe 3

No caso de uma secção transversal da Classe 3 o Interface III exhibe os procedimentos A, B, C e G, de acordo com a Figura 3.36 (ver Anexo A.3.3).

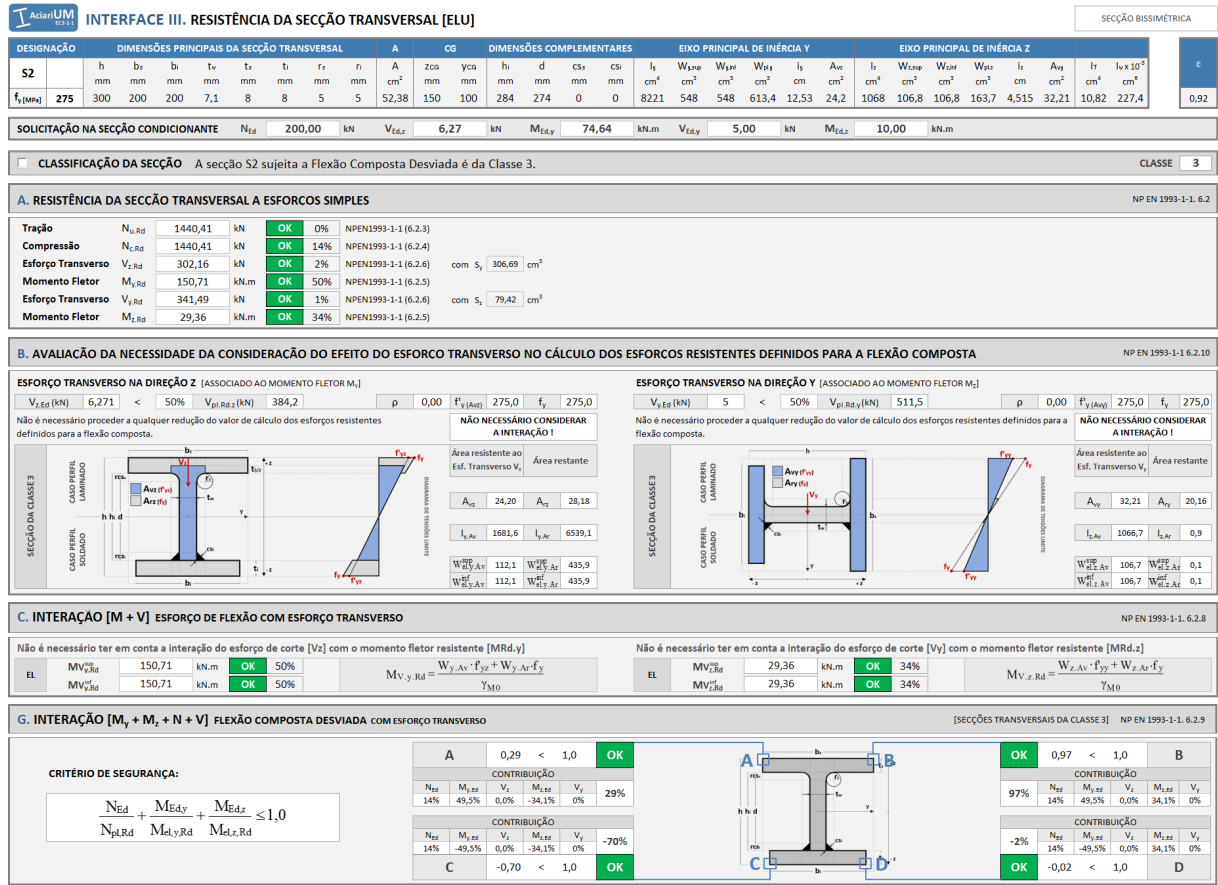


Figura 3.36 – Interface III. Secção transversal da Classe 3.

3.7.5 Interface III para o caso de uma secção transversal da Classe 4

No caso de uma secção transversal da Classe 4 o Interface III exhibe os procedimentos A, B, C e H, de acordo com a Figura 3.37 (ver Anexo A.3.4).

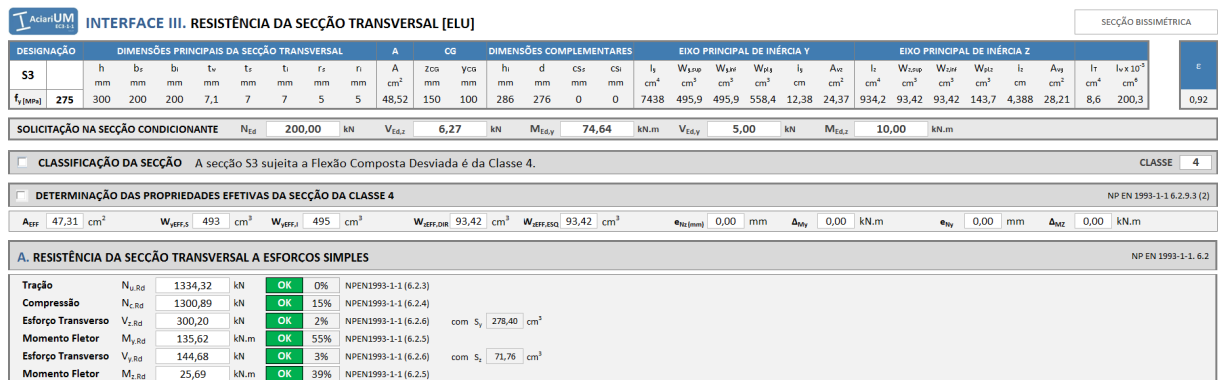


Figura 3.37 a – Interface III. Secção transversal da Classe 4 (Parte 1).

B. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA NP EN 1993-1-1:6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_z]

$V_{Ed,z}$ (kN) 6,271 < 50% $V_{pl,Rd,z}$ (kN) 386,9 ρ 0,00 $F_{y,Ed,z}$ 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso $V_{Ed,z}$ Área restante

A_{wz}	21,72	A_{wz}	26,69
$I_{p,z}$	1678,2	$I_{p,z}$	5735,8
$W_{eff,z,As}$	111,6	$W_{eff,z,As}$	382
$W_{eff,z,At}$	112,1	$W_{eff,z,At}$	383,2

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_y]

$V_{Ed,y}$ (kN) 5 < 50% $V_{pl,Rd,y}$ (kN) 448 ρ 0,00 $F_{y,Ed,y}$ 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso $V_{Ed,y}$ Área restante

A_{wy}	28,00	A_{wy}	19,53
$I_{p,y}$	933,333	$I_{p,y}$	0,9
$W_{eff,y,As}$	93,3	$W_{eff,y,As}$	0,1
$W_{eff,y,At}$	93,3	$W_{eff,y,At}$	0,1

C. INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO NP EN 1993-1-1:6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_z] com o momento fletor resistente [MR_{d,y}]

EFF	$MV_{y,Rd}$	135,62	kN.m	OK	55%
	$MV_{z,Rd}$	136,23	kN.m	OK	55%

$MV_{y,Rd} = \frac{W_{y,As} \cdot F_{y,z} + W_{y,At} \cdot F_{y,z}}{\gamma_{M10}}$

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_y] com o momento fletor resistente [MR_{d,z}]

EFF	$MV_{z,Rd}$	25,69	kN.m	OK	39%
	$MV_{y,Rd}$	25,69	kN.m	OK	39%

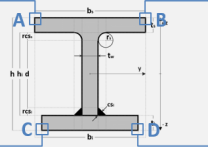
$MV_{z,Rd} = \frac{W_{z,As} \cdot F_{y,y} + W_{z,At} \cdot F_{y,y}}{\gamma_{M10}}$

H. INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS DA CLASSE 4] NP EN 1993-1-1:6.2.3

CRITÉRIO DE SEGURANÇA:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M10}} + \frac{M_{Ed,y} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{eff,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{eff,z,Rd}} \leq 1,0$$

	A	0,31 < 1,0	OK
CONTRIBUIÇÃO			
N_{Ed}	15%	55,0%	0,0%
M_{Ed}	15%	-38,9%	0%
V_z	15%	0,0%	0%
V_y	15%	0,0%	0%
CONTRIBUIÇÃO			
N_{Ed}	15%	-54,8%	0,0%
M_{Ed}	15%	0,0%	-38,9%
V_z	15%	0,0%	-38,9%
V_y	15%	0,0%	-38,9%
	C	-0,78 < 1,0	OK



	B	1,09 > 1,0	KO
CONTRIBUIÇÃO			
N_{Ed}	15%	55,0%	0,0%
M_{Ed}	15%	0,0%	38,9%
V_z	15%	0,0%	0%
V_y	15%	0,0%	0%
CONTRIBUIÇÃO			
N_{Ed}	15%	0,0%	-54,8%
M_{Ed}	15%	0,0%	-38,9%
V_z	15%	0,0%	-38,9%
V_y	15%	0,0%	-38,9%
	D	0,00 < 1,0	OK

Figura 3.37 b – Interface III. Secção transversal da Classe 4 (Parte 2).

Os cálculos relativos à determinação das propriedades efetivas de secções da Classe 4 são ocultados por defeito. O clique na caixa de verificação correspondente permite que sejam exibidos para consulta (Figura 3.38).

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES EFETIVAS DA SECÇÃO DA CLASSE 4 NP EN 1993-1-1:6.2.3.3 [2]

A_{eff} 47,31 cm² $W_{eff,y}$ 493 cm³ $W_{eff,z}$ 495 cm³ $W_{eff,yRd}$ 93,42 cm³ $W_{eff,zRd}$ 93,42 cm³ e_{My} (mm) 0,00 mm Δ_{My} 0,00 kN.m e_{Mz} (mm) 0,00 mm Δ_{Mz} 0,00 kN.m

A_{eff} **SECÇÃO SUBMETIDA A COMPRESSÃO UNIFORME**
 DETERMINAÇÃO DA ÁREA EFETIVA (A_{eff}) E DOS MOMENTOS SECUNDÁRIOS (Δ_{My} E Δ_{Mz}) RESULTANTES DAS EXCENTRICIDADES (e_{My} E e_{Mz}) ENTRE OS CENTROS DE GRAVIDADE DAS SECÇÕES EFETIVA E BRUTA.

SECÇÃO TOTAL		DET. DA ÁREA EFETIVA DOS ELEMENTOS DE PLACA COMPRIMIDOS QUE CONSTITUEM A SECÇÃO TRANSVERSAL NP EN 1993-1-5 (4.4)										SECÇÃO EFETIVA			
A (mm ²)	Z _{cg} (mm)	b (mm)	t (mm)	c	ψ	κ	λ _p	ρ	C _{eff} (mm)	b _{eff} (mm)	A _{eff} (mm ²)	Z _{cg} (mm)	ψ	A _{yz} (mm ²)	
48,52	150,00	200	7	91,45	1,00	0,43	0,759	> 0,748	0,991	90,65	198,4	47,31	150,00	1,00	26,58
41,22	150,00	200	7	91,45	1,00	0,43	0,759	> 0,748	0,991	90,65	198,4	20,72	20,72	0,00	0,00
ψ	1,00	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	Δ _{My} (mm)	Δ _{Mz} (mm)	Δ _{My} (kN.m)	Δ _{Mz} (kN.m)
E,N (mm)	-	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	0,00	0,00	0,00	0,00

W_{eff,y} **SECÇÃO SUBMETIDA A FLEXÃO SIMPLES EM TORNO DO EIXO Y**
 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE FLEXÃO DA SECÇÃO EFETIVA EM TORNO DO EIXO Y (W_{eff,y})

SECÇÃO TOTAL		DET. DA ÁREA EFETIVA DOS ELEMENTOS DE PLACA COMPRIMIDOS QUE CONSTITUEM A SECÇÃO TRANSVERSAL NP EN 1993-1-5 (4.4)										SECÇÃO EFETIVA		ESTADO DE TENSÃO		
A (mm ²)	Z _{cg} (mm)	b (mm)	t (mm)	c	ψ	κ	λ _p	ρ	C _{eff} (mm)	b _{eff} (mm)	A _{eff} (mm ²)	Z _{cg} (mm)	ψ	σ ₁ (MPa)	ψ _{TOTAL}	
48,5206	150	200	7	91,45	1,00	0,43	0,759	> 0,748	0,991	90,65	198,4	48,41	151,34	-1,00	151,34	-1,00
150,517	150,517	200	7	91,45	1,00	0,43	0,759	> 0,748	1,000	91,45	200	149,66	149,66	0,00	149,66	0,00
150,53	150,53	200	7	91,45	1,00	0,43	0,759	> 0,748	1,000	91,45	200	7414	7414	0,00	7414	0,00
ψ _{TOTAL}	-1,000	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,ALMA}</td> <td>ψ_{ALMA}</td> <td>σ_{1,ALMA}</td> <td>ψ_{ALMA}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,ALMA}	ψ _{ALMA}	σ _{1,ALMA}	ψ _{ALMA}	
150,0	150,0	276,0	7,1	1,000	23,88	0,303	≤ 0,874	1,000	0,949	262	131	138,26	-0,995	138,26	-0,995	
E,N (mm)	138,5	138	138	55,2	82,8	82,8	82,8	82,8	0,949	262	131	138,58	-0,995	138,58	-0,995	
σ _{1,ALMA}	-138	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>E,N (mm)</td> <td>149,66</td> <td>149,66</td> <td>149,66</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	E,N (mm)	149,66	149,66	149,66	
ψ _{ALMA}	-1	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>Δ_{My} (mm)</td> <td>Δ_{Mz} (mm)</td> <td>Δ_{My} (kN.m)</td> <td>Δ_{Mz} (kN.m)</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	Δ _{My} (mm)	Δ _{Mz} (mm)	Δ _{My} (kN.m)	Δ _{Mz} (kN.m)	
		276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	0,00	0,00	0,00	0,00	

W_{eff,z} **SECÇÃO SUBMETIDA A FLEXÃO SIMPLES EM TORNO DO EIXO Z**
 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE FLEXÃO DA SECÇÃO EFETIVA EM TORNO DO EIXO Z (W_{eff,z})

ID. BANZOS		[B] MAIOR LARGURA	Banzo Superior	BS	b (mm)	t (mm)	7	f (mm)	5	fcs (mm)	5,00							
		[b] MENOR LARGURA	Banzo Inferior	BI	b (mm)	t (mm)	7	f (mm)	5	fcs (mm)	5,00							
TOTAL		DET. DA ÁREA EFETIVA DOS ELEMENTOS DE PLACA COMPRIMIDOS QUE CONSTITUEM A SECÇÃO TRANSVERSAL NP EN 1993-1-5 (4.4)										SECÇÃO EFETIVA		ESTADO DE TENSÃO				
A (mm ²)	Z _{cg} (mm)	b (mm)	t (mm)	c	ψ _{BANZO}	ψ ₁	ψ ₂	ψ ₃	κ	λ _p	ρ	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	C _{EFF} (mm)	b _{EFF} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	
48,5206	100,0	200	7	91,45	-1,000	1,00	0,09	0,09	0,553	0,669	≤ 0,748	1,000	0	91,45	91,45	200	107,04	-1,000
107,04	107,04	200	7	91,45	-1,000	-0,09	-1,00	11,70	-	-	> 0,748	1,000	91,45	0	0	0	107,04	-1,000
107,04	107,04	200	7	91,45	-1,000	1,00	0,09	0,09	0,553	0,669	≤ 0,748	1,000	0	91,45	91,45	200	107,04	-1,000
ψ ₁	-1,00	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b_{z1} (mm)</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td> <td>σ_{1,BS}</td> <td>ψ_{1,BANZO}</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b _{z1} (mm)	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}	σ _{1,BS}	ψ _{1,BANZO}			
107,04	107,04	276,0	7,1	1,000	4,00	0,74	> 0,673	0,949	262	131	131	107,04	-1,000	107,04	-1,000			
σ _{1,BS}	-107,04	ALMA		b (mm)	t (mm)	ψ _{ALMA}	κ <td>λ_p</td> <td>ρ</td> <td>b_{eff} (mm)</td> <td>b</td>	λ _p	ρ	b _{eff} (mm)	b							

3.8 Interface IV. Resistência do elemento à encurvadura

No interface IV o elemento viga-coluna é verificado em relação a fenómenos de instabilidade. Distinguem-se os conjuntos de procedimentos A a D definidos no Quadro 3.8. Surgem no Interface IV da ferramenta *AciariUM* pela mesma ordem que aqui são referidos.

Quadro 3.8 – Conjuntos de conteúdos/procedimentos no Interface IV.

Ref ^a	Designação	Consultar	Cálculo ⁽¹⁾
A	Verificação à encurvadura (varejamento) em torno do eixo y.	3.8.1	4.9
B	Verificação à encurvadura (varejamento) em torno do eixo z.	3.8.1	4.9
C	Verificação á encurvadura lateral (bambeamento).	3.8.2	4.10
D	Verificação á encurvadura por esforço transverso (enfundamento).	3.8.3	4.11

(1) secção deste documento onde constam a metodologia e as expressões usadas para efeitos de cálculo no referido procedimento.

O Interface IV apresenta-se de acordo com a Figura 3.39 (ver em escala maior no Anexo A.4).

INTERFACE IV. FENÓMENOS DE ENCURVADURA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z																														
IPPE	h	bs	bi	tw	ts	ti	rt	ri	A	zcs	ycs	hw	d	cs	cs	ly	Wtop	Wbot	Wpl	Wpl	ly	Arc	lz	Wtop	Wbot	Wpl	Wpl	ly	Arc	lz	Wtop	Wbot	Wpl	Wpl	ly	Arc	lz	Wtop	Wbot	Wpl	Wpl	ly	Arc	lz	Wtop	Wbot	Wpl	Wpl	f
300	300	150	150	7	11	11	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92																			

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE

N_{Ed} 200,00 kN $V_{Ed,y}$ 6,27 kN $M_{Ed,y}$ 74,64 kN.m $V_{Ed,z}$ 5,00 kN $M_{Ed,z}$ 10,00 kN.m **CLASSE** 1

A. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

$N_{b,y,Rd}$ 1469,70 kN **OK** 13,6% $L_{cr,y}$ 2,50 λ_y 0,23 α_y 0,21 ϕ_y 0,53 χ_y 0,99

B. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

$N_{b,z,Rd}$ 1169,90 kN **OK** 17,1% $L_{cr,z}$ 2,00 λ_z 0,69 α_z 0,34 ϕ_z 0,82 χ_z 0,79

C. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL [BAMBEAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.2

DETERMINAÇÃO DO VALOR DO MOMENTO CRÍTICO (M_{cr}) PARA A ENCURVADURA LATERAL - PROPOSTA DE CLARK AND HILL (1960) E GALÉA (1981): AUTOCORRE

CÁLCULO AUTOMÁTICO DO VALOR DE M_{cr} $M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left[\left(\frac{k_w}{k_z} \right)^2 I_w + (k_z l)^2 G I_T + (C_2 z_g - C_3 z_i)^2 \right]^{-0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_i)$ = 201,87 kN.m

DEFINIÇÃO MANUAL DO VALOR DE M_{cr}

VALORES PROPOSTOS: M_{cr} 201,9 kN.m, M_{cr}^* 504,9 kN.m

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS C_1 1,29 C_2 1,56 C_3 0,75

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO Banzo comprimido: SUPERIOR. k_z 1,00 k_w 1,00. Comprimento entre secções laterais: 1 (m), 2.

POSICÃO DA CARGA NA SECÇÃO DETERMINAR. z_g 0,150 em metros.

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO β 0,5. Banzo comprimido: SUPERIOR I_c 300,9 cm⁴, INFERIOR I_c 300,9 cm⁴.

DETERMINAÇÃO DO VALOR DE CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE À ENCURVADURA LATERAL:

$M_{b,Rd}$ 123,92 kN.m **OK** 60% M_{cr} 201,9 kN.m M_{cr}^* 504,9 kN.m λ_{LT} 0,93 α_{LT} 0,21 ϕ_{LT} 1,00 χ_{LT} 0,72

D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNDAMENTO] NP EN 1993-1-1. Anexo A

ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (ELU) $V_{pl,Rd}$ 407,75 kN **OK** NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S 314,178 cm³

ALMA NÃO REFORÇADA h_w/t_w 39,24 < $72/\eta$ e $55,46$ → Não há necessidade de existirem reforços transversais!

REFORÇOS TRANSVERSAIS EXTREMADE: Não, RÍGIDOS, INTERMÉDIOS: Não, a_w (m) -, L (m) 5,00. **OTIMIZAR REFORÇOS TRANSVERSAIS**

REFORÇOS LONGITUDINAIS Não. Arredondamento a múltiplos de 5cm.

ALMA REFORÇADA h_w/t_w 39,24 < $31/\eta$ e $\sqrt{k_z}$ - → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transverso!

VERIFICAÇÃO DA CHAPA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

$V_{b,Rd}$ [kN] - = $V_{bw,Rd}$ - + $V_{br,Rd}$ -

DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS

CASE	$b_{eff}(mm)$	$t_{eff}(mm)$	c	ψ	k_{σ}	λ_p	ρ	$b_{eff}(mm)$	$b_{eff}(mm)$
3	150	10,7	56,45	1,00	0,43	0,306	≤ 0,748	1,000	56,45
SEÇÃO TOTAL	53,812							1,000	150
BANZO SUPERIOR	150	10,7	56,45	1,00	0,43	0,306	≤ 0,748	1,000	56,45
BANZO INFERIOR	150	10,7	56,45	1,00	0,43	0,306	≤ 0,748	1,000	56,45
SEÇÃO EFETIVA constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos.	$b_{eff}(mm)$ 32,10	$t_{eff}(mm)$ 150,00	$M_{b,Rd}$ 123,19	$M_{b,Rd}$ 95,28					
$A_{eff}(mm^2)$	6720								
$E_{N,eff}(mm)$	108,4								

NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO

O método de cálculo do valor de V_{bRd} é válido se existirem reforços transversais pelo menos nos apoios.

RESTRICÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.

Figura 3.39 – Interface IV. Fenómenos de Encurvadura.

3.8.1 Encurvadura (Varejamento)

O espaço do Interface IV (conjuntos de procedimentos A e B) representado na Figura 3.40 é destinado à verificação de segurança do elemento em relação à encurvadura (varejamento). O método e expressões de cálculo estão de acordo com 4.9. A intervenção por parte do utilizador não é requerida para definição de qualquer parâmetro.



Figura 3.40 – Interface IV (excerto). Encurvadura (Varejamento). Procedimentos A e B.

3.8.2 Encurvadura Lateral (Bambeamento)

O espaço do Interface IV (conjunto de procedimentos C) representado na Figura 3.41 é destinado à verificação de segurança do elemento em relação à encurvadura lateral (bambeamento).

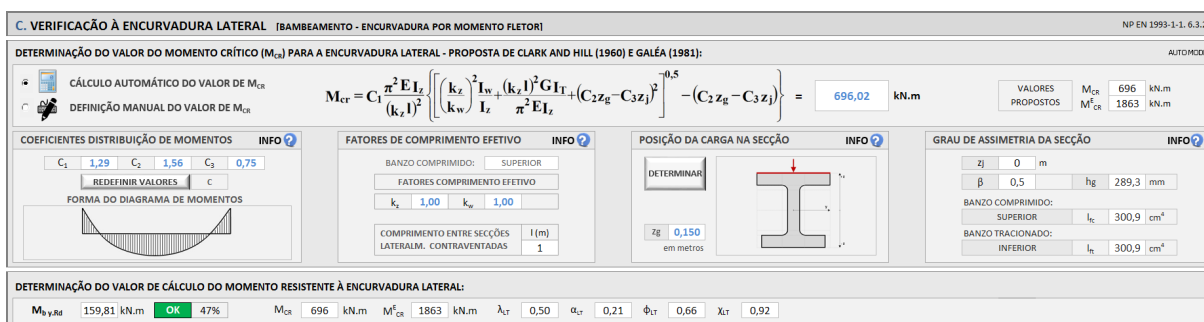


Figura 3.41 – Interface IV (excerto). Encurvadura Lateral (Bambeamento). Procedimento C.

A intervenção por parte do utilizador neste espaço é solicitada para quantificação do valor do momento crítico para a encurvadura lateral, M_{cr} . O parâmetro poderá ser definido manualmente pelo utilizador, ou determinado automaticamente pela ferramenta *AciariUM*.

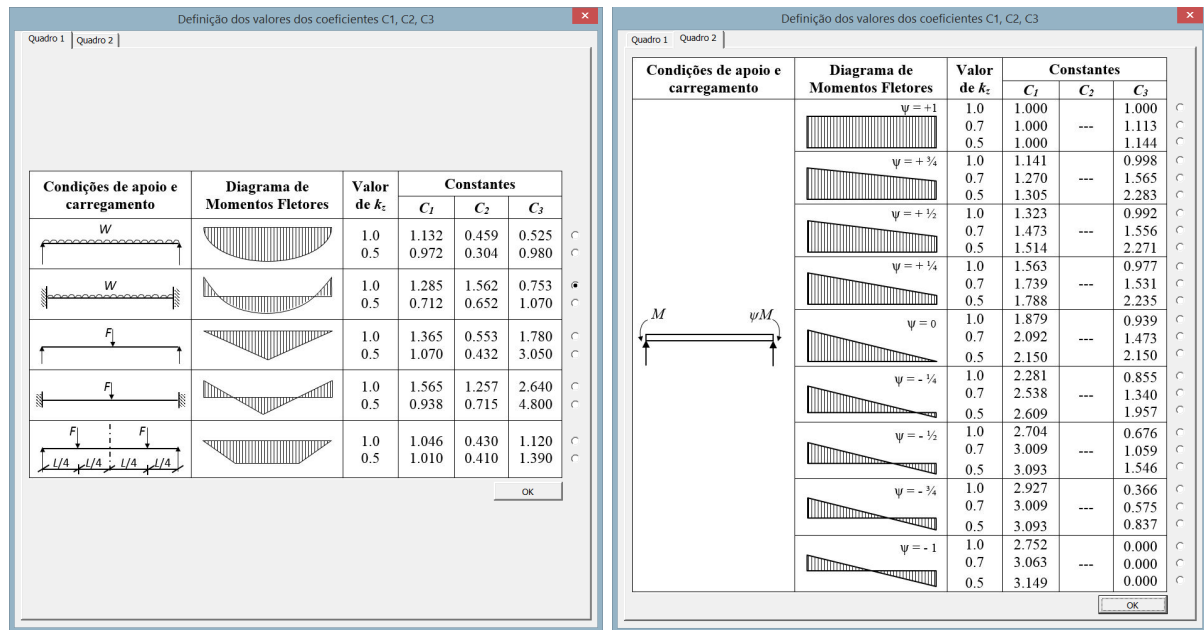
3.8.2.1 Módulo Manual de definição do valor de M_{cr}

O módulo manual de definição de M_{cr} é adequado para o caso em que o utilizador tencione obter este valor por outro meio (recomenda-se por exemplo o software *LTBeam* desenvolvido pelo CTICM).

3.8.2.2 Módulo Automático de definição do valor de M_{cr}

O módulo automático de definição de M_{cr} tem por base a proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6], de acordo com 4.10.1, e implica a definição por parte do utilizador de um conjunto de parâmetros.

Os parâmetros C_1 , C_2 e C_3 são coeficientes que têm em conta a distribuição de momentos. São definidos por seleção de um dos casos constantes na janela apresentada na Figura 3.42 [2]. A janela é aberta quando premido o botão “Redefinir Valores”.



a) Quadro 1.

b) Quadro 2.

Figura 3.42 – Interface IV (excerto). Janela de definição dos Coeficientes Distribuição de Momentos.

Os fatores de comprimento efetivo k_z e k_w dependem das condições de apoio nas secções de extremidade do elemento viga-coluna [6]. Estes valores são definidos manualmente pelo utilizador. O botão “INFO” associado ao campo de definição destes parâmetros abre a janela (Figura 3.43) onde são fornecidas instruções para a sua quantificação.

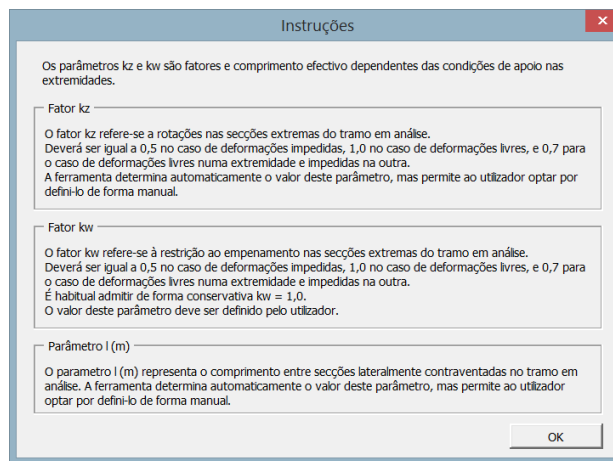


Figura 3.43 – Interface IV (excerto). Janela com instruções para definição dos valores de k_z e k_w .

O botão “Determinar” está associado á janela de definição da posição de aplicação da carga ao nível da secção transversal (Figura 3.44), isto é, do parâmetro z_g . A coordenada em z da posição de aplicação da carga pode ser definida manualmente. Em alternativa pode ser definida a

posição através das opções “Face Superior”, “Centro de Corte” ou “Face Inferior” da secção transversal, a partir da qual a ferramenta calcula automaticamente o valor do parâmetro z_g .

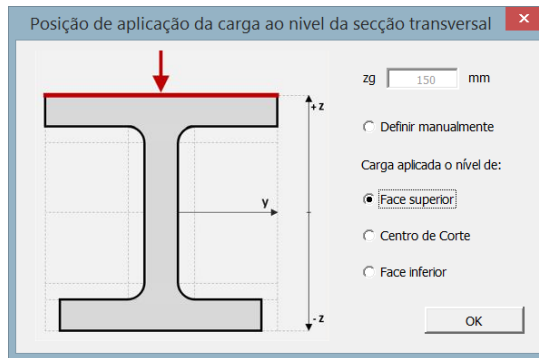


Figura 3.44 – Interface IV (excerto). Janela de determinação do parâmetro z_g .

O valor do parâmetro z_j é calculado automaticamente de acordo com a geometria e solicitação definidas nos Interfaces I e II.

3.8.3 Encurvadura por esforço transversal

A verificação à encurvadura por esforço transversal é realizada no espaço do Interface IV (conjunto de procedimentos D) identificado na Figura 3.45. O método e expressões de cálculo serão posteriormente apresentados na secção 4.11.

D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO]										NP EN 1993-1-1, Anexo A																		
ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (ELU)		$V_{pl,Rd}$	407,75	kN	OK	NPEN1993-1-1 (6.2.6)		com $S = 314,178 \text{ cm}^3$																				
ALMA NÃO REFORÇADA		h_w/t_w	39,24	<	$72/\eta \leq$	55,46	Não há necessidade de existirem reforços transversais!					EXT. INT. EXT. BS BI																
REFORÇOS TRANSVERSAIS		EXTREMIDADE	Não	rígidos	INTERMÉDIOS	Não	a (m)	-	L (m)	5,00	OTIMIZAR REFORÇOS TRANSVERSAIS																	
REFORÇOS LONGITUDINAIS		Não										Arredondamento a múltiplos de 5cm.																
ALMA REFORÇADA		h_w/t_w	39,24	<	$31/\eta \leq \sqrt{f_{yk}}$	-	Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transversal!					kt - kt _y 0 a/h -																
VERIFICAÇÃO DA CHAPA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO										NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO																		
V_{Ed} [kN]		V_{Ed}	-	$V_{Ed,Rd}$	-	DETERMINAÇÃO DA SEÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS						O método de cálculo do valor de V_{bRd} é válido se existirem reforços transversais pelo menos nos apoios. RESTRIÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.																
OK		X_{w}	-	V_{bRd}	-	SEÇÃO TOTAL																						
		$\sigma_{1,inf}$ [MPa]	123,27	λ_w	-	CASE	3	BANZO SUPERIOR					b (mm)	150														
		λ_w	-					COMPRIMED.	150	t (mm)	10,7		c	56,45	ψ	1,00	$k\sigma$	0,43	λ_p	0,306	\leq	0,748	ρ	1,000	c_{eff} (mm)	56,45	b_{eff} (mm)	150
		$\sigma_{1,inf}$ [MPa]	-96,81					TENSÃO	150	t (mm)	10,7		c	56,45	ψ	1,00	$k\sigma$	0,306	λ_p	0,306	\leq	0,748	ρ	1,000	c_{eff} (mm)	56,45	b_{eff} (mm)	150,00
		$\sigma_{1,inf}$ [MPa]	-0,566					SEÇÃO EFETIVA				A_{eff} (cm ²)	32,10	constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos.				$M_{pl,Rd}$	123,19	$M_{ed,Rd}$	95,28	b_f	150	t_f	10,7	c	-	
		$\sigma_{1,inf}$ [MPa]	108,4									z_g (mm)	6720					W_{eff}	447,97									

Figura 3.45 – Interface IV (excerto): Encurvadura por esforço transversal.

A representação no canto superior direito do conjunto de procedimentos D caracteriza graficamente a situação definida para o que diz respeito à existência de reforços transversais da alma de acordo com a Figura 3.46.

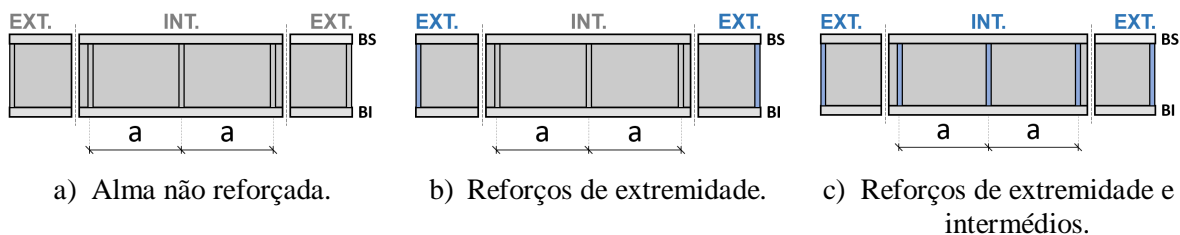


Figura 3.46 – Caracterização gráfica da situação definida para o que diz respeito à existência de reforços transversais da alma.

A ferramenta *AciariUM* permite que este espaço seja utilizado de duas formas distintas:

- Módulo de Verificação: o utilizador define manualmente todos os parâmetros envolvidos no cálculo por forma a verificar a segurança de uma situação existente (3.8.3.1).
- Módulo de Dimensionamento: o utilizador solicita à ferramenta que otimize o número de reforços transversais a colocar por forma a que seja verificada a segurança à encurvadura por esforço transversal com o número mínimo de reforços transversais (3.8.3.2).

3.8.3.1 Módulo de Verificação

A ferramenta *AciariUM* começa por verificar se o elemento necessita ou não de possuir reforços transversais pelo menos nos apoios. Em caso negativo está à partida verificada a segurança à encurvadura por esforço transversal sem que seja necessário qualquer reforço transversal da alma. Esta informação serve como base à eventual opção de colocação desses elementos.

O espaço que se segue destina-se à definição dos eventuais reforços transversais de extremidade e intermédios:

- relativamente aos reforços transversais nas extremidades, marcar a opção “Sim” equivale a comunicar que eles existem; a opção “Não” significará o contrário; em caso afirmativo define-se se são reforços “Rígidos” ou “Não Rígidos”.
- relativamente aos reforços transversais intermédios é selecionada de forma equivalente a opção correspondente à sua existência ou não existência; em caso afirmativo é definida a distância a entre esses reforços.

A partir destas opções é avaliada a necessidade de verificar o elemento à encurvadura por esforço transversal e é determinado o valor de cálculo do esforço transversal resistente à encurvadura por esforço transversal, $V_{b,Rd}$.

Na situação presente, a ferramenta não está preparada para o caso em que existem reforços longitudinais.

3.8.3.2 Módulo de Dimensionamento

O botão “Otimizar Reforços Transversais” desencadeia um processo de otimização que devolve a distância a máxima entre reforços transversais que faz com que seja verificada a resistência do elemento à encurvadura por esforço transversal. A ferramenta *AciariUM* arredonda essa distância a múltiplos de 5cm. Se $a = “-“$ significa que não é necessário qualquer reforço da alma.

3.9 Interface V. Verificação da estabilidade global

No Interface V são verificados os elementos em flexão composta com compressão. O interface apresenta-se de acordo com a Figura 3.47 (ver em escala maior no Anexo A.5).

AcariUM INTERFACE V. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS EM FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A		CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε					
IPÉ	h	b _z	b _y	t _z	t _y	t ₁	t ₂	t ₃	r _z	r _y	A	z _{CG}	y _{CG}	h ₁	d	CS _z	CS _y	I _y	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{pl,z}	I _z	A _w	I _y	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{pl,z}	I _z	A _w	I _t	I _x × 10 ³	ε
f _y (MPa)	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92		

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m CLASSE 1

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO ALTERNATIVO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A NP EN 1993-1-1: Anexo A

PARÂMETROS ENCURVADURA l_{cr,y} 2,50 l_{cr,z} 2,00 L 5,00 λ_y 0,23 λ_z 0,69 λ_{cr} 0,925 χ₀ 0,99 χ_z 0,79 χ_{LT} 0,72

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS N_{cr,y} 27710 kN N_{cr,z} 3128 kN N_{cr,T} 4895 kN FATORES u_y 1,00 u_z 0,99 w_y 1,13 w_z 1,50 η_{pl} 0,14 λ_{max} 0,69

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE

CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS VALORES DE C_{my,0} e C_{mz,0} $M_{Ed}^2 = 504,9 \text{ kN.m}^2$ C₁ 1,29 λ₀ 0,58 > 0,2√C₁√(1 - N_{Ed}/N_{cr,z})(1 - N_{Ed}/N_{cr,T}) ⇒ C_{my,0} 1,00 C_{mz,0} 1,00

Diagrama de momentos fletores M_{Ed} entre secções lateralmente contraventadas: C_{my,0} = 1 + (π²EI_yδ₁/L²|M_{1,Ed}(x)| - 1) N_{Ed}/N_{cr,y}

Diagrama de momentos fletores M_{Ed} entre secções lateralmente contraventadas: C_{mz,0} = 1 + 0,03 N_{Ed}/N_{cr,z}

FATORES φ_{LT} 1,00 b_{LT} 0,03 c_{LT} 0,39 d_{LT} 0,63 e_{LT} 1,84 FATORES C_{my} 1,00 C_{yz} 0,88 C_{zy} 0,89 C_{zz} 0,93

FATORES DE INTERAÇÃO k_{yy} 1,07 k_{yz} 0,84 k_{zy} 0,62 k_{zz} 1,14

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 = 1,02 > 1,0 KO 102%

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.62 = 0,87 < 1,0 OK 87%

Figura 3.47 – Interface V (excerto). Estabilidade Global.

A intervenção por parte do utilizador é requerida, neste espaço, para quantificação dos coeficientes de momento uniforme equivalente C_{my,0} e C_{mz,0}. Os parâmetros poderão ser definidos manualmente ou quantificados de forma automática pela ferramenta AcariUM.

O módulo automático quantifica C_{my,0} e C_{mz,0} com base no Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1]. O quadro é apresentado nas janelas (Figura 3.48) que abrem quando pressionados os botões “Redefinir Parâmetros”. Cabe ao utilizador selecionar a situação que se aplica ao caso que pretende estudar e, em cada caso, definir os parâmetros que forem solicitados.

NP EN 1993-1-1 Quadro A.2 - Coeficientes de Momento Uniforme Equivalente C_{my,0}

Diagrama de momentos M₁ -1 ≤ ψ ≤ 1 ψM₁

C_{my,0} = 0,79 + 0,21ψ₁ + 0,36(ψ₁ - 0,33) N_{Ed}/N_{cr,y}

C_{my,0} = 1 + (π²EI_yδ₁/L²|M_{1,Ed}(x)| - 1) N_{Ed}/N_{cr,y}

M_{1,Ed}(x) valor máximo do momento M_{1,Ed} ou M_{2,Ed} correspondente a uma análise de primeira ordem

δ₁ flecha máxima ao longo do elemento

C_{my,0} = 1 - 0,18 N_{Ed}/N_{cr,y}

C_{my,0} = 1 + 0,03 N_{Ed}/N_{cr,y}

NP EN 1993-1-1 Quadro A.2 - Coeficientes de Momento Uniforme Equivalente C_{mz,0}

Diagrama de momentos M₁ -1 ≤ ψ ≤ 1 ψM₁

C_{mz,0} = 0,79 + 0,21ψ₁ + 0,36(ψ₁ - 0,33) N_{Ed}/N_{cr,z}

C_{mz,0} = 1 + (π²EI_zδ₁/L²|M_{1,Ed}(x)| - 1) N_{Ed}/N_{cr,z}

M_{1,Ed}(x) valor máximo do momento M_{1,Ed} ou M_{2,Ed} correspondente a uma análise de primeira ordem

δ₁ flecha máxima ao longo do elemento

C_{mz,0} = 1 - 0,18 N_{Ed}/N_{cr,z}

C_{mz,0} = 1 + 0,03 N_{Ed}/N_{cr,z}

Figura 3.48 – Interface V (excerto). Janelas de definição dos coeficientes de momento uniforme equivalente C_{my,0} e C_{mz,0}.

3.10 Interface VI. Relatório de segurança

No Interface 6 (Figura 3.49) é feita uma avaliação final do cumprimento de todos os requisitos de segurança. É produzido um relatório, pronto para exportação, de todos os resultados obtidos do processo de verificação e dimensionamento.

INTERFACE VI. RELATÓRIO FINAL DE SEGURANÇA

João M. Era
 Prof. Isabel Valente
 Eng.º Miguel Pires

Universidade do Minho
 Escola de Engenharia

GRUPO CASAIS

O ELEMENTO SUJEITO A FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA E CONSTITUÍDO PELO PERFIL TRANSVERSAL IPE 300 S275 (SECÇÃO DA CLASSE 1) NÃO VERIFICA TODAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA.

KO

102%

DESIGNAÇÃO		DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				PROPRIEDADES		
ipe	300	h	bs	bi	tw	ts	ti	rs	ri	A	ZCG	ycg	hi	d	css	csi	E	v	η	
f _y [MPa]	275	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	GPa	-	-	
		300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	210	0,3	1,2	

TIPO DE PERFIL: LAMINADO

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y

ly	Wy.sup	Wy.inf	Wply	iy	Avz
8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z

lz	Wz.sup	Wz.inf	Wpl.z	iz	Avy
603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03

CLASSE DE RESISTÊNCIA

ÇO DA CLASSE	S275
f _y	235 MPa
f _u	360 MPa

COEFICIENTES

VM0	1,00
VM1	1,00
VM2	1,25

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO N_{Ed} 200,00 kN M_{Ed,y} 74,64 kN V_{Ed,z} 6,27 kN.m M_{Ed,z} 10,00 kN V_{Ed,y} 5,00 kN.m

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção IPE sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. CLASSE 1

Figura 3.49 – Interface 6 (Excerto): Cabeçalho da primeira página do relatório de segurança.

São excluídos do relatório de segurança os cálculos intermédios relativos à classificação da secção transversal e à determinação das propriedades efetivas das secções da Classe 4.

A área de impressão está ajustada para que o ficheiro seja exportado em formato A4. Não é necessário que o utilizador realize qualquer reajuste. O ficheiro deverá ser composto por duas a três páginas (Figura 3.50, ver em tamanho real no Anexo A.6). As instruções para exportação apresentadas neste subcapítulo são válidas para o *Office Excel 2013*.

Figura 3.50 – Relatório final exportado a partir da ferramenta AciariUM (Anexo A.6).

Para impressão do relatório de segurança deve estar aberto o Interface VI. Premindo as teclas *CTRL + P* é aberto o menu de impressão (Figura 3.51). Na janela aberta realizar os seguintes procedimentos: em “Definições” selecionar “Imprimir Folhas Ativas”; em “Impressora” selecionar a impressora pretendida; premir o botão “Imprimir”.

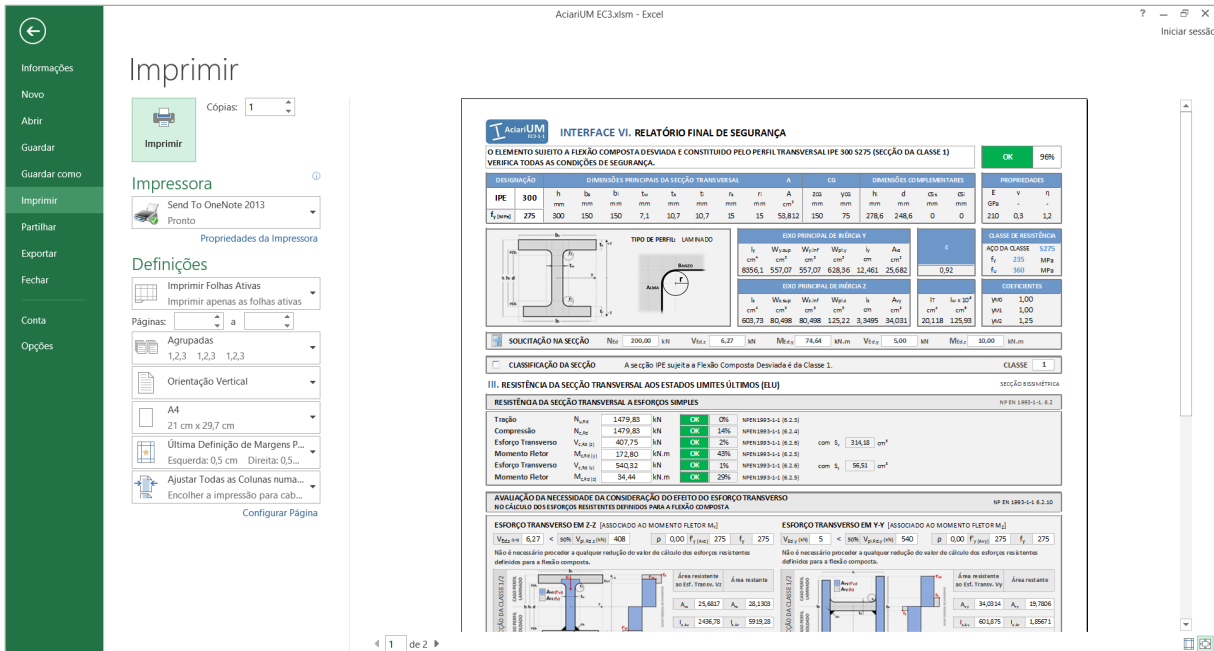


Figura 3.51 – Menu para impressão do relatório de segurança da ferramenta *AcariUM*.

Para exportar o documento em formato PDF deve ser premida, com o Interface VI aberto, a tecla *F12* para abrir o menu “Guardar como” (Figura 3.52). Na janela aberta realizar os seguintes procedimentos: selecionar em “Guardar com o tipo” a opção “PDF (*.pdf)”; premir o botão “Guardar”.

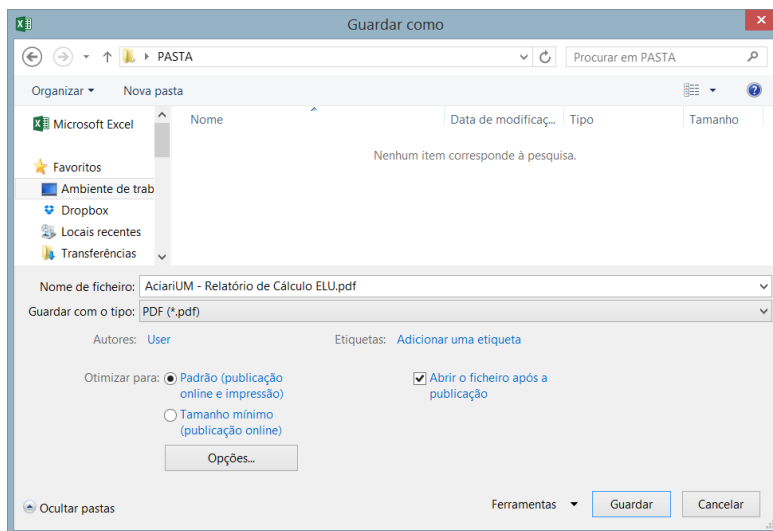


Figura 3.52 – Menu de exportação do relatório de segurança da *AcariUM* em formato PDF.

3.11 Outras funcionalidades

Junto ao cabeçalho principal de cada interface da ferramenta *AciariUM*, do lado direito e fora da plano de visualização pré-definido, existem botões (Figura 3.53) que ativam procedimentos específicos.

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y						EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z						ε	AJUSTAR VISUALIZAÇÃO
I_y	$W_{y,sup}$	$W_{y,inf}$	$W_{pl,y}$	i_y	A_{vz}	I_z	$W_{z,sup}$	$W_{z,inf}$	$W_{pl,z}$	i_z	A_{vy}		
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ⁶
8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9

kN.m	$V_{Ed,y}$	0,10	kN	$M_{Ed,z}$	-0,29	kN.m	MOSTRAR TUDO
------	------------	------	----	------------	-------	------	--------------

Figura 3.53 – Botões que ativam procedimentos específicos posicionados ao lado direito da grelha de cabeçalho principal, fora do plano de visualização.

O botão “*Ajustar Visualização*” ajusta automaticamente o nível de zoom de todos os interfaces da ferramenta de cálculo ao plano de visualização pré-definido, o que permite que a *AciariUM* tome a mesma forma em ecrãs com resoluções diferentes. O mesmo procedimento que é ativado por este botão é realizado sempre que a *AciariUM* é aberta.

Os botões “*Atualizar Página*” e “*Mostrar Tudo*” destinam-se à utilização avançada da ferramenta, como forma de auxílio a operações de edição da *AciariUM*. O botão “*Mostrar Tudo*” faz com que sejam exibidos todos os conteúdos da página, mesmo aqueles que não se aplicam á situação a ser verificada e que, portanto, são ocultados para o caso presente. O botão “*Atualizar Página*” desfaz o efeito anterior atualizando a página e os seus conteúdos para o estado normal.

3.12 Resolução de problemas/erros

São apresentadas neste subcapítulo sugestões de resolução de possíveis problemas ou erros que possam eventualmente ocorrer na ferramenta *AciariUM*.

O suporte (3.12.4) deverá ser consultado se, depois de realizados os procedimento propostos, o erro persistir.

3.12.1 Dispositivo de Segurança com registo de alterações

A ferramenta *AciariUM* é gerida por código em Visual Basic que controla um conjunto de procedimentos. Foi exaustivamente testada por forma a identificar, corrigir e prevenir eventuais erros que forcem o algoritmo de cálculo a parar.

Como dispositivo de segurança é gerada uma mensagem de aviso (Figura 3.54) sempre que um interface em que foram efetuadas alterações for fechado. O utilizador deverá entender que os

procedimentos VBA não estão a funcionar corretamente quando, nessas condições, a mensagem não for exibida.

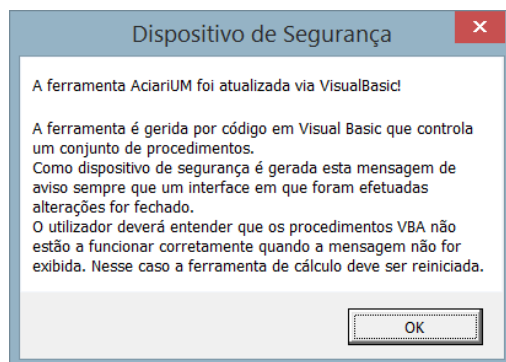


Figura 3.54 – Dispositivo de Segurança.

Se se verificar essa situação é aconselhável reiniciar a ferramenta, preferencialmente sem guardar alterações.

3.12.2 Erro no algoritmo de cálculo do Visual Basic

Se um erro deste tipo acontecer é provável que surja uma janela do género da apresentada na Figura 3.55: o botão “End” permite fechar a janela; o botão “Debug” permite consultar a linha de código onde ocorreu o erro. Sugere-se que seja premido o botão “End”. É possível que os procedimentos VBA não funcionem corretamente a partir desse momento. Nesse caso o dispositivo de segurança apresentado em 3.12.1 ajudará a confirmar essa situação. Se se verificar essa situação é aconselhável reiniciar a ferramenta, preferencialmente sem guardar alterações.

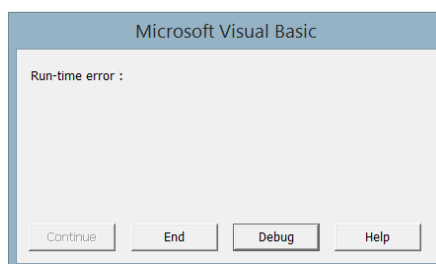


Figura 3.55 – Erro relacionado com o algoritmo em Visual Basic.

3.12.3 Figura não exibida ou exibida a figura incorreta

A ferramenta *AciariUM* apresenta figuras de dois tipos no que diz respeito à forma como são apresentadas: figuras que estão inseridas no ficheiro *.xism* e que fazem, portanto, parte dele; figuras que estão armazenadas na pasta “Conteúdo Gráfico” que acompanha o referido ficheiro e que são chamadas pela ferramenta *AciariUM* em função das opções do seu algoritmo.

Se as figuras do primeiro tipo não forem exibidas significará, provavelmente, que o computador está sem memória. Aconselha-se fechar outros programas abertos e reiniciar a ferramenta.

Se as figuras do segundo tipo não forem exibidas ou não for exibida a figura correta deverá verificar-se se, de acordo com 3.2, a pasta “Conteúdo Gráfico” está guardada na mesma pasta que o ficheiro *.xism*.

Se as situações referidas estiverem salvaguardadas e o erro persistir poderá significar que o código em VBA não está a funcionar corretamente. Sugerem-se os procedimentos referidos em 3.8.7.1 para resolver a situação.

3.12.4 Suporte

Comentários ou sugestões poderão ser enviados para o autor deste documento através do endereço de email aciarum_ec3@gmail.com ou qualquer outro meio.

3.13 Aviso Legal

O autor da *AciariUM* declina toda e qualquer responsabilidade relativamente à utilização da ferramenta por terceiros. Essa responsabilidade é inteiramente remetida para o utilizador.

CAPÍTULO 4

Método e expressões de cálculo

4.1 Enquadramento

O presente capítulo tem como objetivo documentar e resumir a metodologia e o conjunto de expressões usadas pela ferramenta *AciariUM* no processo de verificação e dimensionamento de vigas-coluna em aço aos estados limite últimos (ELU) de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1].

As expressões apresentadas são válidas para o caso de secções transversais em I ou H simétricas relativamente ao seu eixo local z , de acordo com a Figura 4.1. São apresentadas as variantes para os casos de perfis laminados a quente e perfis reconstituídos soldados.

4.2 Propriedades do material (aço)

As propriedades do aço estrutural são definidas no Interface I da ferramenta *AciariUM* (3.5.2).

A tensão de cedência f_y (MPa) é determinada em função da classe de resistência definida para o aço estrutural de acordo com o Quadro 3.1 da NP EN 1993-1-1 [1]. Os valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u são definidos para as classes de aço na base de dados da ferramenta *AciariUM* de acordo com o Quadro 3.4.

Para o caso de aços estruturais abrangidos pela NP EN 1993-1-1 [1], as restantes propriedades a adotar nos cálculos deverão ser, de acordo com a secção 3.2.6 da mesma norma, as seguintes:

- módulo de elasticidade: $E = 210 \text{ GPa}$;
- coeficiente de Poisson em regime elástico: $\nu = 0,3$;
- módulo de distorção: $G = E/2(1 + \nu) \approx 80,77 \text{ GPa}$;
- coeficiente de dilatação térmica linear: $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ por K ;
- massa volúmica: $G_m = 7850 \text{ Kg/m}^3$.

4.3 Coeficientes parciais de segurança

Os valores numéricos recomendados para os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} para edifícios, de acordo com a secção 6.1(1) da NP EN 1993-1-1 [1], são os seguintes: $\gamma_{M0} = 1,00$; $\gamma_{M1} = 1,00$; $\gamma_{M2} = 1,25$.

4.4 Propriedades mecânicas da secção transversal

A geometria da secção transversal é definida no Interface I da ferramenta *AciariUM* (ver 3.5.1). No mesmo espaço são determinadas automaticamente as propriedades mecânicas dessa secção.

4.4.1 Definição da geometria da secção transversal

Estão disponíveis na ferramenta *AciariUM* três módulos de definição da geometria da secção transversal (ver 3.5.1). Em qualquer um dos casos são definidas, direta ou indiretamente, as principais dimensões dessa secção, de acordo com o Quadro 4.1 e a Figura 4.1.

Quadro 4.1 – Dimensões principais da secção transversal.

Símbolo	Designação
h	altura;
b_s	largura do banzo superior;
b_i	largura do banzo inferior;
t_w	espessura da alma;
t_s	espessura do banzo superior;
t_i	espessura do banzo inferior;
r_s	raio de concordância entre a alma e o banzo superior;
r_i	raio de concordância entre a alma e o banzo inferior;
cs_s	espessura do cordão de soldadura que faz a união entre a alma e o banzo superior;
cs_i	espessura do cordão de soldadura que faz a união entre a alma e o banzo inferior;

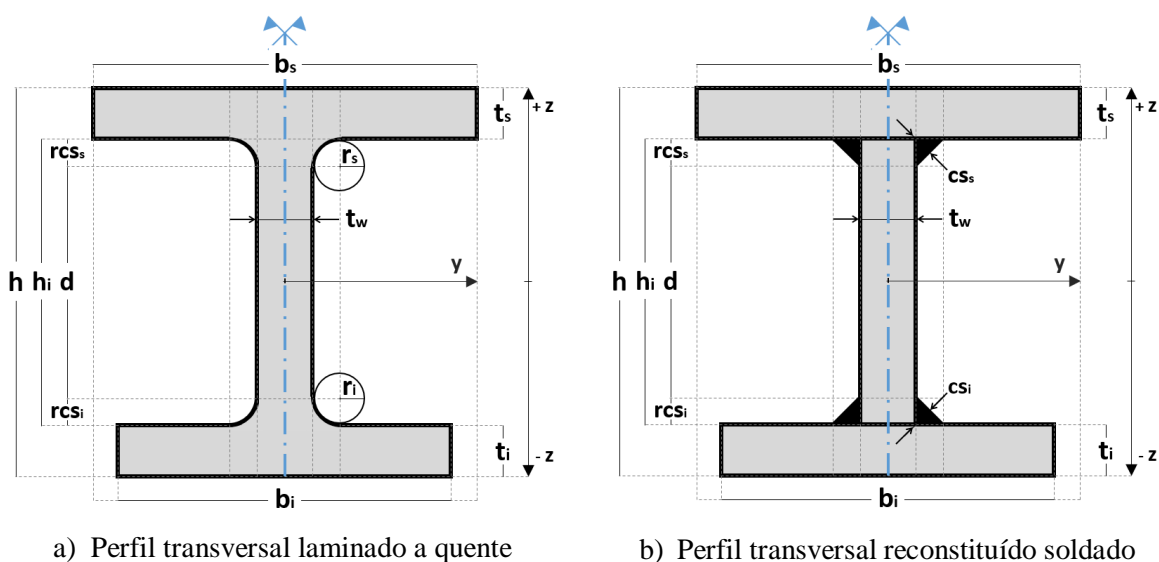


Figura 4.1 – Dimensões principais da secção transversal.

A geometria da secção transversal é o ponto de partida para o cálculo automático das suas propriedades mecânicas, de acordo com 4.4.2.

4.4.2 Determinação das propriedades mecânicas da secção transversal

As equações apresentadas são utilizadas pela ferramenta para determinação das propriedades mecânicas de secções transversais em I ou H simétricas em relação ao seu eixo local z , e definidas geometricamente de acordo com 4.4.1.

Altura da alma, h_w – Equação (4.1).

$$h_w = h - (t_s + t_i) \quad (4.1)$$

Altura da parte reta da alma, d – Equação (4.2).

$$d = h - (t_s + rcs_s + t_i + rcs_i) \quad (4.2)$$

Distância relativa à zona correspondente ao raio de concordância ou cordão de soldadura, r_{cs} – Equações (4.3) e (4.4).

$$r_{cs} = cs \quad \text{para perfis laminados.} \quad (4.3)$$

$$r_{cs} = \sqrt{2} \times cs \quad \text{para perfis soldados.} \quad (4.4)$$

Coordenada em z da posição do centro de gravidade, z_{cg} , medida a partir da extremidade inferior da secção transversal – Equação (4.5).

$$z_{cg} = b_s t_s \left(h - \frac{t_s}{2} \right) + b_i t_i \left(h - \frac{t_i}{2} \right) + h_w t_w \left(t_i + \frac{h_w}{2} \right) + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_s^2 \left(t_i + h_w - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right) + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_i^2 \left(t_i + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right) \quad (4.5)$$

Coordenada em y da posição do centro de gravidade, y_{cg} , medida a partir da extremidade mais à esquerda da secção transversal – Equações (4.6) e (4.7).

$$y_{cg} = \left[\begin{aligned} & b_s t_s b_s / 2 + b_i t_i \left(\frac{b_s - b_i}{2} + b_i / 2 \right) \\ & + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_s^2 \left(\frac{b_s}{2} - \frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right) + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_s^2 \left(\frac{b_s}{2} + \frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right) \\ & + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_i^2 \left(\frac{b_s}{2} - \frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right) + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_i^2 \left(\frac{b_s}{2} + \frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right) \end{aligned} \right] \div A \quad \begin{array}{l} \text{para} \\ b_s \geq b_i \end{array} \quad (4.6)$$

$$y_{cg} = \left[\begin{aligned} & b_i t_i b_i / 2 + b_s t_s \left(\frac{b_i - b_s}{2} + b_s / 2 \right) \\ & + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_s^2 \left(\frac{b_i}{2} - \frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right) + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_s^2 \left(\frac{b_i}{2} + \frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right) \\ & + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_i^2 \left(\frac{b_i}{2} - \frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right) + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) r_i^2 \left(\frac{b_i}{2} + \frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right) \end{aligned} \right] \div A \quad \begin{array}{l} \text{para} \\ b_s < b_i \end{array} \quad (4.7)$$

Área da secção transversal, A – Equação (4.8).

$$A = b_s t_s + b_i t_i + h_w t_w + 2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot (r_s^2 + r_i^2) \quad (4.8)$$

Área resistente ao esforço transversal V_z , A_{Vz} – Equações (4.9) e (4.10) (Figura 4.2).

$$A_{Vz} = A - (b_i \cdot t_i + b_s \cdot t_s) + (t_w + 2 \cdot r_s) \cdot t_s/2 + (t_w + 2 \cdot r_i) \cdot t_i/2 \quad \text{para perfis laminados} \quad (4.9)$$

$$A_{Vz} = h_w \cdot t_w \quad \text{para perfis soldados} \quad (4.10)$$

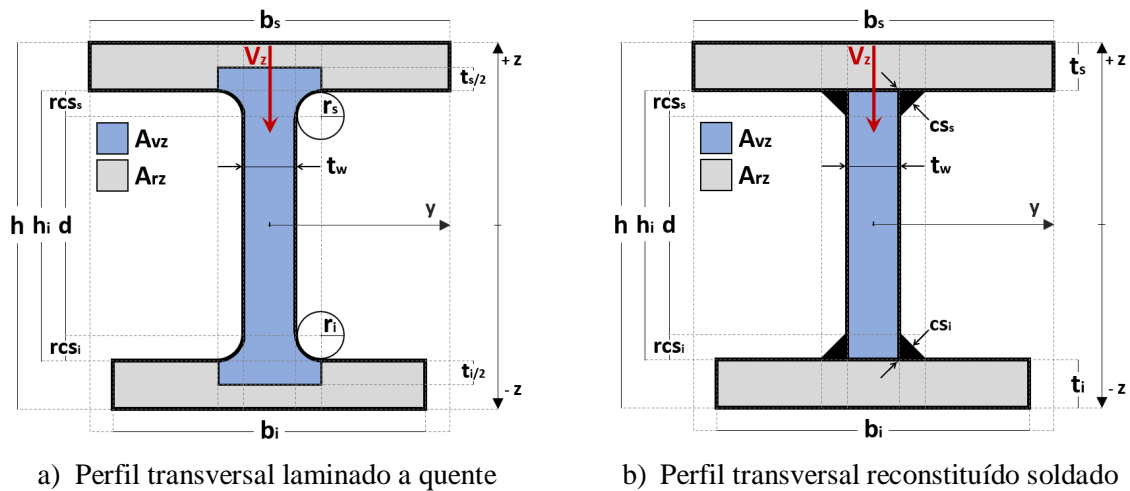


Figura 4.2 – Área resistente ao esforço transversal, A_{Vz} .

Área resistente ao esforço transverso na direção V_y , A_{Vy} – Equação (4.11), (Figura 4.3).

$$A_{Vy} = b_s t_s + b_i t_i \quad (4.11)$$

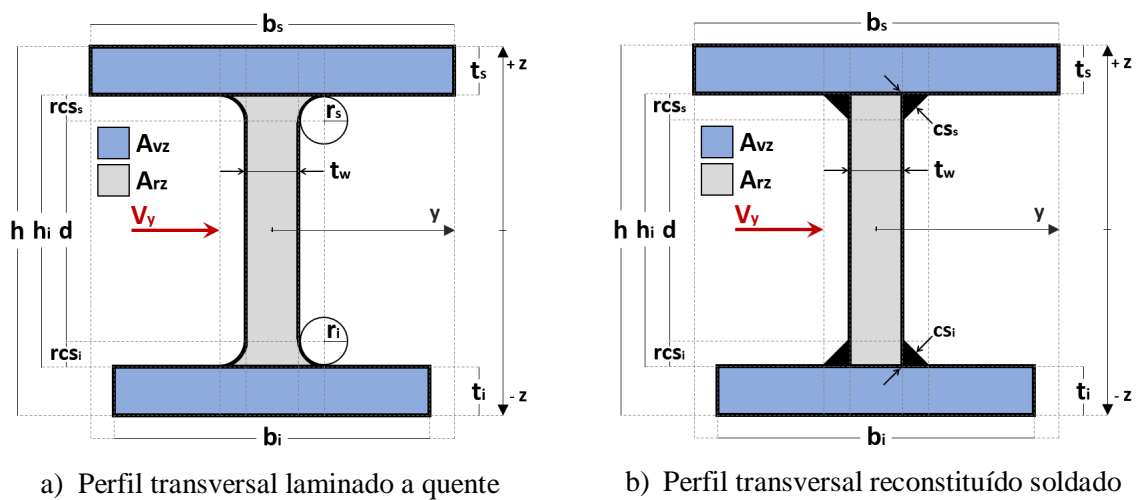


Figura 4.3 – Área resistente ao esforço transverso, A_{Vy} .

Momento de inércia, I , da secção em torno do eixo considerado – Equações (4.12) e (4.13).

$$\begin{aligned}
 I_y = & \frac{b_s t_s^3}{12} + b_s t_s \left(h - \frac{t_s}{2} - z_{cg} \right)^2 + \frac{b_i t_i^3}{12} + b_i t_i \left(z_{cg} - \frac{t_i}{2} \right)^2 + \frac{t_w h_w^3}{12} + t_w h_w \left(t_i + \frac{h_w}{2} - z_{cg} \right)^2 \\
 & + 2 \cdot \frac{11}{2100} r_s^4 + 2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_s^2 \cdot \left(h - t_s - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s - z_{cg} \right)^2 \\
 & + 2 \cdot \frac{11}{2100} r_i^4 + 2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_i^2 \cdot \left(z_{cg} - t_i - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right)^2
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
 I_z = & \frac{t_s b_s^3}{12} + \frac{t_i b_i^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} + 2 \cdot \frac{11}{2100} \cdot r_s^4 + 2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_s^2 \cdot \left(\frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s \right)^2 \\
 & + 2 \cdot \frac{11}{2100} \cdot r_i^4 + 2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_i^2 \cdot \left(\frac{t_w}{2} - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right)^2
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Módulo de flexão elástico, W , em torno do eixo considerado – Equações (4.14).

$$W_{y,sup} = \frac{I_y}{h - z_{cg}} ; W_{y,inf} = \frac{I_y}{z_{cg}} ; W_{z,sup} = \frac{I_z}{b_s/2} ; W_{z,inf} = \frac{I_z}{b_i/2} \tag{4.14}$$

em que:

$W_{y,sup}$ e $W_{y,inf}$ módulos de flexão elásticos em torno do eixo y , calculados relativamente às fibras superior e inferior, respetivamente, da secção transversal;

$W_{z,sup}$ e $W_{z,inf}$ módulos de flexão elásticos em torno do eixo z , calculados relativamente às fibras esquerda ou direita (é indiferente uma vez que são equidistantes do centro de gravidade) dos banzos superior e inferior, respetivamente.

Módulo de flexão plástico em torno do eixo y , $W_{pl,y}$ – Equação (4.15), válida para os casos em que o eixo neutro plástico, EN , se situa na parte reta da alma (a maior parte dos casos práticos).

$$\begin{aligned}
 W_{pl,y} = & b_s t_s \cdot \left(h - \frac{t_s}{2} - EN \right) + b_i t_i \cdot \left(EN - \frac{t_i}{2} \right) \\
 & + (h_w + t_i - EN) \cdot t_w \cdot \left(\frac{h_w + t_i - EN}{2} \right) + (EN - t_i) \cdot t_w \cdot \left(\frac{EN - t_i}{2} \right) \\
 & + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_s^2 \cdot \left(h - t_s - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s - EN \right) + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \cdot r_i^2 \cdot \left(EN - t_i + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i \right)
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

em que a coordenada em z , EN , da posição do eixo neutro plástico é determinada de acordo com: $EN = [b_s t_s - b_i t_i - 2 (1 - \pi/4) \cdot (r_i^2 - r_s^2) + (h - t_s + t_i) \cdot t_w] / 2 t_w$.

Módulo de flexão plástica em torno do eixo z , $W_{pl,z}$ – Equação (4.16).

$$W_{pl,z} = b_s t_s \frac{b_s}{4} + b_i t_i \frac{b_i}{4} + h_w t_w \frac{t_w}{4} + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot r_s^2 \cdot \left(\frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_s\right) + 2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot r_i^2 \cdot \left(\frac{t_w}{2} + \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} r_i\right) \quad (4.16)$$

Raio de giração, i , em torno do eixo considerado – Equações (4.17).

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} ; i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (4.17)$$

Constante de torção de St.Venant, I_T – Equação (4.18).

$$I_T = \frac{(b_s - 0,63 t_s) t_s^3}{3} + \frac{(b_i - 0,63 t_i) t_i^3}{3} + \frac{h_i t_w^3}{3} + \frac{t_w}{t_s} \cdot \left(0,145 + 0,1 \cdot \frac{r_s}{t_s}\right) \cdot \left(\frac{(r_s + t_w/2)^2 + (r_s + t_s)^2 - r_s^2}{2 r_s t_s}\right)^4 + \frac{t_w}{t_i} \cdot \left(0,145 + 0,1 \cdot \frac{r_i}{t_i}\right) \cdot \left(\frac{(r_i + t_w/2)^2 + (r_i + t_i)^2 - r_i^2}{2 r_i t_i}\right)^4 \quad (4.18)$$

Constante de empenamento, I_w – Equação (4.19).

$$I_w = \left[1 + \left(\frac{b_s}{b_i}\right)^{-3} + \left(\frac{t_s}{t_i}\right)^{-1}\right] + \frac{b_s t_s \left(h_w + \frac{t_s}{2} + \frac{t_i}{2}\right)^2}{12} \quad (4.19)$$

4.5 Determinação de reações, esforços e parâmetros relacionados com as condições de apoio e travamento do elemento viga-coluna

As considerações tomadas neste subcapítulo dizem respeito ao “Módulo Automático” de determinação das condições de apoio, travamento e solicitação no Interface II da ferramenta *AciariUM* (ver 3.6.3).

Para cada carga definida ao nível do elemento viga-coluna a ferramenta calcula as forças de reação que resultam nos apoios e os esforços de corte e de flexão que surgem em cada ponto ao longo do desenvolvimento da barra. O cálculo está refinado a 200 pontos separados de uma distância de $L/200$. O efeito de cada carga é determinado de acordo com [14].

O comprimento de encurvadura em torno do eixo y , $L_{cr,y}$, é definido de acordo com a Figura 4.4 [5], depois de o utilizador caracterizar as condições de apoio do elemento por seleção de um dos casos apresentados na mesma figura.

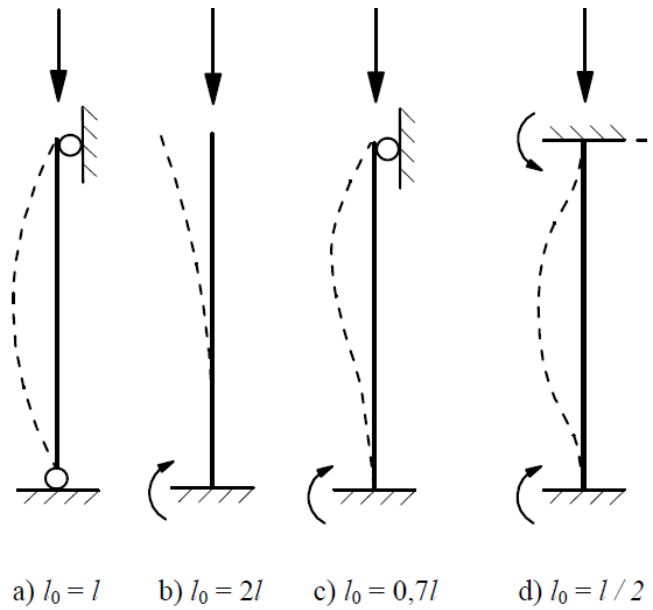


Figura 4.4 – Determinação do valor do comprimento de encurvadura em torno do eixo y [5].

O comprimento de encurvadura em torno do eixo z , $L_{cr,z}$, é tomado como igual à distância entre secções lateralmente contraventadas, l , no tramo que contem a secção a verificar, considerando para o efeito os travamentos laterais relativos à verificação à encurvadura (varejamento).

4.6 Classificação das secções transversais

A classificação das secções transversais é realizada no Interface III da ferramenta *AciariUM* (ver 3.7.1) de acordo com a secção 5.5 da NP EN 1993-1-1 [1]. Tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local e depende da relação entre a largura e a espessura dos seus componentes comprimidos. Uma secção transversal é classificada de acordo com a classe mais elevada dos seus componentes [1].

Os valores limites da relação entre as dimensões dos componentes comprimidos das Classes 1, 2 e 3 são indicado no Quadro 5.2 da NP EN 1993-1-1 [1] (Figuras 4.5 e 4.6 deste documento). Um componente que não satisfaça os limites da Classe 3 indicados nesse quadro é considerado como sendo da Classe 4.

Componentes internos comprimidos (alma)			
			Eixo de flexão
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396 \epsilon}{13 \alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456 \epsilon}{13 \alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \epsilon}{\alpha}$
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

^{*)} $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$, ou quando a extensão de tracção $\epsilon_y > f_y/E$.

Figura 4.5 – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos internos (alma). Quadro 5.2 da NP EN 1993-1-1 (editado) [1].

Banzos em consola						
Secções laminadas			Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver a EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 4.6 – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos em consola (banzos). Quadro 5.2 da NP EN 1993-1-1 (editado) [1].

4.7 Secções transversais da Classe 4

O cálculo das propriedades efetivas de uma secção da Classe 4 é realizado no Interface III da ferramenta *AciariUM* (ver 3.7.5) logo após a classificação dessa secção.

4.7.1 Considerações gerais

A resistência de secções da Classe 4 é determinada com base nas áreas efetivas dos elementos de placa comprimidos (banzos e/ou alma), as quais permitem calcular as características das secções a utilizar nas verificações de segurança: A_{eff} – área efetiva da secção transversal; I_{eff} – momento de inércia da secção efetiva em relação ao eixo considerado; W_{eff} – módulo de flexão da secção efetiva em relação ao eixo considerado [1]. A determinação da secção efetiva dos elementos de placa comprimidos da secção transversal é feita de acordo com a secção 4 da NP EN 1993-1-5 [3] (4.7.3 deste documento).

A verificação aos ELU de uma secção da Classe 4 trata-se, portanto, de um cálculo em regime elástico, semelhante ao adotado para o caso de secções da Classe 3, que assenta na consideração de uma secção efetiva reduzida em relação à secção bruta.

Para as secções transversais assimétricas, nas quais atua um esforço normal de compressão, o eventual afastamento (e_{Nz} ; e_{Ny}) entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), introduz momentos adicionais (a serem somados aos existentes), de acordo com a Equação (4.20), que são tidos em conta na verificação da secção transversal [1]. Entende-se, portanto, que também a situação caracterizada por uma secção da Classe 4 com banzos diferentes sujeita a compressão simples será tratada, devido ao surgimento de um momento $\Delta M_{y,Ed}$, como um problema de flexão composta.

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} e_{Nz} ; \Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} e_{Ny} \quad (4.20)$$

4.7.2 Método de verificação da capacidade resistente de secções da Classe 4

A NP EN 1993-1-1 propõe dois métodos de verificação da capacidade resistente de secções da Classe 4 [9].

O “Método Aproximado” [9], aquele que é utilizado pela ferramenta *AciariUM*, consiste em considerar a tensão máxima de cada elemento igual à tensão de cedência f_y do aço. O critério de verificação da capacidade resistente da secção a respeitar é o seguinte (Equação (4.21)) [1]:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (4.21)$$

em que:

- A_{eff} área efetiva da secção transversal, determinada admitindo que está submetida a compressão uniforme (ver 4.7.3);
- $W_{eff,min}$ módulo de flexão efetivo da secção transversal (referente à fibra da secção onde a tensão elástica é mais elevada), quando submetida apenas a um momento fletor em relação ao eixo considerado (ver 4.7.4 e 4.7.5);
- e_N afastamento entre os centros de gravidade da área efetiva (A_{eff}) e da área bruta (A) da secção transversal, quando esta se encontra submetida apenas à compressão (ver 4.7.3).

O “Método Iterativo” admite a determinação da secção eficaz com base nas solicitações que estão realmente presentes na secção transversal (e não no estado limite último) [9]. Compara, de acordo com a Equação (4.22), a tensão atuante ($\sigma_{x,Ed}$) na fibra mais afastada da secção efetiva (admitindo um diagrama elástico de tensões) com a tensão limite de elasticidade de cálculo f_{yd} (f_y/γ_{M0}) [1].

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_{yd} \quad (4.22)$$

Este método exige um processo iterativo de determinação da tensão máxima $\sigma_{x,Ed}$. Em cada etapa do processo, uma nova secção efetiva é determinada a partir da secção bruta, tendo como base as tensões obtidas para a secção efetiva da etapa anterior [9].

O “Método Iterativo” é em regra um pouco mais favorável que o “Método Aproximado” [9]. A sua implementação não apresenta dificuldades para os casos de compressão simples, flexão simples ou flexão composta. A consideração do diagrama de tensões real na secção transversal exige, no entanto, para os casos de flexão desviada ou flexão composta desviada, ter em conta um número excessivamente grande de possibilidades de posicionamento do eixo neutro.

Por estes motivos, e neste contexto, não se considera viável a implementação do “Método Iterativo”. O “Método Aproximado” é implementado em coerência com as propostas da maior parte da bibliografia consultada e dos programas de cálculo testados.

Para um melhor entendimento relativamente a estes métodos, especialmente ao “Método Iterativo” que não é abordado neste documento, sugere-se a consulta de [9]. São apresentados metodologias e exemplos de aplicação práticos para o caso de uma secção em I comprimida e fletida segundo o eixo principal de inércia (flexão composta em torno do eixo y).

4.7.3 Determinação das propriedades efetivas das secções da Classe 4

A secção transversal efetiva é determinada de acordo com a secção 4.4 da NP EN 1993-1-5 [3].

A parte efetiva da alma é determinada, em função da distribuição de tensões nesse elemento, por aplicação das expressões no Quadro 4.1 do referido documento (Figura 4.7).

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

Figura 4.7 – Determinação da secção transversal efetiva: elementos comprimidos interiores (alma).
 Quadro 4.1 da NP EN 1993-1-5 [3] (editado).

A largura \bar{b} corresponde á altura d da parte reta da alma. O coeficiente de encurvadura k_σ é o correspondente à razão de tensões ψ e às condições de fronteira.

O coeficiente de redução ρ , para elementos comprimidos interiores (alma), é calculado de acordo com as Equações (4.23) e (4.24).

$$\rho = 1 \text{ para } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (4.23)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ para } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (4.24)$$

Em que: $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$; t – espessura t_w da alma.

A parte efetiva dos banzos é determinada, em função da distribuição de tensões nesse elemento, por aplicação das expressões no Quadro 4.2 da NP EN 1993-1-5 [3] (Figura 4.8).

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

Figura 4.8 – Determinação da secção transversal efetiva: elementos comprimidos em consola (banzos). Quadro 4.2 da NP EN 1993-1-5 [3] (editado).

A largura c corresponde á largura da parte em consola do banzo (Figura 4.9).

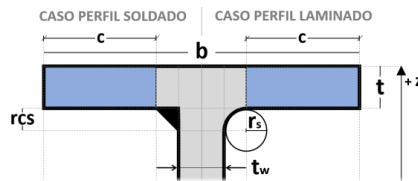


Figura 4.9 – Largura c correspondente às partes em consola do banzo.

O coeficiente de redução ρ , para elementos em consola (banzos), é calculado de acordo com as Equações (4.25) e (4.26).

$$\rho = 1 \text{ para } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \tag{4.25}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ para } \bar{\lambda}_p > 0,748 \tag{4.26}$$

Em que: $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$.

4.7.4 Cálculo da área efetiva A_{eff} e do afastamento e_N entre os centros de gravidade das áreas das secções bruta e efetiva

A área efetiva da secção transversal A_{eff} e o afastamento e_N , entre os centros de gravidade da mesma área efetiva (A_{eff}) e da correspondente área bruta (A), são calculados com base na secção efetiva determinada supondo a secção bruta submetida a esforço axial uniforme (compressão ou tração de forma coerente com o sinal do esforço axial atuante na secção transversal).

Quando o esforço é de compressão o cálculo é realizado de acordo com as Equações (4.27) e (4.28) em coerência com a Figura 4.10.

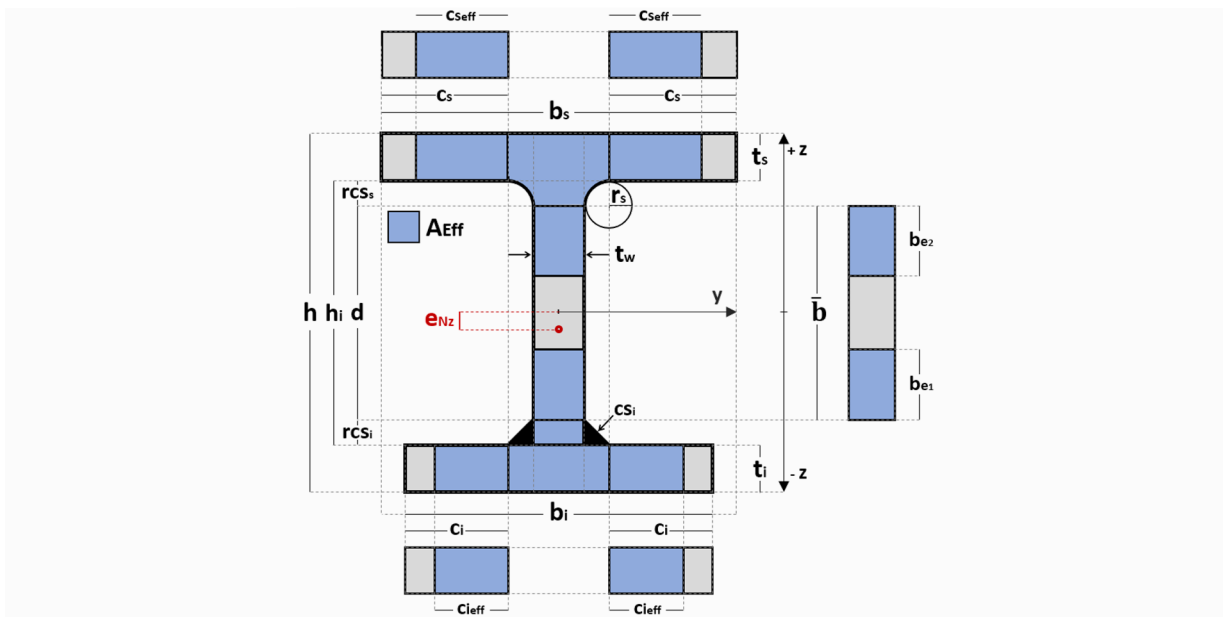


Figura 4.10 – Secção efetiva determinada supondo compressão pura: cálculo de A_{eff} e e_N .

$$e_{Nz} = |z_{cg} - z_{cg,eff}| \quad (4.27)$$

Em que: z_{cg} e $z_{cg,eff}$ – coordenadas em z das posições dos centros de gravidade das secções bruta e efetiva, respetivamente.

$$A_{eff} = (2c_{s,eff} + t_w + 2rc_{s_i}) \times t_s + (2c_{i,eff} + t_w + 2rc_{s_i}) \times t_i + (b_{e2} + rc_{s_s} + b_{e1} + rc_{s_i}) \times t_w \quad (4.28)$$

Qualquer secção transversal sujeita a tração pura é completamente efetiva.

4.7.5 Cálculo do módulo de flexão efetivo em torno do eixo y ($W_{eff,y}$)

O módulo de flexão efetivo da secção transversal em torno do eixo y (referente à fibra da secção onde a tensão elástica é mais elevada) é calculado com base na secção efetiva determinada

supondo a secção bruta submetida apenas a momento fletor em relação ao eixo y . É calculado de acordo com a Equação (4.29), de forma coerente com a Figura 4.11.

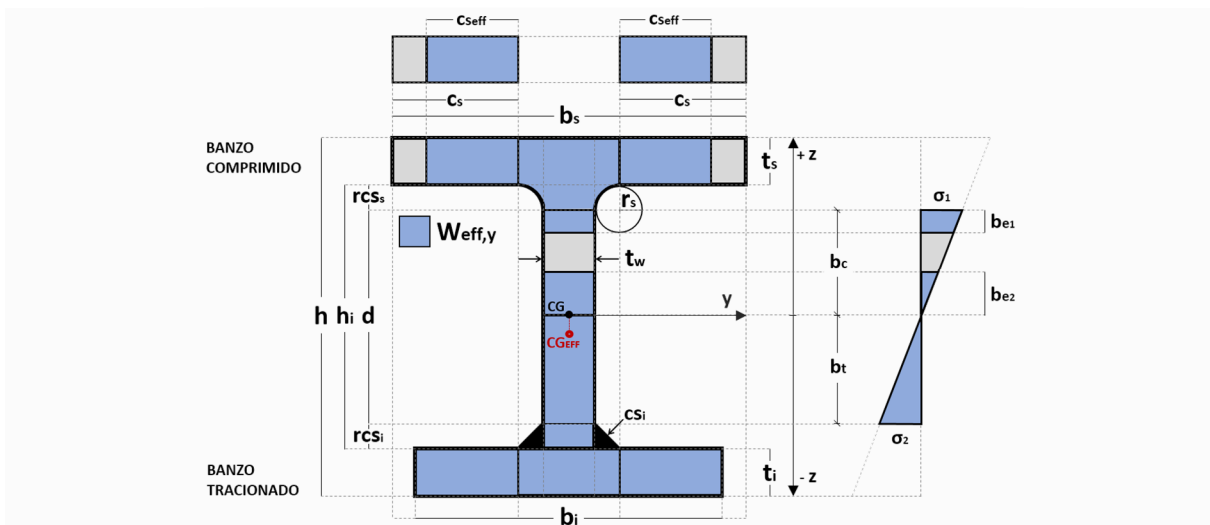


Figura 4.11 – Secção efetiva determinada supondo a secção bruta sujeita apenas a um momento fletor em relação ao eixo y : cálculo de $W_{eff,y}$.

$$\begin{aligned}
 I_{y,eff} = & \frac{b_{s,eff} \cdot t_s^3}{12} + b_{s,eff} \cdot t_s \cdot (h - t_s/2 - z_{cg,eff})^2 + \frac{b_i \cdot t_i^3}{12} + b_i \cdot t_i \cdot (z_{cg,eff} - t_i/2)^2 \\
 & + \frac{t_w \cdot (b_{e1} + r_s)^3}{12} + t_w \cdot (b_{e1} + r_s) \cdot (h - z_{cg,eff} - t_s - (b_{e1} + r_s)/2)^2 \\
 & + \frac{t_w \cdot (b_{e2} + z_{cg,eff} - t_i)^3}{12} + t_w \cdot (b_{e2} + z_{cg,eff} - t_i) \cdot (z_{cg,eff} - t_i - (b_{e2} + z_{cg,eff} - t_i)/2)^2 \quad (4.29) \\
 & + 2 \cdot (11/2100) \cdot r_s^4 + 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot r_s^2 \times \left(h - t_s - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} \cdot r_s - z_{cg,eff} \right)^2 \\
 & + 2 \cdot (11/2100) \cdot r_s^4 + 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot r_s^2 \times \left(h - t_s - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} \cdot r_s - z_{cg,eff} \right)^2
 \end{aligned}$$

Considera-se para este cálculo o valor da posição do centro de gravidade $z_{cg,eff}$ correspondente à secção efetiva determinada de acordo com a Figura 4.11.

As considerações tomadas nesta secção são válidas para o caso de momento fletor M_y positivo. São adaptadas de forma análoga para o caso de M_y negativo.

4.7.6 Cálculo do módulo de flexão efetivo em torno do eixo z ($W_{eff,z}$)

O módulo de flexão efetivo da secção transversal em torno do eixo z (referente à fibra da secção onde a tensão elástica é mais elevada) é calculado com base na secção efetiva determinada supondo a secção bruta submetida apenas a momento fletor em relação ao eixo z . É calculado de acordo com a Equação (4.30), de forma coerente com a Figura 4.12.

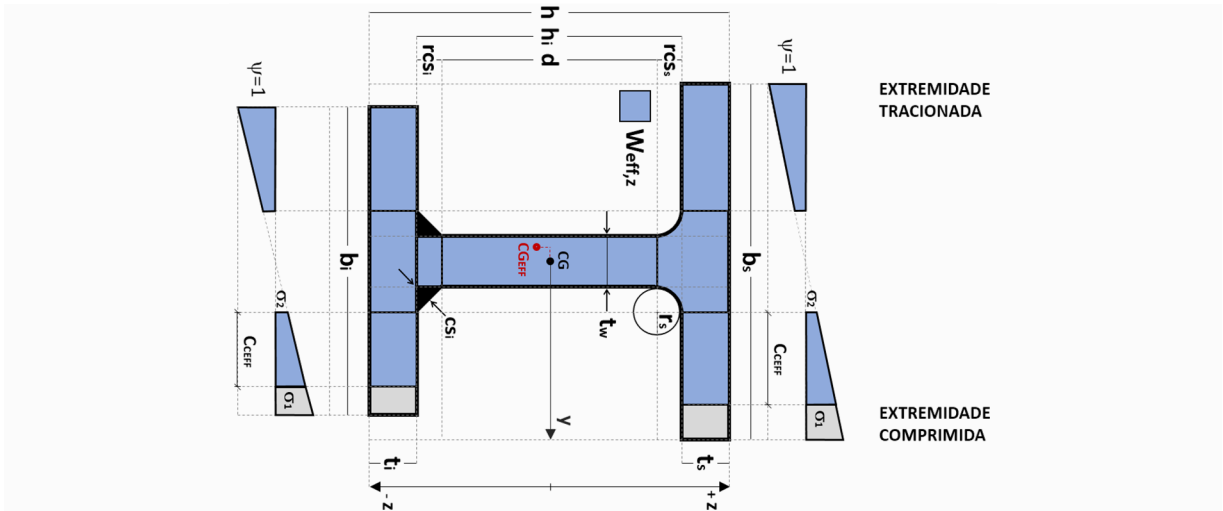


Figura 4.12 – Secção efetiva determinada supondo a secção bruta sujeita apenas a um momento fletor em relação ao eixo z: cálculo de $W_{eff,z}$.

$$\begin{aligned}
 I_{z,eff} = & \frac{t_s b_{s,eff}^3}{12} + t_s b_{s,eff} \times (b_{s,eff}/2 - y_{cg,eff})^2 + \frac{t_i \cdot b_{i,eff}^3}{12} + t_i b_{i,eff} \times (b_{i,eff}/2 - y_{cg,eff})^2 \\
 & + \frac{h_i t_w^3}{12} + h_i t_w \times (b_s/2 - y_{cg,eff})^2 \\
 & + 2 \cdot (11/2100) \cdot r_s^4 + 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot r_s^2 \times \left(b_s/2 - t_w/2 - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} \cdot r_s - y_{cg,eff} \right)^2 \\
 & + 2 \cdot (11/2100) \cdot r_i^4 + 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot r_i^2 \times \left(b_s/2 - t_w/2 - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} \cdot r_i - y_{cg,eff} \right)^2
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Considera-se para este cálculo o valor da posição do centro de gravidade $y_{cg,eff}$ correspondente à secção efetiva determinada de acordo com a Figura 4.12.

As considerações tomadas nesta secção são válidas para o caso de momento fletor M_z positivo e $b_s \geq b_i$. São adaptadas de forma análoga para o caso de M_z negativo e/ou $b_s < b_i$.

4.8 Verificação de segurança da secção transversal em ELU

A resistência da secção transversal em relação aos estados limite últimos é verificada no Interface III da ferramenta de cálculo (ver 3.7).

4.8.1 Esforço axial de tração (N_t)

O valor de cálculo do esforço normal resistente à tração, $N_{t,Rd}$, é dado, de acordo com a secção 6.2.3 da NP EN 1993-1-1 [1], pela Equação (4.31).

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} \tag{4.31}$$

4.8.2 Esforço axial de compressão (N_c)

O valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão, $N_{c,Rd}$, é dado, de acordo com as expressões 6.10 e 6.11 da NP EN 1993-1-1 [1], pelas Equações (4.32) e (4.33).

$$N_{c,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} \text{ para secções transversais das Classes 1, 2 ou 3} \quad (4.32)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \text{ para secções transversais da Classe 4} \quad (4.33)$$

A área efetiva (A_{eff}) da secção transversal é determinada de acordo com a secção 4.7.4 deste documento.

No caso de secções da Classe 4 com banzos diferentes deverá ser tomado em consideração o momento adicional $\Delta M_{y,Ed}$ (Equação (4.20)) devido ao afastamento e_{Nz} (Equação (4.27)) entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva e bruta. Neste caso, a situação deverá ser abordada como um problema de flexão composta de acordo com a secção 4.8.6 deste documento.

4.8.3 Esforço transversal (V)

A verificação de segurança em relação à resistência das secções transversais ao esforço transversal é feita de acordo com a secção 6.2.6 da NP EN 1993-1-1 [1].

4.8.3.1 Secções das Classes 1, 2 ou 3

O valor de cálculo do esforço transversal plástico resistente é calculado a partir da Equação (4.34).

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \text{ para secções transversais das Classes 1, 2 ou 3} \quad (4.34)$$

Em que: A_v – área resistente ao esforço transversal: A_{vz} (se considerado o esforço transversal V_z) ou A_{vy} (se considerado o esforço transversal V_y).

4.8.3.2 Secções da Classe 4

O valor de cálculo do esforço transversal elástico resistente é calculado, relativamente a um ponto crítico da secção transversal, a partir da Equação (4.35).

$$V_{el,Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \times \frac{I \times t}{S} \text{ para secções transversais da Classe 4} \quad (4.35)$$

em que:

- S momento estático, relativamente ao eixo principal da secção, da parte da secção transversal situada entre o ponto crítico considerado e a fronteira da secção;
- I momento de inércia da secção total (Equação (4.12) ou (4.13));
- t espessura da secção no ponto considerado.

Os parâmetros a considerar no cálculo são identificados na Figura 4.13 em função da direção do esforço transversal atuante considerado. Ainda na mesma figura é identificada a linha sobre a qual se consideram situados os pontos críticos da secção transversal. O momento estático S é relativo ao eixo principal da secção e corresponde á área pintada a azul.

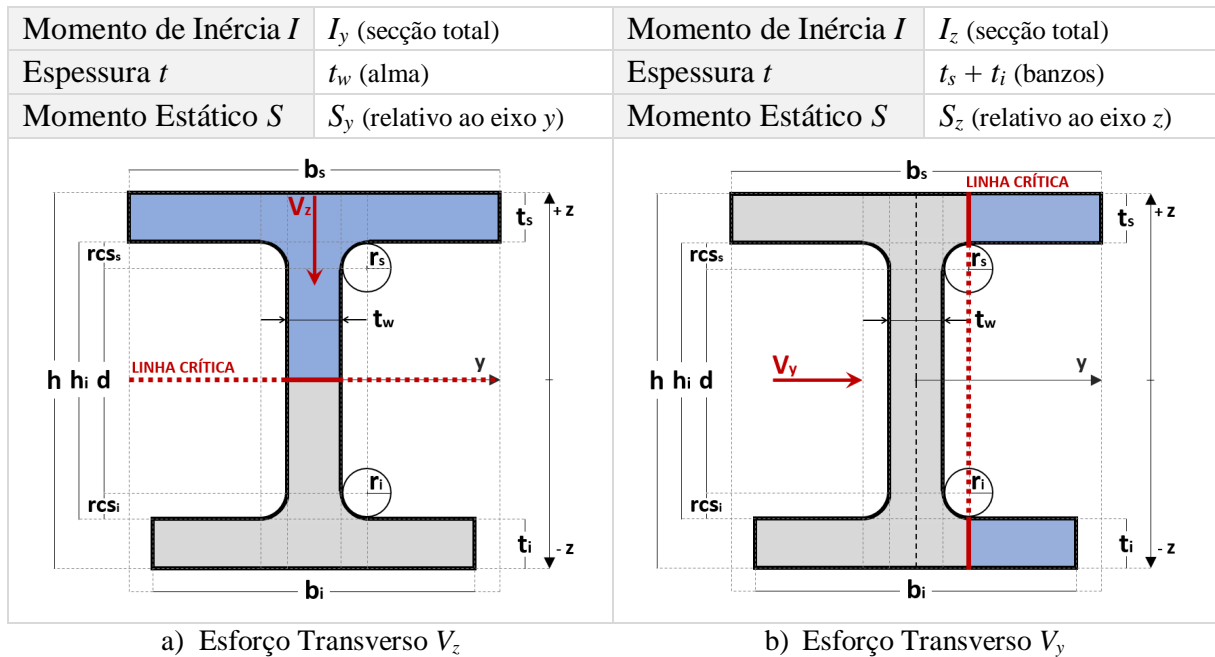


Figura 4.13 – Parâmetros a considerar para determinação do esforço transversal elástico resistente em função da direção considerada.

4.8.4 Esforço de Flexão (M_y ou M_z)

O valor de cálculo do momento fletor resistente em relação aos eixos y ($M_{y,Rd}$) e z ($M_{z,Rd}$) é dado, respetivamente, pelas Equações (4.36) e (4.37), de acordo com a secção 6.2.5 da NP EN 1993-1-1 [1].

$$M_{y,Rd} = \frac{W_y f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.36)$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_z f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.37)$$

Em que: W – módulo de flexão adequado considerado do seguinte modo: $W = W_{pl}$ para secções transversais das Classes 1 ou 2; $W = W_{el}$ para secções transversais da Classe 3; $W = W_{eff}$ para secções transversais da Classe 4.

É calculado o módulo de flexão efetivo, W_{eff} , da secção transversal, de acordo com as secções 4.7.5 ou 4.7.6 deste documento.

4.8.5 Esforço de flexão com esforço transversal ($M_y + V_z$ ou $M_z + V_y$)

Na presença de esforço transversal, os seus efeitos deverão ser tomados em consideração no cálculo do momento fletor resistente – NP EN 1993-1-1 (6.2.8) e (6.2.10) [1], exceto quando cumprido o critério na Equação (4.38).

$$V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd} \quad (4.38)$$

O critério deve ser verificado de forma independente para os casos de consideração do esforço transversal nas direções z (V_z) e y (V_y).

O efeito do esforço transversal V_z é tido em conta no cálculo do momento fletor resistente $M_{y,Rd}$ da secção transversal, adotando, na área resistente ao esforço transversal A_{vz} , uma tensão de cedência reduzida, $f'_{y,z}$ ($A_{v,z}$), de acordo com a Equação (4.39) – NP EN 1993-1-1 6.2.8(3) [1].

$$f'_{y,z}(A_{v,z}) = (1 - \rho) \times f_y \quad \text{em que} \quad \rho = \left(\frac{2 V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4.39)$$

O valor de $V_{pl,z,Rd}$ é determinado de acordo com 4.8.3.1. A área resistente ao esforço transversal $A_{v,z}$ (com tensão de cedência $f'_{y,z}$ ($A_{v,z}$) que se abrevia em $f'_{y,z}$) e a área restante $A_{r,z}$ (com tensão de cedência f_y) são definidas de acordo com a Figura 4.14.

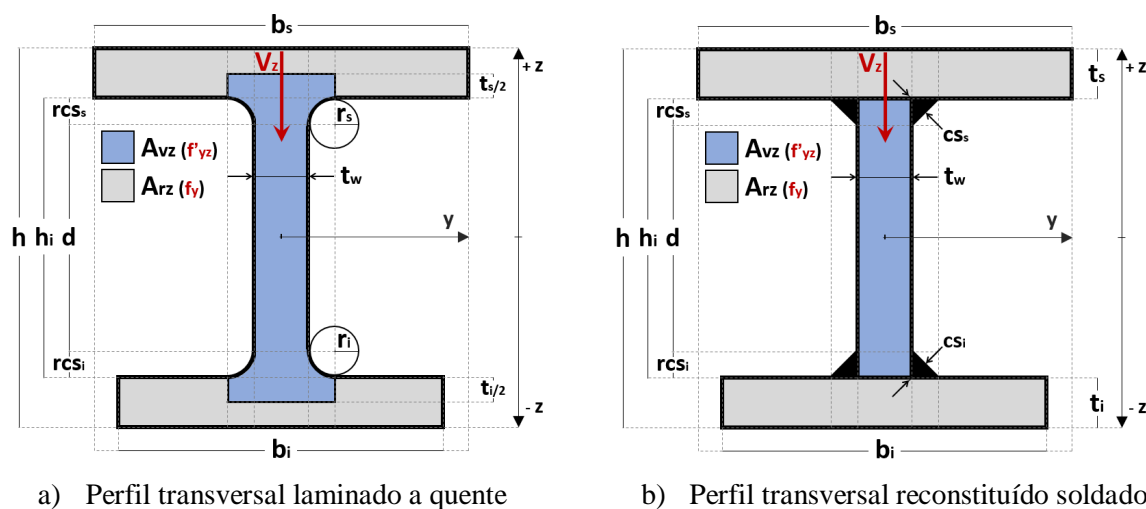


Figura 4.14 – Área resistente ao esforço transversal, A_{vz} , e área restante, A_{rz} .

O efeito do esforço transversal V_y é tido em conta no cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ da secção transversal, adotando, na área resistente ao esforço transversal $A_{v,y}$, uma tensão de cedência reduzida, $f'_y(A_{v,y})$, de acordo com a Equação (4.40) – NP EN 1993-1-1 6.2.8(3) [1].

$$f'_y(A_{v,y}) = (1 - \rho) \times f_y \quad \text{em que} \quad \rho = \left(\frac{2 V_{y,Ed}}{V_{pl,y,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4.40)$$

O valor de $V_{pl,y,Rd}$ é determinado de acordo com 4.8.3.1. A área resistente ao esforço transversal $A_{v,y}$ (com tensão de cedência $f'_y(A_{v,y})$, que se abrevia em $f'_{y,y}$) e a área restante $A_{r,y}$ (com tensão de cedência f_y) são definidas de acordo com a Figura 4.15.

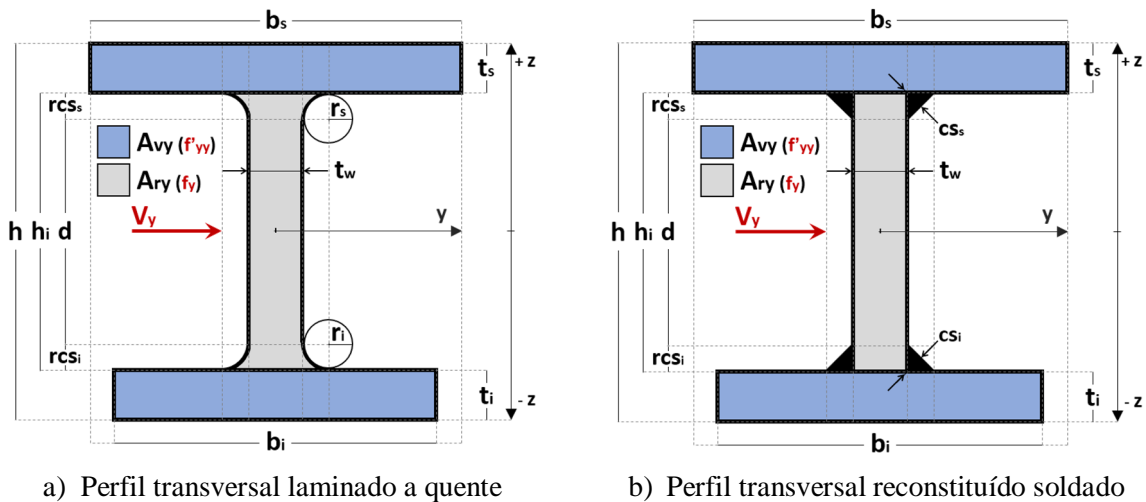


Figura 4.15 – Área resistente ao esforço transversal, $A_{v,z}$, e área restante, $A_{r,z}$.

O cálculo do momento fletor resistente em torno do eixo considerado reduzido pela interação com o correspondente esforço transversal passa pela aplicação da Equação geral (4.41).

$$M_{V,pl,Rd} = \frac{W_s f_y + W_v f'_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.41)$$

em que:

- W_v módulo de flexão relativo à área resistente ao esforço transversal (A_v) em torno do eixo considerado;
- W_r módulo de flexão relativo à área restante (A_r) em torno do eixo considerado.

Os módulos de flexão adequados, W_v e W_r , são considerados do seguinte modo:

- $W_{pl,v}$ e $W_{pl,r}$ para o caso de secções transversais das Classes 1 e 2 - secção 4.8.5.1.
- $W_{el,v}$ e $W_{el,r}$ para o caso de secções transversais da Classe 3 - secção 4.8.5.2.
- $W_{eff,v}$ e $W_{eff,r}$ para o caso de secções transversais da Classe 4 - secção 4.8.5.3.

4.8.5.1 Módulos de flexão $W_{pl,v}$ e $W_{pl,r}$ - Secções das Classes 1 e 2

O módulo de flexão plástico, W_{pl} , relativo a uma determinada área e em torno de determinado eixo, é igual ao somatório dos momentos estáticos, S , em relação ao mesmo eixo, dos subelementos de área que a constituem (Equação (4.42)).

$$W_{pl} = \sum S_i = \sum A_i |y_{Gi}| \quad (4.42)$$

em que:

S_i momento estático da área do elemento i ;

A_i área do elemento i ;

y_{Gi} distância do centro de gravidade do elemento i ao eixo neutro plástico.

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo y , em regime plástico, é definido em coerência com a Figura 4.16.

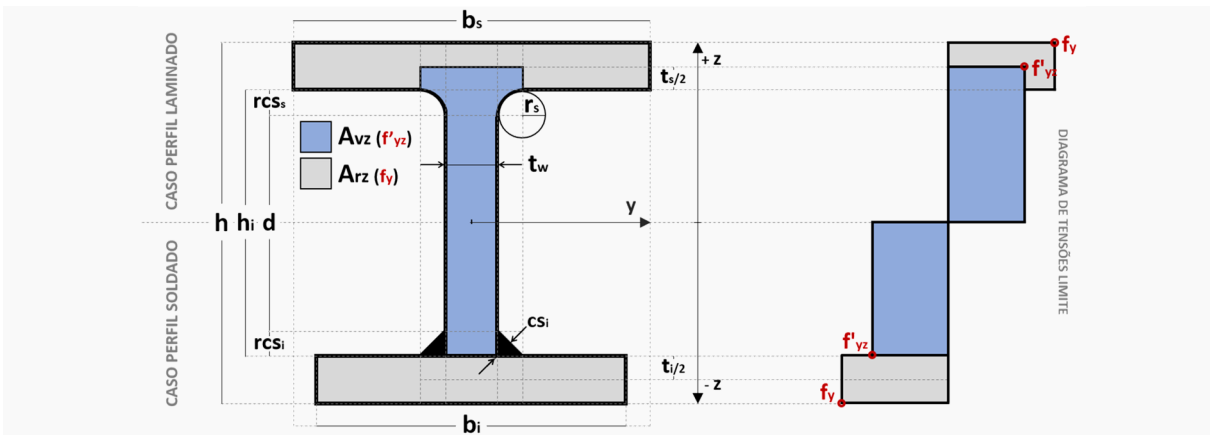


Figura 4.16 – Diagrama plástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz} . Flexão em torno do eixo y .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.16 os seguintes parâmetros:

$W_{pl,y,v}$ módulo de flexão plástico em torno do eixo y , relativo á área A_{vz} .

$W_{pl,y,r}$ módulo de flexão plástico em torno do eixo y , relativo á área A_{rz} .

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo z , em regime plástico, é definido em coerência com a Figura 4.17.

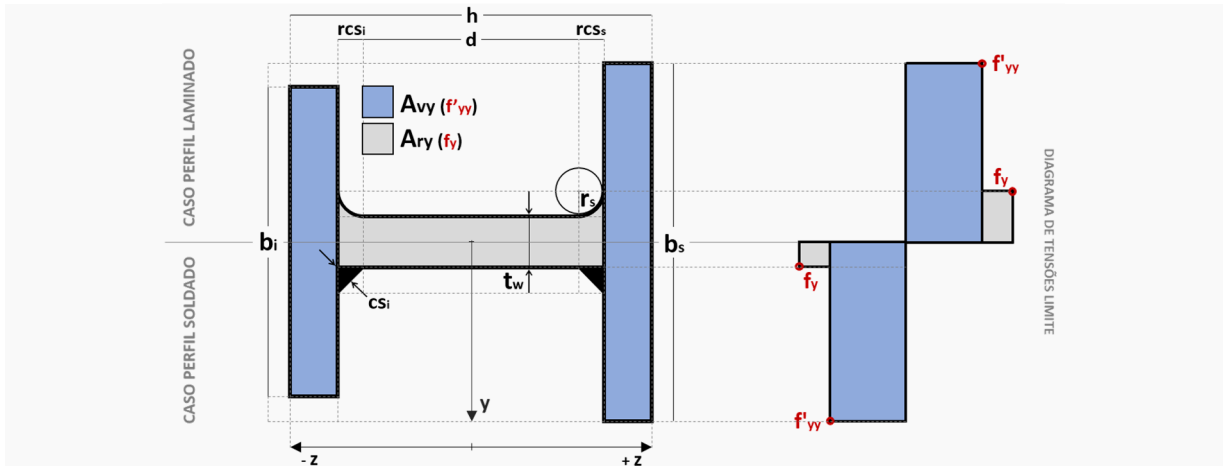


Figura 4.17 – Diagrama plástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy} . Flexão em torno do eixo z .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.17 os seguintes parâmetros:

- $W_{pl,z,v}$ módulo de flexão plástico em torno do eixo z , relativo á área A_{vy} .
- $W_{pl,z,r}$ módulo de flexão plástico em torno do eixo z , relativo á área A_{ry} .

4.8.5.2 Módulos de flexão $W_{el,v}$ e $W_{el,r}$ - Secções da Classe 3

O módulo de flexão elástico, W_{el} , relativo a uma determinada área e em torno de determinado eixo, é a relação entre o momento de inércia I dessa área em relação a esse eixo e a distância v do ponto onde a tensão elástica é mais elevada ao mesmo eixo (Equação (4.43)).

$$W_{el} = I/v \tag{4.43}$$

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo y , em regime elástico, é definido em coerência com a Figura 4.18.

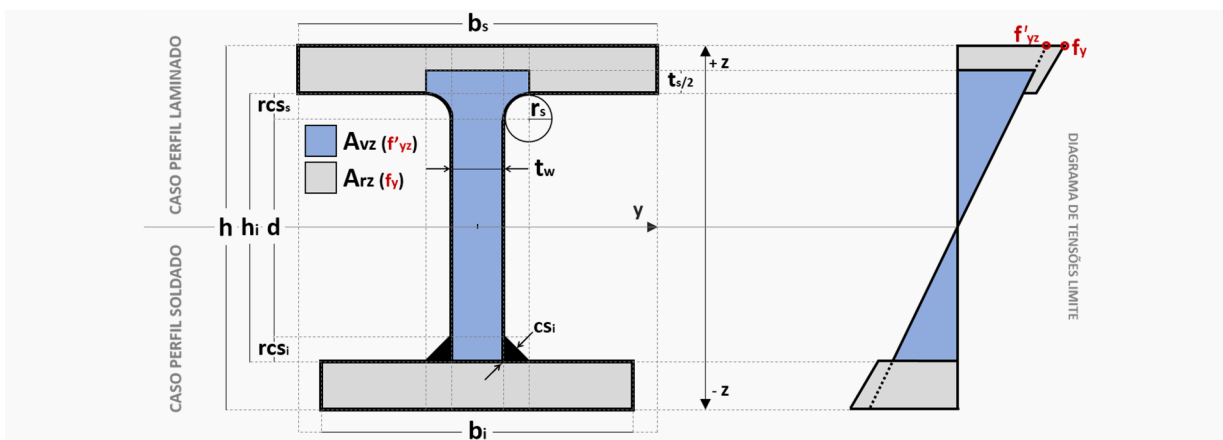


Figura 4.18 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz} . Flexão em torno do eixo y .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.18 os seguintes parâmetros:

$W_{el,y,v}$ módulo de flexão elástico em torno do eixo y , relativo á área A_{vz} .

$W_{el,y,r}$ módulo de flexão elástico em torno do eixo y , relativo á área A_{rz} .

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo z , em regime elástico, é definido em coerência com a Figura 4.19.

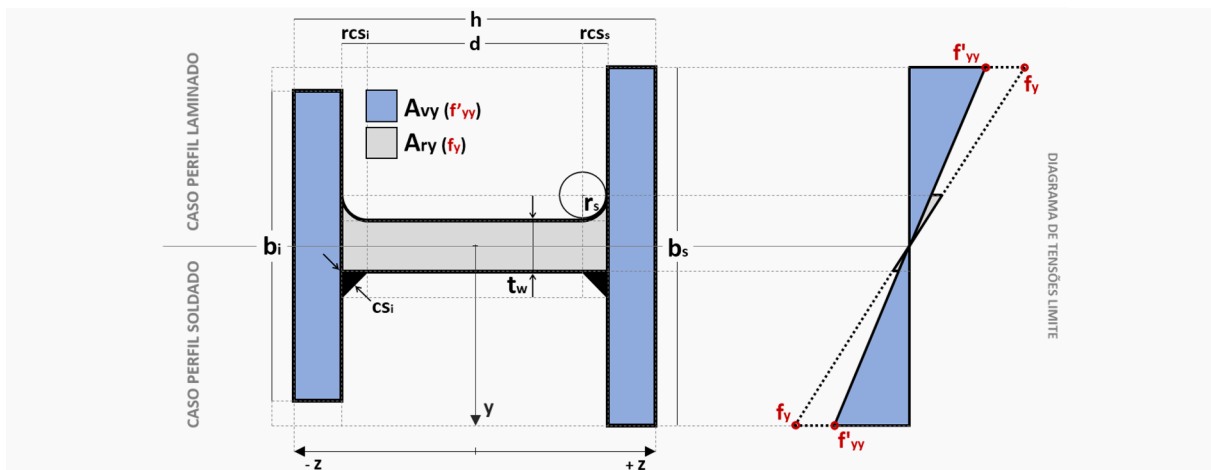


Figura 4.19 – Diagrama elástico de tensões limite na secção transversal considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy} . Flexão em torno do eixo z .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.19 os seguintes parâmetros:

$W_{el,z,v}$ módulo de flexão elástico em torno do eixo z , relativo á área A_{vy} .

$W_{el,z,r}$ módulo de flexão elástico em torno do eixo z , relativo á área A_{ry} .

4.8.5.3 Módulos de flexão $W_{eff,v}$ e $W_{eff,r}$ - Secções da Classe 4

A determinação do momento fletor resistente, reduzido pela interação com o esforço transversal atuante, de secções transversais da Classe 4, é um cálculo em regime elástico que se sustenta nos mesmos princípios propostos na secção anterior para o caso de secções da Classe 3. A consideração das áreas resistente ao esforço transversal A_v e restante A_r deve, no entanto, ter em conta as correspondentes reduções da secção transversal bruta de acordo com 4.7.

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo y , em regime elástico, é definido em coerência com a Figura 4.20. A secção efetiva considerada é determinada de acordo com 4.7.5.

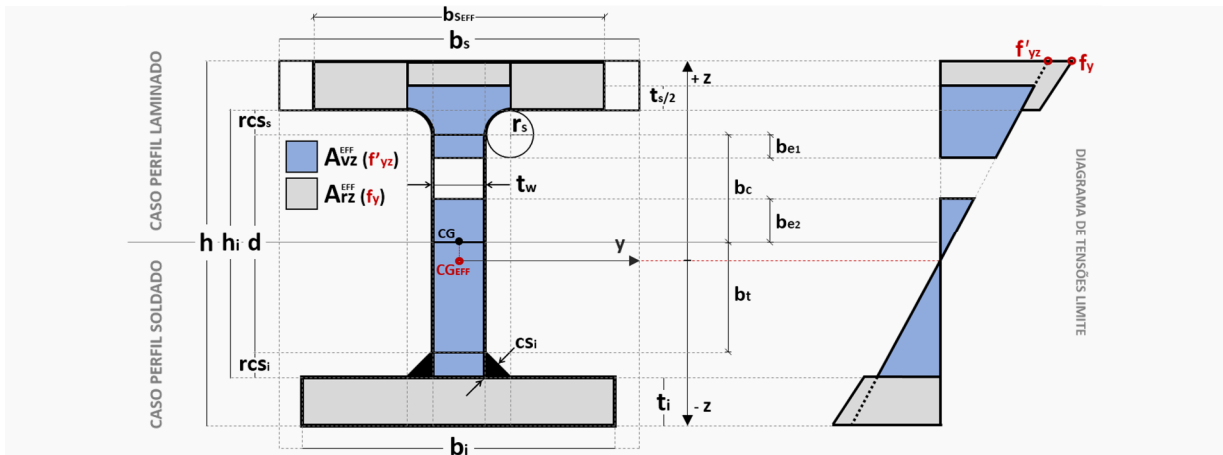


Figura 4.20 – Diagrama elástico de tensões limite na seção transversal efetiva considerando redução da tensão de cedência na área A_{vz}^{EFF} . Flexão em torno do eixo y .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.20 os seguintes parâmetros:

- $W_{eff,y,v}$ módulo de flexão efetivo em torno do eixo y , relativo á área A_{vz}^{EFF} .
- $W_{eff,y,r}$ módulo de flexão efetivo em torno do eixo y , relativo á área A_{rz}^{EFF} .

O diagrama de tensões limite relativo à flexão em torno do eixo z , em regime elástico, é definido em coerência com a Figura 4.21. A seção efetiva considerada é determinada de acordo com 4.7.6.

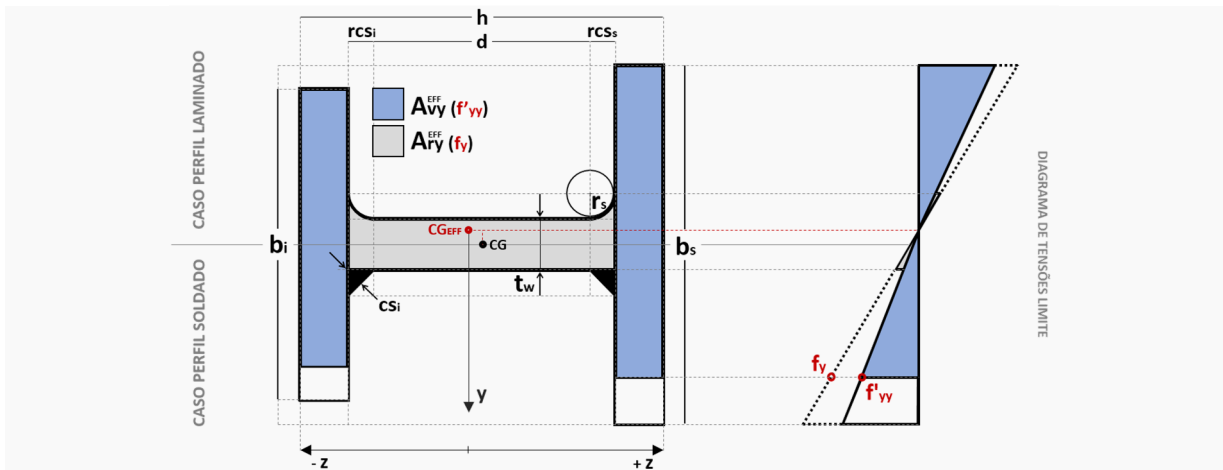


Figura 4.21 – Diagrama elástico de tensões limite na seção transversal efetiva considerando redução da tensão de cedência na área A_{vy}^{EFF} . Flexão em torno do eixo z .

Deduzem-se a partir do esquema na Figura 4.21 os seguintes parâmetros:

- $W_{eff,z,v}$ módulo de flexão efetivo em torno do eixo z , relativo á área A_{vy}^{EFF} .
- $W_{eff,z,r}$ módulo de flexão efetivo em torno do eixo z , relativo á área A_{ry}^{EFF} .

4.8.6 Flexão composta com esforço transversal ($M_y + V_z + N$ ou $M_z + V_y + N$)

4.8.6.1 Secções transversais duplamente simétricas das Classes 1 e 2

Na presença de esforço normal, o seu efeito no cálculo do momento fletor resistente plástico deve ser tomado em consideração de acordo com a secção 6.2.9 da NP EN 1993-1-1.

Dispensa-se a consideração do efeito do esforço normal no cálculo do momento fletor resistente plástico, em relação ao eixo y , quando é satisfeito o critério na Equação (4.44).

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad \cap \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.44)$$

Dispensa-se a consideração do efeito do esforço normal no cálculo do momento fletor resistente plástico, em relação ao eixo z , quando é satisfeito o critério na Equação (4.45).

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.45)$$

O momento fletor resistente plástico em torno do eixo y , reduzido pela interação com o esforço normal, é calculado de acordo com a Equação (4.46).

$$M_{N,y,Rd} = \underline{M_{pl,y,Rd}}(1-n)/(1-0,5a) \quad \text{mas} \quad M_{N,y,Rd} \leq \underline{M_{pl,y,Rd}} \quad (4.46)$$

Em que: $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$; $a = (A - 2b_{tf})/A$ mas $a \leq 0,5$.

O momento fletor resistente plástico em torno do eixo z , reduzido pela interação com o esforço normal, é calculado de acordo com as Equações (4.47) ou (4.48).

$$M_{N,z,Rd} = \underline{M_{pl,z,Rd}} \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad \text{para } n > a \quad (4.47)$$

$$M_{N,z,Rd} = \underline{M_{pl,z,Rd}} \quad \text{para } n \leq a \quad (4.48)$$

Os efeitos da presença de esforço transversal são considerados substituindo nas Equações (4.46) a (4.48) os valores dos momentos fletores resistentes (M_{pl} , neste caso – sublinhados a azul nas equações) pelos correspondentes valores reduzidos pela interação com o esforço transversal de acordo com 4.8.5 (ou seja, $M_{V,pl}$). Designa-se o valor do momento fletor plástico resistente reduzido pela interação com os esforços axial e transversal por $M_{NV,pl,Rd}$.

4.8.6.2 Outras secções transversais

Para o caso de secções transversais não duplamente simétricas das Classes 1 e 2 e secções transversais das Classes 3 e 4, a verificação é realizada de acordo com o estabelecido para verificação à flexão composta desviada na secção 4.8.7 deste documento.

4.8.7 Flexão composta desviada ($M_y + M_z + N$)

4.8.7.1 Secções transversais duplamente simétricas das Classes 1 e 2

A segurança é verificada se for satisfeito o critério na Equação (4.49).

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N_{pl,y,Rd}}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N_{pl,z,Rd}}} \right]^\beta \leq 1,0 \quad (4.49)$$

Em que: $\alpha = 2$; $\beta = 5n$, mas $\beta \geq 1$; $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$.

4.8.7.2 Secções transversais assimétricas das Classes 1 e 2

Para o caso de secções transversais das Classes 1 e 2 com banzos diferentes não é aplicável a Equação (4.49). Considera-se verificada a segurança se satisfeito o critério na Equação (4.50).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.50)$$

4.8.7.3 Secções transversais da Classe 3

A segurança é verificada se for satisfeito o critério na Equação (4.51).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed,y}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.51)$$

4.8.7.4 Secções transversais da Classe 4

A segurança é verificada se for satisfeito o critério na Equação (4.52).

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed,y} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{eff,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{eff,z,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.52)$$

O cálculo da Área Efetiva (A_{eff}), do Módulo de Flexão Efetivo (W_{eff}), e das excentricidades (e_{Ny} e e_{Nz}), é realizado de acordo com a secção 4.7 deste documento.

4.8.8 Flexão composta desviada com esforço transversal ($M_y + M_z + N + V$)

Os efeitos da presença de esforço transversal são tidos em conta no cálculo dos momentos flectores resistentes da secção transversal.

A verificação da resistência da secção transversal à flexão composta desviada com esforço transversal é feita de acordo com a secção 4.8.7 deste documento. Para esse efeito, são substituídos os valores dos momentos flectores resistentes $M_{pl,Rd}$, $M_{el,Rd}$ e $M_{eff,Rd}$, nas expressões (4.50), (4.51) e (4.52), respetivamente, pelos correspondentes valores dos momentos flectores

resistentes reduzidos pela interação com o esforço transversal de acordo com 4.8.5 ($M_{V,pl,Rd}$, $M_{V,el,Rd}$ e $M_{V,eff,Rd}$).

Para o caso específico de secções transversais bissimétricas das Classes 1 ou 2 o valor de $M_{Npl,Rd}$, na Equação (4.49), é calculado de acordo com 4.8.6.1 atendendo às considerações dispostas no último parágrafo dessa secção para a consideração do efeito da presença do esforço transversal. Substitui-se portanto $M_{N,pl,Rd}$ pelo correspondente $M_{NV,pl,Rd}$.

4.9 Encurvadura (varejamento)

Verifica-se a segurança á encurvadura se o esforço axial de compressão atuante, N_{Ed} , for inferior ou igual ao esforço axial resistente á compressão com encurvadura, $N_{b,Rd}$, calculado de acordo com as Equações (4.53) ou (4.54).

O procedimento é repetido pela ferramenta de cálculo para verificação aos modos de encurvadura em relação aos eixos y e z.

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \text{ para secções transversais das Classes 1, 2 ou 3.} \quad (4.53)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \text{ para secções transversais da Classe 4.} \quad (4.54)$$

O fator de redução, χ , para cada modo de encurvadura, é calculado aplicando a Equação (4.55).

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (4.55)$$

Em que: $\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$

O fator de imperfeição, α , é determinado, para cada modo de encurvadura, por um algoritmo cujos procedimentos são coerentes com o Quadro 6.2 da NP EN 1993-1-1 [1] apresentado na Figura 4.22 (editado). No caso de perfis laminados com banzos diferentes é considerado pela ferramenta, para efeitos de determinação do fator de imperfeição, o banzo com maior largura, b (tomando em conta a correspondente espessura, t). No caso de perfis soldados com banzos diferentes é considerado, para o mesmo efeito, o banzo com maior espessura, t .

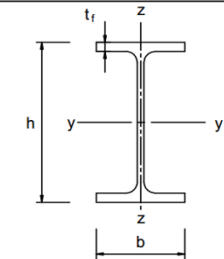
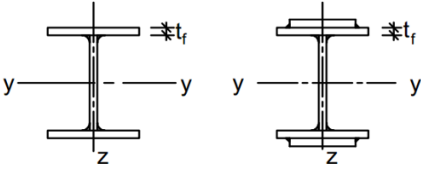
Secção transversal		Limites	Encurvadura em relação ao eixo	Encurvadura				
				Curva	α	Curva	α	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460			
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	0,21 0,34	a_0 a_0	0,13 0,13
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	0,34 0,49	a a	0,21 0,21
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	0,34 0,49	a a	0,21 0,21
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	0,76 0,76	c c	0,49 0,49
Perfis I soldados			$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	0,34 0,49	b c	0,34 0,49
			$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	0,49 0,76	c d	0,49 0,76

Figura 4.22 – Escolha do valor do fator de imperfeição, α , em função da curva de encurvadura – Quadro 6.2 da NP EN 1993-1-1 [1] (editado).

O valor da esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}$, para cada modo de encurvadura, é determinado de acordo com as Equações (4.56) ou (4.57).

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \text{ para secções transversais das Classes 1, 2 ou 3.} \quad (4.56)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{\sqrt{A_{eff}/A}}{\lambda_1} \text{ para secções transversais da Classe 4.} \quad (4.57)$$

em que:

A área total da secção transversal;

A_{eff} área efetiva da secção transversal (consultar secção 4.7.4 deste documento);

λ_1 esbelteza de referência, calculada através de $\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y}$

L_{cr} e i comprimento de encurvadura e raio de giração, respetivamente, referentes ao modo de encurvadura a ser verificado.

4.10 Encurvadura lateral (bambeamento)

Elementos em flexão são verificados à encurvadura lateral de acordo com a secção 6.3.2 da NP EN 1993-1-1 [1] (Equação (4.58)).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.58)$$

Em que: W_y – módulo de flexão adequado considerado do seguinte modo: $W_y = W_{pl,y}$ para secções transversais das Classes 1 ou 2; $W_y = W_{el,y}$ para secções transversais da Classe 3; $W_y = W_{eff,y}$ para secções transversais da Classe 4;

Adotam-se as expressões propostas na secção 6.3.2.2 do mesmo documento [1] para o cálculo do coeficiente de redução para a resistência à encurvadura lateral, χ_{LT} (Equação (4.59)).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mas} \quad \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (4.59)$$

Em que: $\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$

O fator de imperfeição, α_{LT} , é determinado por um algoritmo cujos procedimentos são coerentes com o Quadro 6.4 da NP EN 1993-1-1 [1] apresentado na Figura 4.23 (editado). No caso de secções com banzos diferentes é considerado, para efeitos de determinação do fator de imperfeição, o banzo com maior largura, b .

<i>Secção transversal</i>	<i>Limites</i>	<i>Curva de encurvadura</i>	α_{LT}
<i>Secções em I laminadas</i>	$h/b \leq 2$	a	0,21
	$h/b > 2$	b	0,34
<i>Secções em I soldadas</i>	$h/b \leq 2$	c	0,49
	$h/b > 2$	d	0,76

Figura 4.23 – Escolha do valor do fator de imperfeição, α_{LT} , em função da curva de encurvadura – Quadro 6.4 da NP EN 1993-1-1 (editado).

O valor da esbelteza adimensional, $\bar{\lambda}_{LT}$, é determinado de acordo com a Equação (4.60).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (4.60)$$

em que:

M_{cr} momento crítico elástico para a encurvadura lateral, determinado de acordo com a secção 4.10.1 deste documento;

W_y módulo de flexão adequado considerado de forma coerente com o considerado na Equação (4.58).

4.10.1 Cálculo do momento crítico (M_{cr})

A quantificação do momento crítico para a encurvadura lateral, M_{cr} , é realizada de acordo com a proposta por Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6], utilizando a Equação (4.61), e requer a

quantificação de um conjunto de parâmetros para a qual é necessária a intervenção por parte do utilizador no Interface IV da ferramenta *AciariUM* (ver 3.8.2).

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z l)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} \quad (4.61)$$

Os parâmetros E e G são propriedades do material (aço) definidas em 4.3.

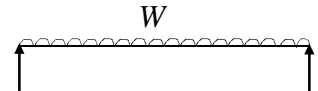
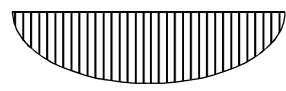
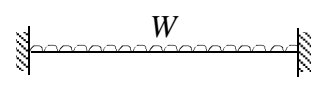
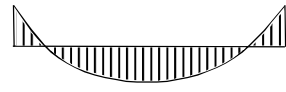
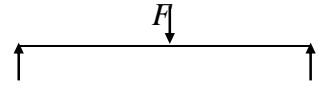
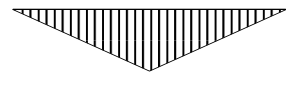
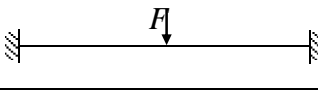
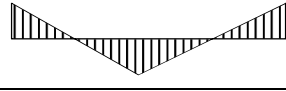
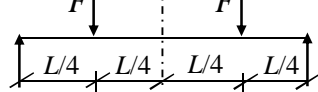
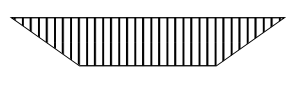
Os parâmetros I_z , I_w e I_T são propriedades mecânicas da secção transversal definidas em 4.4.2.

O comprimento l corresponde à distância entre secções lateralmente contraventadas, considerando para o efeito o contraventamento do banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y , uma vez que é este aquele que é suscetível de sofrer do fenómeno de instabilidade em causa.

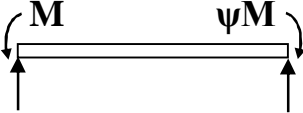
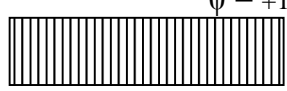
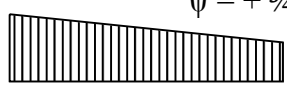


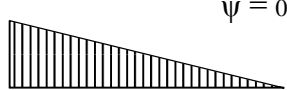
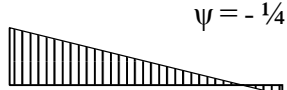


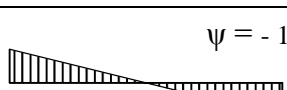
Os fatores de comprimento efetivo k_z e k_w dependem das condições de suporte nas secções de extremidade do segmento de barra correspondente ao comprimento l : o fator k_z refere-se a rotações das secções extremas em torno do eixo de menor inércia z ; o fator k_w refere-se à restrição ao empenamento nas mesmas secções. Os fatores k_z e k_w variam entre 0,5 (deformações impedidas) e 1,0 (deformações livres), sendo iguais a 0,7 no caso de deformações livres numa extremidade e impedidas na outra. Na maior parte as situações práticas estas restrições são apenas parciais, razão pela qual se recomenda conservativamente $k_z = k_w = 1,0$ [6].

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , que têm em conta a distribuição de momentos, definem-se com base no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 a – Atribuição de valores aos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 (Parte 1).

Condições de apoio e carregamento	Diagrama de Momentos Fletores	Valor de k_z	Coeficientes		
			C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,780 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,257 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,390

Quadro 4.2 b – Atribuição de valores aos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 (Parte 2).

Condições de apoio e carregamento	Diagrama de Momentos Fletores	Valor de k_z	Coeficientes		
			C_1	C_2	C_3
	 $\psi = +1$	1,0 0,7 0,5	1,000 1,000 1,000	---	1,000 1,113 1,144
	 $\psi = +3/4$	1,0 0,7 0,5	1,141 1,270 1,305	---	0,998 1,565 2,283
	 $\psi = +1/2$	1,0 0,7 0,5	1,323 1,473 1,514	---	0,992 1,556 2,271
	 $\psi = +1/4$	1,0 0,7 0,5	1,563 1,739 1,788	---	0,977 1,531 2,235
	 $\psi = 0$	1,0 0,7 0,5	1,879 2,092 2,150	---	0,939 1,473 2,150
	 $\psi = -1/4$	1,0 0,7 0,5	2,281 2,538 2,609	---	0,855 1,340 1,957
	 $\psi = -1/2$	1,0 0,7 0,5	2,704 3,009 3,093	---	0,676 1,059 1,546
	 $\psi = -3/4$	1,0 0,7 0,5	2,927 3,009 3,093	---	0,366 0,575 0,837
	 $\psi = -1$	1,0 0,7 0,5	2,752 3,063 3,149	---	0,000 0,000 0,000

O parâmetro z_g corresponde à coordenada em z do ponto de aplicação da carga ao nível da secção transversal, de acordo com a Figura 4.24. Recorde-se que o posicionamento z_g da carga pode produzir um efeito estabilizador ou instabilizador que se reflete, respetivamente, no aumento ou diminuição do valor de M_{cr} .

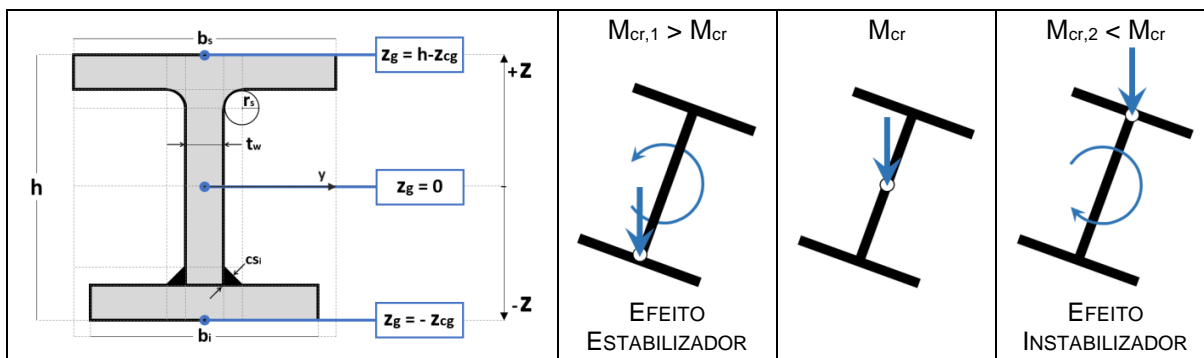


Figura 4.24 – Posição de aplicação da carga ao nível da secção transversal (z_g).

O parâmetro z_j reflete o grau de assimetria da secção transversal. É determinado automaticamente pela ferramenta de acordo com as Equações (4.62) ou (4.63). É função da geometria da secção transversal e do seu estado de solicitação.

$$z_j = 0,8 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot h_g / 2,0 \quad \text{quando } \beta_f > 0,5 \quad (4.62)$$

$$z_j = 1,0 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot h_g / 2,0 \quad \text{quando } \beta_f > 0,5 \quad (4.63)$$

Em que: h_g – distância entre os centros de corte dos banzos que, neste caso, coincidem com os seus centros de gravidade.

O parâmetro β_f é determinado de acordo com a Equação (4.64).

$$\beta_f = \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}} \quad (4.64)$$

em que:

I_{fc} momento de inércia do banzo comprimido relativamente ao eixo z ;

I_{ft} momento de inércia do banzo tracionado relativamente ao eixo z .

O momento de inércia do banzo considerado em torno do eixo z é calculado de acordo com a Equação (4.65).

$$I = \frac{t \times b^3}{12} \quad (4.65)$$

Em que: t – espessura do banzo; b – largura do banzo.

4.11 Encurvadura por esforço transversal

A verificação da resistência à encurvadura por esforço transversal em estado limite último é efetuada de acordo com a secção 5 da NP EN 1993-1-5 [3]. O método utilizado pela ferramenta *AciariUM* é limitado a casos em que a alma não possui reforços longitudinais.

Considera-se que almas não reforçadas (reforços transversais) com h_w/t superior a $72/\eta \varepsilon$ deverão possuir reforços transversais pelo menos nos apoios. Assume-se verificada a segurança em caso contrário.

Considera-se que almas reforçadas (reforços transversais) com h_w/t superior a $31/\eta \varepsilon \sqrt{k_\tau}$ deverão ser verificadas em relação à resistência à encurvadura por esforços transversal de acordo com a secção 4.8.1 deste documento. Assume-se verificada a segurança em caso contrário.

4.11.1 Valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transverso

O valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transverso é calculado, de acordo com a secção 5.2(1) da NP EN 1993-1-5 [3], através da Equação (4.66).

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (4.66)$$

Em que: $V_{bw,Rd}$ e $V_{bf,Rd}$ – contribuição da alma e dos banzos, respetivamente, para a resistência à encurvadura por esforço transverso.

4.11.2 Contribuição da alma ($V_{bw,Rd}$)

A contribuição da alma, $V_{bw,Rd}$, é calculada de acordo com a Equação (4.67).

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (4.67)$$

O parâmetro χ_w é determinado de acordo com o Quadro 5.1 - NP EN 1993-1-5 [3] (Figura 4.25).

	Reforço de extremidade rígido	Reforço de extremidade não rígido
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

Figura 4.25 – Contribuição da alma χ_w para a resistência à encurvadura por esforço transverso – Quadro 5.1 da NP EN 1993-1-5.

O parâmetro de esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}_w$, é determinado pela Equação (4.68).

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{f_{yw} / \tau_{cr}} \quad (4.68)$$

Em que: $\tau_{cr} = k_\tau / \sigma_E$

O valor de σ_E é determinado a partir da Equação (4.69) considerando b igual à altura h_w da alma e t igual à espessura t_w da alma.

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) b^2} \text{ em [MPa]} \quad (4.69)$$

O coeficiente de encurvadura por corte, k_τ , é obtido através das Equações (4.70) ou (4.71). Coerente com as limitações do método que se apresenta neste capítulo será admitir $k_{\tau sl} = 0$, o equivalente a considerar que a alma não possui reforços longitudinais.

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 (h_w/a)^2 + k_{\tau sl} \text{ quando } a/h_w \geq 1 \quad (4.70)$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 5,34 (h_w/a)^2 + k_{\tau sl} \text{ quando } a/h_w < 1 \quad (4.71)$$

Em que: a – distância entre reforços transversais.

4.11.3 Contribuição dos banzos, $V_{bf,Rd}$

Quando a resistência dos banzos não é totalmente utilizada na resistência ao momento fletor, ou seja, $M_{y,Ed} < M_{f,Rd}$, a contribuição desses banzos é calculada através da Equação (4.72). É considerada nula em caso contrário ($V_{bf,Rd}=0$).

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (4.72)$$

As dimensões b_f e t_f correspondem, respetivamente, á largura e espessura do banzo com menor contribuição para a resistência ao esforço normal, ou seja, o banzo com menor área. O valor de b_f é limitado a $15 \varepsilon t_f$ de cada lado da alma.

O parâmetro $M_{f,Rd} = M_{f,k} / \gamma_{M0}$ é o momento resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, determinadas tendo em conta o estado real de tensão induzido na peça pela combinação de esforços $N_{Ed} + M_{y,Ed}$.

O valor de c é determinado de acordo com a Equação (4.73).

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right) \quad (4.73)$$

4.12 Estabilidade global

Elementos em flexão composta com compressão são verificados de acordo com a secção 6.3.3 da NP EN 1993-1-1 [1] – Equações (4.74) e (4.75) deste documento.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (4.74)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (4.75)$$

Em que:

- N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respetivamente, em relação aos eixos y e z ;
- $\Delta M_{y,Ed}$ e $\Delta M_{z,Ed}$ momentos devidos ao deslocamento do eixo neutro de acordo com 4.7 para as secções da Classe 4 (ver Quadro 4.3);
- χ_y e χ_z coeficientes de redução devidos à encurvadura (varejamento), conforme 4.9;
- χ_{LT} coeficiente de redução devido à encurvadura lateral, conforme 4.10;
- k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} fatores de interação.
- N_{Rk} , $M_{y,Rk}$ e $M_{z,Rk}$ valores característicos do esforço normal e dos momentos fletores resistentes da secção transversal condicionante, respetivamente, em relação aos eixos y e z .

Os valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$ são definidos de acordo com o Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$ [1].

Classe	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Os fatores de interação k_{ij} são determinados de acordo com o Anexo A da referida norma. Nesse contexto considera-se conveniente esclarecer o método de quantificação de determinados parâmetros (Equações (4.76) a (4.80)).

- Esforço normal crítico de encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y , $N_{cr,y}$:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}} \quad (4.76)$$

- Esforço normal crítico de encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z , $N_{cr,z}$:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}} \quad (4.77)$$

- Esforço normal crítico de encurvadura elástica por torção, $N_{cr,T}$:

$$N_{cr,T} = \left[\frac{E I_w \pi^2}{L_{cr,z}^2} + G I_T \right] \times \frac{A}{I_y + I_z} \quad (4.78)$$

- Esbelteza normalizada relativa à encurvadura lateral para o caso de momento fletor uniforme $\bar{\lambda}_\theta$:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}^E}} \quad (4.79)$$

- Momento crítico elástico, M_{cr}^E :

$$M_{cr}^E = \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} \right]^{0,5} \quad (4.80)$$

Em que: os parâmetros se identificam de acordo com a secção 4.10.1 deste documento.

A definição dos coeficientes de momento uniforme equivalente $C_{m_y,0}$ e $C_{m_z,0}$, para determinação dos fatores de interação, é feita com recurso ao Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1 [1], apresentado na Figura 4.26 deste documento.

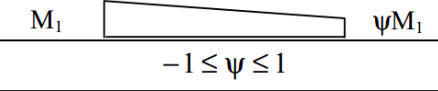
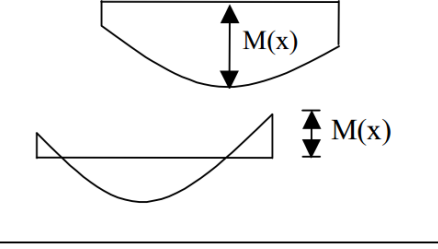
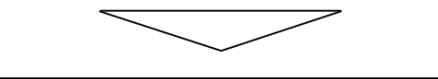

Diagrama de momentos	$C_{mi,0}$
 <p>M_1 ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
 <p>$M(x)$ $M(x)$ $M_{i,Ed}(x)$ valor máximo do momento $M_{y,Ed}$ ou $M_{z,Ed}$ correspondente a uma análise de primeira ordem δ_x flecha máxima ao longo do elemento</p>	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 E I_i \delta_x }{L^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Figura 4.26 – Determinação dos coeficientes de momento uniforme $C_{m_y,0}$ e $C_{m_z,0}$. Quadro A.2 do Anexo A da NP EN 1993-1-1.

Caso prático de estudo e validação

5.1 Enquadramento

O caso de estudo apresentado neste capítulo foi desenvolvido em colaboração com a empresa CASAIS – Engenharia e Construção, SA. Neste contexto, a ferramenta *AciariUM* é utilizada para verificação de segurança aos estados limite últimos (ELU) de um edifício projetado e construído pela referida entidade.

O presente capítulo tem dois objetivos principais:

- validar os resultados fornecidos pela ferramenta de cálculo desenvolvida confrontando-os com os resultados devolvidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para o caso de estudo referido;
- desenvolver e apresentar as estratégias de modelação e cálculo adotadas no estudo deste caso.

O edifício foi anteriormente modelado no *software CYPE 3D* e o correspondente ficheiro foi fornecido pelo projetista. A mesma estrutura foi novamente modelada no programa *Robot Structural Analysis* e os resultados dos esforços obtidos foram considerados na análise efetuada com a ferramenta *AciariUM*.

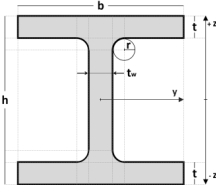
São alvo de revisão algumas opções relacionadas com a definição de comprimentos de encurvadura e parâmetros relacionados com este fenómeno de instabilidade. Assumem-se corretas as opções do projetista relativamente à consideração e quantificação de ações no processo de verificação e dimensionamento.

5.2 Apresentação do caso de estudo

5.2.1 Obra

A empreitada de construção do Estaleiro de Moçambique em Matola, no minicípio de Maputo (Moçambique), ocupa uma área de implantação de aproximadamente 23.000 m² e é constituída por doze edifícios distintos e independentes.

Quadro 5.1 – Mapa e definição geométrica das secções transversais dos elementos do “pórtico-tipo”.

Designação	Geometria	$h_{inicial}$ mm	h_{final} mm	b mm	t_w mm	t mm	r mm	cs mm	Elementos
HE 340 A		330	330	300	9,5	16,5	27	-	P_A ; P_F
PRS		660	330	160	8,0	21,0	-	-	V_{A1} ; V_{B1}
IPE 330		330	330	160	7,5	11,5	18	-	V_{A2} ; V_{B2}
IPE 450		450	450	190	9,4	14,6	21	-	V_C

Nota: Dimensões em mm; Identificação dos elementos em conformidade com a Figura 5.2.

5.2.3 Parâmetros gerais do cálculo

Os parâmetros gerais do cálculo são definidos no Interface I da ferramenta *AciariUM*.

TIPO DE AÇO CONSTITUENTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL	AÇO DA CLASSE	S275	PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL	E	210	GPa	α	1,20E-06	/ K	Redefinir NP EN 1993-1-1	COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA	γ_{M0}	1,00	Redefinir NP EN 1993-1-1	
	f_y	275		MPa	G	80,77	GPa	G_m	7850			Kg/m ³	γ_{M1}		1,00
	f_u	430		MPa	ν	0,3		η	1,20				γ_{M2}		1,25

a) Tipo de Aço.

b) Propriedades do material

c) Coef. Parciais de Segurança

Figura 5.3 – Interface I (excerto): parâmetros gerais do cálculo.

A estrutura é contruída em aço da classe S275 (Figura 5.3a).

Os valores de cálculo das propriedades do material (Figura 5.3b) e os valores numéricos recomendados para os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} para edifícios (Figura 5.3c) são definidos de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1].

5.2.4 Ações atuantes

A informação nesta secção está de acordo com a memória descritiva e justificativa do projeto de estabilidade da obra.

É considerado o seguinte conjunto de cargas permanentes atuante na estrutura:

- Peso próprio do aço constituinte dos elementos estruturais (G_{k1}): 78,5 kN/m³.
- Restantes cargas permanentes (G_{k2}) – correspondentes ao peso próprio da cobertura, revestimentos e pavimentos, de acordo com o Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Restantes cargas permanentes (cobertura, revestimentos e pavimento).

Designação	Carga uniformemente distribuída	Unidade
Cobertura e Revestimento em Chapa Sandwich ⁽¹⁾	0,2 ⁽¹⁾	
Pavimento/Outros plataforma do Piso “Mezanine”	4,1	kN/m ²
Piso 0	4,0	

(1) carga uniformemente distribuída vertical aplicada aos “painéis” da cobertura, das fachadas e laterais.

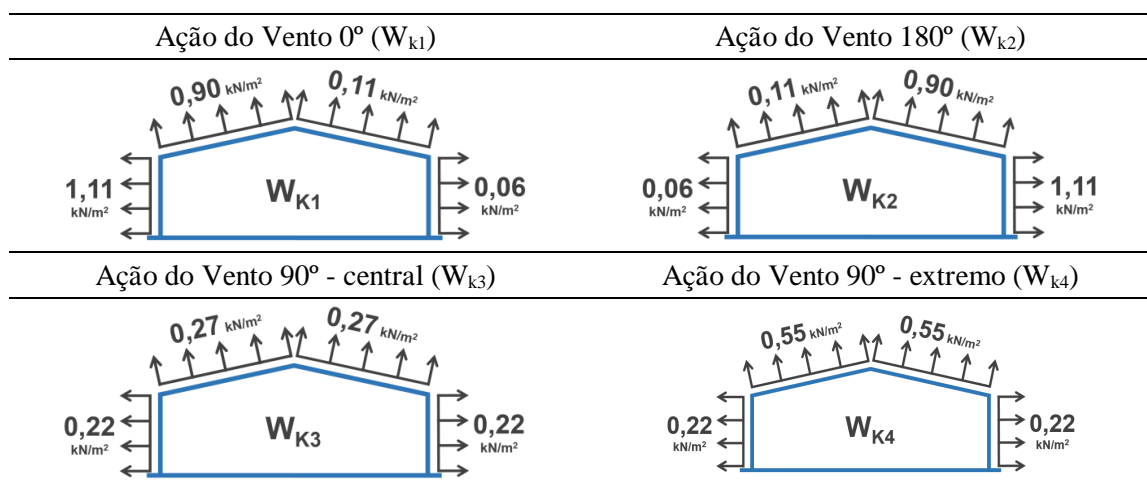
Os valores característicos das sobrecargas a considerar são definidos de acordo com o Regulamento de Segurança e Ações para Edifícios e Pontes (R.S.A.) [16]:

- Sobrecarga na cobertura: $0,3 \text{ kN/m}^2$ (Q_{k1});
- Sobrecarga na Plataforma do Piso “*Mezanine*”: 5 kN/m^2 (Q_{k2});
- Sobrecarga no Piso 0: $3,0 \text{ kN/m}^2$;

A quantificação da ação do vento é feita considerando quatro situações distintas (Quadro 5.3):

- A ação do vento é quantificada de acordo com o R.S.A. [16] adotando os seguintes parâmetros de cálculo: zona B; rugosidade aerodinâmica do Solo Tipo II; pressão dinâmica do vento (W_k) variável em altura. Os coeficientes de forma para paredes e cobertura a aplicar são os especificados no Anexo I do RSA. Os valores no Quadro 5.3 foram recolhidos do modelo fornecido pelo projetista.

Quadro 5.3 – Ação do vento no edifício em kN/m^2 - situações.



5.2.5 Combinações de ações

Designa-se por “Ação Permanente” (G_k) o grupo $G_{k1} + G_{k2}$. Designa-se por “Sobrecarga” (Q_k) o grupo $Q_{k1} + Q_{k2}$. Não é admitida a hipótese de atuação do vento (Q_k) em várias direções, em simultâneo.

As combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias (combinações fundamentais) são geradas de acordo com o disposto na secção 6.4.3.2 do regulamento NP EN 1990 [4]. O formato geral dos efeitos das ações deverá ser (Equação (5.1)):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{5.1}$$

em que:

- “+” significa “a combinar com”;
- “ \sum ” significa “o efeito combinado de”;

- $G_{k,j}$ valor característico da ação permanente j ;
- $Q_{k,l}$ valor característico da ação variável de base da combinação;
- γ_{Gj} coeficiente parcial relativo à ação permanente j ;
- γ_{Qi} coeficiente parcial relativo à ação variável i ;
- $\psi_{0,i}$ coeficiente para determinação do valor de combinação da ação variável i .

Os valores dos coeficientes ψ_0 para edifícios (Quadro 5.4) são definidos de acordo com o Quadro A1.1 do regulamento NP EN 1990 [4], em coerência com as opções do projetista.

Quadro 5.4 – Valores recomendados para os coeficientes ψ_0 para edifícios.

Tipo de ação	Ação	ψ_0
Sobrecargas em edifícios	Q_k	0
Ação do vento em edifícios	W_k	0,6

As combinações dos efeitos das ações consideradas são definidas de acordo com o Quadro C.1, apresentado no Anexo C.

5.2.6 Envolventes dos diagramas de esforços

Os resultados fornecidos pelos programas de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para a envolvente de diagramas de esforços (combinações ELU), apresentaram entre eles diferenças inferiores a 3%. Para extração de resultados a partir da ferramenta *AciariUM* são considerados os valores propostos pelo *Robot Structural Analysis*.

5.3 Cálculo do valor do momento crítico M_{cr}

A simulação eficaz das condições reais de um sistema estrutural nos programas de cálculo estrutural (*Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*, neste caso) implica, por vezes, a adoção de estratégias de modelação.

Neste contexto, especialmente no que diz respeito á verificação á encurvadura lateral dos elementos, é necessário conhecer as opções do *software* utilizado para poder procurar a solução que melhor traduza as condições de travamento dos elementos e que permita o cálculo eficaz dos respetivos momentos críticos M_{cr} .

A estratégia apresentada em 5.3.3 sugere a forma como os elementos devem ser modelados nos programas de cálculo *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para que o momento crítico M_{cr} seja por eles determinado de forma eficaz.

Existe correspondência direta entre os subcapítulos 5.3.1 e 5.3.2: o primeiro define a forma como devem ser determinados os parâmetros relacionados com a quantificação do momento crítico M_{cr} de acordo com a proposta apresentada; o segundo documenta a forma como os programas de cálculo referidos quantificam os mesmos parâmetros.

As considerações tomadas neste subcapítulo em relação ao *Robot Structural Analysis* são válidas para o caso em que o utilizador, por qualquer motivo, decida caracterizar manualmente as condições de travamento dos banzos superior e inferior do elemento de barra (para o que diz respeito à análise à encurvadura lateral) por definição, de forma idêntica ao que é feito no *CYPE 3D*, daquilo que os programas definem como sendo o comprimento de encurvadura lateral de cada um desses banzos, $L_{cr,z}^{banzo}$, de acordo com o Módulo C definido em 2.7.3. É importante referir que o *Robot Structural Analysis*, ao contrário do *CYPE 3D*, disponibiliza um método muito eficiente e mais simples que o que aqui está a ser referido, que passa pela definição no espaço dos referidos travamentos através da qual calcula automaticamente todos os parâmetros relacionados com a análise ao fenómeno de encurvadura lateral (Módulo B definido em 2.7.3). Neste último caso não é necessário respeitar uma estratégia de modelação do género da referida.

A estratégia apresentada, portanto, não tem muito interesse para o caso do *Robot Structural Analysis*, mas é essencial para o caso do *CYPE 3D*.

5.3.1 Proposta adotada para o cálculo do valor do momento crítico M_{cr}

O cálculo do momento crítico M_{cr} é feito de acordo com a Equação (4.61) com base na proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6]. Os parâmetros envolvidos são definidos em coerência com o documentado na secção 4.10.1 deste documento.

5.3.2 Cálculo do valor do momento crítico M_{cr} nos programas de cálculo

As considerações tomadas nesta secção são válidas para o caso em que a caracterização das condições de travamento dos banzos superior e inferior do elemento é feita de forma manual por definição daquilo que os programas definem como sendo o comprimento de encurvadura lateral de cada um desses banzos, de acordo com o Módulo C definido em 2.7.3.

Embora se baseiem na mesma proposta que a referida em 5.3.1 para o cálculo do valor do momento crítico M_{cr} , os programas de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*, em alguns casos, tomam opções diferentes para quantificação dos mesmos parâmetros.

Os programas consideram l (na Equação (4.61)) igual ao comprimento total do elemento de barra, L (de acordo com o definido pelo utilizador, considerando que uma viga ou pilar podem ser modelados em vários segmentos, isto é, elementos de barra).

Solicitam a definição por parte do utilizador do que identificam como sendo o comprimento de encurvadura lateral de cada banzo, $L_{cr,z}^{banzo}$, da barra de comprimento L , na lógica do que é esquematizado na Figura 5.4 para o caso do banzo superior.

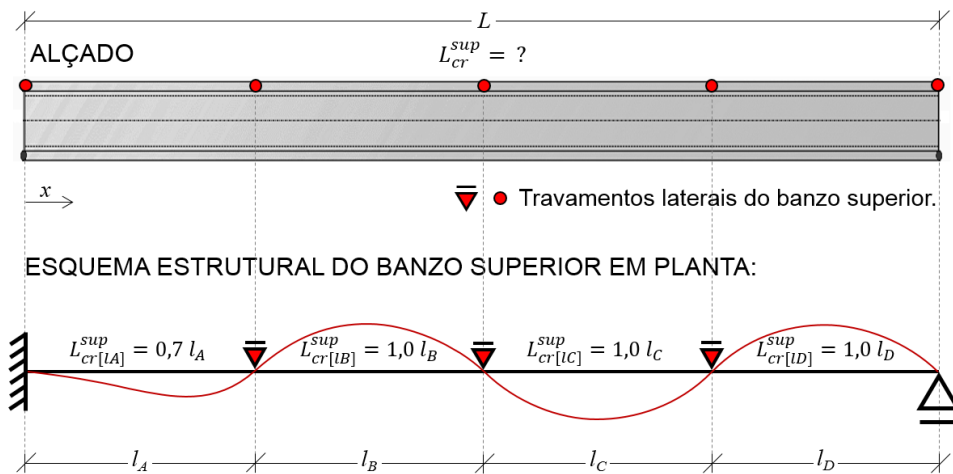


Figura 5.4 – Definição de $L_{cr,z}^{banzo}$ pelos programas de cálculo estrutural.

O parâmetro k_z , correspondente à barra de comprimento L , é determinado pelos programas de acordo com a Equação (5.2).

$$k_z = L_{cr,z}^{banzo} / L \quad (5.2)$$

em que, $L_{cr,z}^{banzo}$ é o comprimento de encurvadura lateral do banzo considerado.

De acordo com esta abordagem, a parcela $k_z \cdot l$, na Equação (4.61), é, portanto, igual a $L_{cr,z}^{banzo}$. Adicionalmente, o *Robot Structural Analysis* considera $k_w = 1,0$ para qualquer caso. O *CYPE 3D* admite $k_w = k_z$ para qualquer situação.

O *Robot Structural Analysis* define automaticamente os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 com base na forma do diagrama de momentos fletores ao longo do comprimento total L do elemento de barra (de acordo com o definido pelo utilizador, considerando que uma viga ou pilar podem ser modelados em vários segmentos, isto é, elementos de barra). O *CYPE 3D* solicita a definição do coeficiente C_1 pelo utilizador e assume $C_2 = 1,0$ e $C_3 = 1,0$.

5.3.3 Estratégia de modelação para que seja determinado de forma eficaz o valor do momento crítico M_{cr} nos programas de cálculo

O Quadro 5.5 resume e estabelece comparação entre as abordagens em 5.3.1 e 5.3.2, relativamente à forma como são determinados os parâmetros envolvidos na quantificação do momento crítico M_{cr} de acordo com a Equação (4.61).

Quadro 5.5 – Resumo e comparação entre as abordagens em 5.3.1 e 5.3.2.

*	Proposta Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6] (5.3.1)	Robot SA (5.3.2)	CYPE 3D (5.3.2)
l	Comprimento entre secções lateralmente contraventadas, l .	Comprimento total do elemento de barra, $L^{(1)}$.	
k_z	Fatores de comprimento efetivo dependentes das condições de apoio nas extremidades do segmento de comprimento l : $k=1,0$ para deformações livres; $k=0,5$ para deformações impedidas.	$k_z = L_{cr,z}^{banzo} / L$, em que $L_{cr,z}^{banzo}$ é o comprimento de encurvadura lateral do banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y e é definido pelo utilizador.	
k_w	para deformações livres; $k=0,5$ para deformações impedidas.	1,0	$k_w = k_z$
C_i	Coeficientes definidos de acordo com o quadro na Figura 4.24 com base na forma do diagrama de momentos ao longo do comprimento l entre secções lateralmente contraventadas e no valor definido para k_z .	Coeficientes definidos de acordo com o quadro na Figura 4.24 com base na forma do diagrama de momentos fletores ao longo do comprimento total L do elemento de barra ⁽¹⁾ e no valor definido para k_z .	O coeficiente C_1 é definido manualmente pelo utilizador. O programa considera $C_2 = C_3 = 1,0$

* Designação do parâmetro na expressão de cálculo de M_{cr} - Equação (4.61).

(1) de acordo com o definido pelo utilizador considerando que uma viga ou pilar podem ser modelados em vários segmentos, isto é, elementos de barra.

As abordagens apresentadas devolvem, na maior parte dos casos, diferentes valores para os parâmetros mencionados no Quadro 5.5, o que se reflete no valor do momento crítico M_{cr} .

De uma forma geral, entende-se que a estratégia a adotar, para traduzir o proposto em 5.3.1 nos programas de cálculo estrutural, passará pela modelação de cada elemento (viga ou pilar) como um conjunto de subelementos de comprimentos iguais às distâncias entre secções lateralmente contraventadas, adequando de forma equivalente os parâmetros que caracterizam a geometria de cada tramo.

O exemplo no final desta secção documenta a estratégia utilizada para traduzir as condições reais de travamento de um caso específico nos programas de cálculo *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*. A estratégia apresentada é válida para o caso exposto. Para cada situação será necessário analisar as especificidades do sistema estrutural e adaptar a estratégia por forma a encontrar a solução que melhor traduza as condições reais desse sistema.

5.3.3.1 Estratégia de Modelação – Exemplo prático

Considere-se o elemento representado na Figura 5.5 constituído pelo perfil *IPE 400 (S275)* e sujeito ao correspondente diagrama de momentos $M_{y,Ed}$.

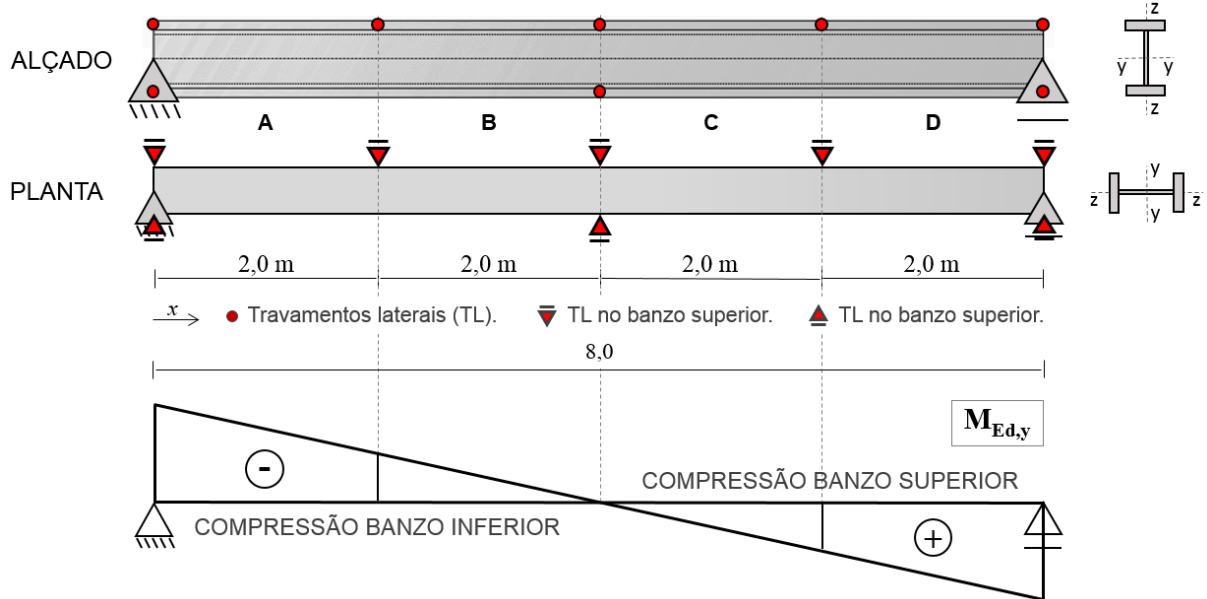


Figura 5.5 – Exemplo prático para definição de estratégia de modelação.

Na alínea a) deste exemplo o valor do momento crítico M_{cr} é calculado de acordo com a proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6], respeitando o definido em 5.3.1. Na alínea b) fica provado que os programas de cálculo considerados não devolvem resultados satisfatórios quando, neste contexto, não se respeita uma estratégia de modelação semelhante à que se propõe na alínea seguinte. Na alínea c) a modelação do elemento nos programas de cálculo respeita a estratégia aí descrita. Prova-se a eficácia dessa estratégia através dos resultados obtidos, a serem comparados com os valores calculados na alínea a).

a) Cálculo do valor de M_{cr} de acordo com a proposta apresentada em 5.3.1

O Quadro 5.6 apresenta, de acordo com 5.3.1, para o caso proposto, os valores dos comprimentos l entre secções lateralmente contraventadas e os fatores de comprimento efetivo k_z e k_w correspondentes a cada tramo e a cada banzo. Os resultados relativamente aos valores dos momentos críticos M_{cr} foram determinados pela ferramenta *AciariUM*.

É suscetível de sofrer de fenómenos de instabilidade o banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y , assim: são tidas em conta as condições de travamento do banzo inferior para verificação à encurvadura lateral dos tramos A e B; são tidas em conta as condições de travamento do banzo superior para verificação à encurvadura lateral dos tramos C e D.

Para o caso do Tramo AB, e por desenvolvimento da Equação (4.61), obtém-se o valor do momento crítico M_{cr} de acordo com a Equação (5.3). Considera-se que $z_g = 0$ (carga aplicada ao nível do centro de corte da secção transversal) e $z_j = 0$ (secção bissimétrica). Não existem restrições ao empenamento e a rotação em torno do eixo z das secções de extremidade do tramo, pelo que $k_w = 1,0$ e $k_z = 1,0$.

$$M_{cr} = 1,88 \frac{\pi^2 200 \cdot 10^6 \times 1318 \cdot 10^{-8}}{(1,0 \cdot 4,0)^2} \times \left[\left(\frac{1,0}{1,0} \right)^2 \frac{490 \cdot 10^{-9}}{1318 \cdot 10^{-8}} + \frac{(1,0 \cdot 4,0)^2 \times 81 \cdot 10^6 \times 51 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 200 \cdot 10^6 \times 1318 \cdot 10^{-8}} \right]^{0,5} = 794,45 \text{ kN.m} \quad (5.3)$$

Quadro 5.6 – Momento crítico calculado de acordo com 5.3.1.

	Tramo A			Tramo B			Tramo C			Tramo D		
Banzo Superior	$l_{(m)}$	k_z	k_w	$l_{(m)}$	k_z	k_w	$l_{(m)}$	k_z	k_w	$l_{(m)}$	k_z	k_w
Banzo Superior	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
Banzo Inferior	$l_{(m)}$		k_z	k_z		k_w	$l_{(m)}$		k_z	k_z		k_w
Banzo Inferior	4,0		1,0	1,0		1,0	4,0		1,0	1,0		1,0
C_I	$C_I = 1,88$						$C_I = 1,88$			$C_I = 1,32$		
M_{cr}	-794,45 kN.m						+ 2667,44 kN.m			+ 1878,14 kN.m		

Nota: l – comprimento entre secções lateralmente contraventadas de acordo com a Figura 5.6.

b) Cálculo do valor de M_{cr} pelos programas não adotando uma estratégia de modelação

Se a viga for modelada nos programas de cálculo estrutural como um elemento único, e na lógica da abordagem apresentada em 5.3.2, serão definidos para a barra de comprimento L os correspondentes parâmetros de acordo com as Equações 5.4 e 5.5.

$$L_{cr,z}^{\text{sup}} = 2,0 \text{ m} \rightarrow k_z^{\text{sup}} = L_{cr,z}^{\text{sup}}/L = 2,0/8,0 = 0,25 \quad (5.4)$$

$$L_{cr,z}^{\text{inf}} = 4,0 \text{ m} \rightarrow k_z^{\text{inf}} = L_{cr,z}^{\text{inf}}/L = 4,0/8,0 = 0,50 \quad (5.5)$$

em que $L_{cr,z}^{\text{sup}}$ e $L_{cr,z}^{\text{inf}}$ são os comprimentos de encurvadura lateral dos banzos superior e inferior.

Neste caso, seriam obtidos os resultados apresentados no Quadro 5.7, de acordo com 5.3.2, a serem comparados com valor de $M_{cr} = -794,45 \text{ kN.m}$ obtido no Quadro 5.6 com base em 5.3.1.

Quadro 5.7 – Momento crítico M_{cr} calculado pelos programas de cálculo de acordo com 5.3.2 sem que seja respeitada uma estratégia de modelação.

		$L_{(m)}$	k_z	k_w	
<i>Robot SA</i>	Banzo sup.	8,0	0,25	1,0	Com $C_I = 3,15$ definido automaticamente pelo programa <i>Robot SA</i> com base na forma do diagrama de momentos total.
	Banzo inf.		0,50	1,0	
	M_{cr}	-953,76 kN.m			
		$L_{(m)}$	k_z	k_w	
<i>CYPE 3D</i>	Banzo sup.	8,0	0,25	0,25	Com $C_I = 1,51$ definido manualmente com base na forma do diagrama de momentos entre secções lateralmente contraventadas no banzo inferior e em $k_z = 0,5$.
	Banzo inf.		0,50	0,50	
	M_{cr}	-638,44 kN.m ⁽¹⁾			

(1) Se $C_I=3,15$ (valor considerado pelo *Robot Structural Analysis*) $\rightarrow M_{cr} = 1331,84$ kN.m; Se $C_I=1,88$ (de acordo com 5.3.1, Quadro 5.6) $\rightarrow M_{cr} = 794,48$ kN.m⁽²⁾.

(2) Para o exemplo apresentado na Figura 5.6 tem-se, de acordo com o Quadro 5.6 (com base em 5.3.1), $k_z = k_w (= 1,0)$. Nos casos em que $k_z = k_w$, em particular, a abordagem adotada pelo *CYPE 3D* permitirá obter o mesmo valor do momento crítico M_{cr} que a abordagem no Quadro 5.6, uma vez que o *CYPE 3D* toma sempre $k_z = k_w$. Embora os valores k_z e k_w , determinados com base em 5.3.1, sejam diferentes dos correspondentes valores determinados de acordo com 5.3.2, se $k_z = k_w$ nas duas situações, então a razão k_z / k_w , na Equação (4.61), igualará a unidade, e estão reunidas condições para se obterem os mesmos valores de M_{cr} . Para isso deverá ser assegurada a correta definição do coeficiente distribuição de momentos C_I de acordo com 5.3.1.

Não se consideram satisfatórios os resultados obtidos no Quadro 5.7, na medida em que os valores de l , k_z , k_w e, conseqüentemente, M_{cr} se afastam dos resultados obtidos de acordo com 5.3.1 (Quadro 5.6). Esta diferença pode tornar-se mais expressiva em outras situações.

c) Cálculo de M_{cr} pelos programas atendendo á estratégia definida em 5.3.3

Para tradução das condições de travamento do sistema estrutural nos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* propõe-se a estratégia de divisão da viga em segmentos de comprimento igual ao comprimento entre secções lateralmente contraentadas (Figura 5.6). Considera-se para o efeito o contraentamento do banzo comprimido, por ser este aquele que é suscetível de sofrer do fenómeno de instabilidade em causa.

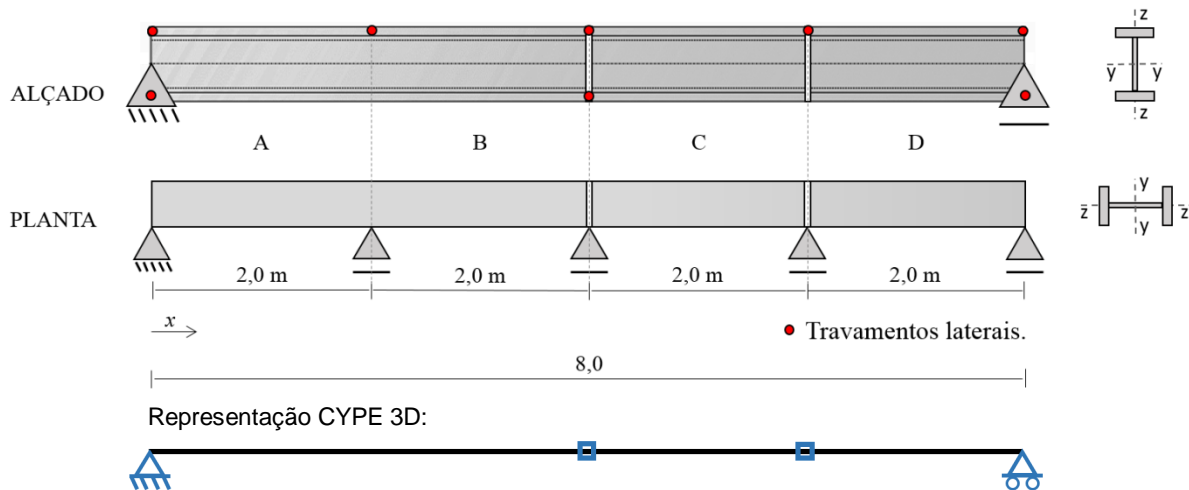


Figura 5.6 – Divisão da viga em segmentos para modelação nos programas de cálculo estrutural.

Definem-se manualmente para cada tramo os comprimentos de encurvadura lateral dos banzos superior e inferior ($L_{cr,z}^{banzo} = l$, neste caso). A partir desse valor os programas definem automaticamente k_z e k_w de acordo com 5.3.2.

De acordo com o Quadro 5.9 a estratégia definida na Figura 5.7 é capaz de reproduzir as condições reais de travamento do sistema estrutural, e permite que os programas de cálculo estrutural devolvam resultados aproximados dos obtidos no Quadro 5.6.

Quadro 5.8 – Momento crítico M_{cr} calculado pelos programas de cálculo de acordo com 5.3.2 respeitando a estratégia de modelação definida.

		Tramo A			Tramo B			Tramo C			Tramo D		
		$L_{(m)}$	k_z	k_w	$L_{(m)}$	k_z	k_w	$L_{(m)}$	k_z	k_w	$L_{(m)}$	k_z	k_w
<i>Robot SA</i>	Banzo Sup.	4,0	1,0 ⁽²⁾	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾
	Banzo Inf.		1,0	1,0 ⁽¹⁾		1,0	1,0 ⁽¹⁾		1,0	1,0 ⁽¹⁾			
	M_{cr}	- 782,76 kN.m			+ 2658,32 kN.m			+ 1852,34 kN.m					
<i>CYPE 3D</i>	Banzo Sup.	4,0	1,0 ⁽²⁾	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾	2,0	1,0	1,0 ⁽¹⁾
	Banzos Inf.		1,0	1,0 ⁽¹⁾		1,0	1,0 ⁽¹⁾		1,0	1,0 ⁽¹⁾			
	M_{cr}	-795,48 kN.m			+ 2669,73 kN.m			+ 1860,29 kN.m					

Em que: L – comprimento total do segmento de barra (AB, C ou D).

(1) valor definido automaticamente pelo programa;

(2) valor unitário mantido conservativamente por defeito uma vez que o parâmetro não tem qualquer influência no cálculo por se referir ao banzo tracionado que não é suscetível de instabilizar.

5.4 Verificação de segurança aos estados limite últimos (ELU)

Neste subcapítulo é documentado o processo de verificação de segurança aos estados limite últimos daqueles que se identificam como sendo os elementos principais do “pórtico-tipo”, identificados de acordo com a Figura 5.2: Pilares A e F; Vigas A e B.

Por questões essencialmente relacionadas com a conceção, o processo de verificação e dimensionamento atende a uma intenção de uniformização:

- os pórticos são geometricamente iguais, identifica-se portanto um pórtico-tipo que se repete ao longo do desenvolvimento do edifício.
- o “pórtico-tipo” é simétrico (a menos da plataforma correspondente ao piso “*Mezanine*”).

Os grupos de elementos identificados no Quadro 5.9 devem assim partilhar da mesma secção transversal. Neste contexto, justifica-se que sejam apresentados resultados para o caso mais condicionante de cada um dos três grupos identificados. A solução estende-se aos restantes elementos do mesmo grupo.

Quadro 5.9 – Identificação dos grupos de elementos e do caso mais condicionante de cada um.

Grupo	Descrição	Elementos	Secção Transversal	Caso condicionante
1	Pilares	$P_A ; P_F$	<i>HE 340 A</i>	Pórtico 2 (P_A)
2	Vigas (Perfis Soldados)	$V_{A1} ; V_{B1}$	<i>PRS</i>	Pórtico 3 (V_{B1})
3	Vigas (Perfis Laminados)	$V_{A2} ; V_{B2}$	<i>IPE 330</i>	Pórtico 4 (V_{B2})

Nota: As secções transversais têm correspondência com as definidas no Quadro 5.1; Os Pórticos são identificados de acordo com o definido na Figura 5.2.

O Pilar A (Pórtico 2), a Viga B₁ (Pórtico 3) e a Viga B₂ (Pórtico 4) são verificados aos estados limite últimos (ELU) nas secções 5.5, 5.6 e 5.7, respetivamente, deste documento. Identifica-se a Combinação de Ações N°2 como aquela que é a mais condicionante.

Os diagramas de esforços, para os elementos a verificar e, em cada caso, para a combinação condicionante, são esboçados nas Figuras 5.9, 5.25 e 5.41.

São apresentados os resultados fornecidos por três abordagens distintas: ferramenta de cálculo *AciariUM*, programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*. Para cada caso, e relativamente a cada assunto, são apresentados quadros comparativos dos principais resultados fornecidos pelas três ferramentas.

Porque a ferramenta *AciariUM* e o programa *Robot Structural Analysis*, de acordo com 5.2.6, partiram dos mesmos valores de cálculo dos esforços atuantes, e porque os valores utilizados pelo *CYPE 3D* apresentam ligeiras diferenças relativamente aos primeiros, estão a partida justificadas pequenas discrepâncias que possam surgir, nos resultados finais do processo de verificação aos ELU devolvidos pelo *CYPE 3D*, relativamente às outras abordagens.

5.5 Verificação de segurança aos ELU - Pilar A (Pórtico 2)

A secção transversal do Pilar A é constituída pelo perfil laminado comercial *HE 340 A* (S275).

No Anexo D.1 são documentados os Interfaces da ferramenta *AciariUM* usada para verificação de segurança aos ELU do Pilar A do Pórtico 2. Os dados e os resultados que neles figuram dizem respeito a esse cálculo.

Identifica-se como condicionante o tramo do pilar compreendido entre a secção correspondente ao Piso 0 e a secção ao nível da plataforma do piso “*Mezanine*” (2,90m). Não se prevê que os fenómenos de instabilidade condicionem o dimensionamento, razão pela qual se considera por simplificação e conservativamente que as duas secções estão completamente contraventadas mas não existem travamentos laterais entre as duas.

O elemento a verificar é caracterizado geometricamente de acordo com os dados na Figura 5.7. Ilustra-se apenas o tramo inferior do pilar.

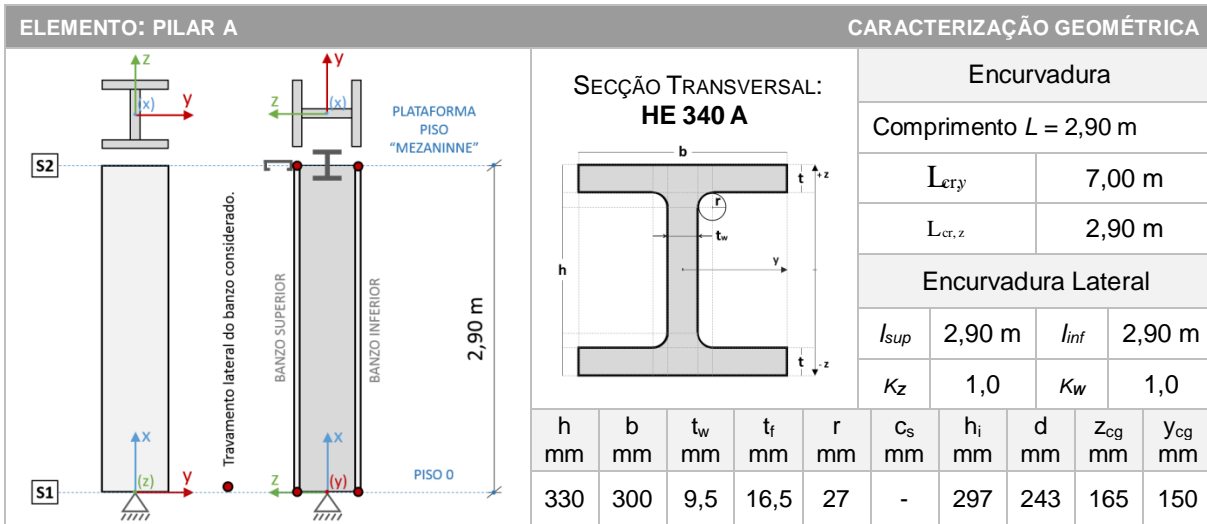


Figura 5.7 – Caracterização geométrica do Pilar A.

5.5.1 Caracterização geométrica da seção transversal HE 340 A

No Interface I (Figura 5.8) da ferramenta *AciariUM* o Módulo Comercial (consultar 3.5.2) permite selecionar o perfil *HE 340 A* a partir de uma base de dados. A ferramenta parte das dimensões principais do perfil para calcular automaticamente as propriedades mecânicas da seção transversal.

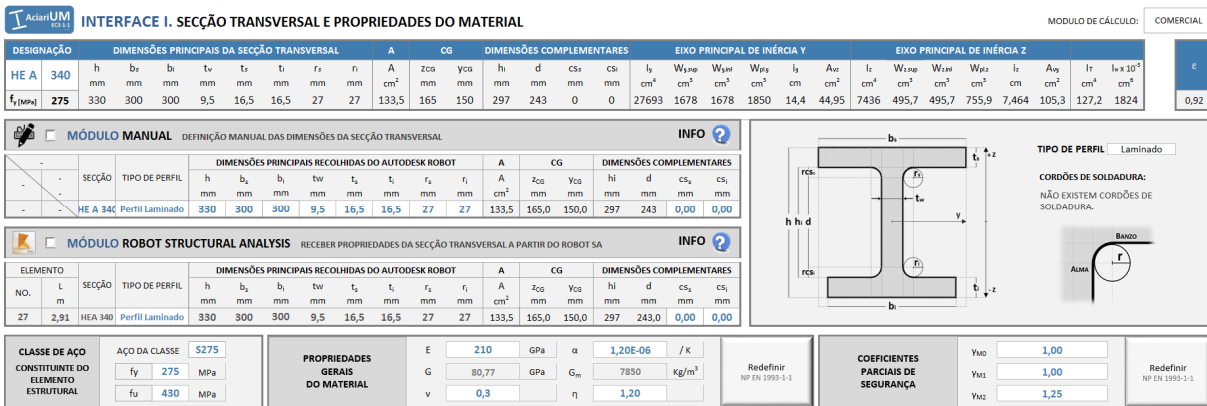


Figura 5.8 – Interface I (excerto): geometria da seção transversal HE 340 A.

O Quadro 5.10 compara os principais resultados obtidos relativamente às propriedades mecânicas da seção transversal *HE 340 A*.

Quadro 5.10 – Propriedades mecânicas da seção transversal HE 340 A.

	A	I _y	W _y	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _z	W _{pl,z}	i _z	A _{vy}	I _T
	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴
<i>AciariUM</i>	133,5	27693	1678,3	1850,5	14,4	45,0	7436	459,7	755,9	7,5	105,3	127,2
<i>Robot SA</i>	133,5	27693	-	1850,6	14,4	45,0	7436	-	755,9	7,5	110,4	123,0
<i>CYPE 3D</i>	133,5	27690	-	1850,0	-	31,4	7436	-	755,9	-	105,3	127,2

5.5.2 Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural

Identifica-se como condicionante a secção de topo ($x = 2,90$ m) do tramo inferior do Pilar A, onde atuam os esforços identificados na Figura 5.9. A Combinação de Ações ELU 2 é a condicionante.

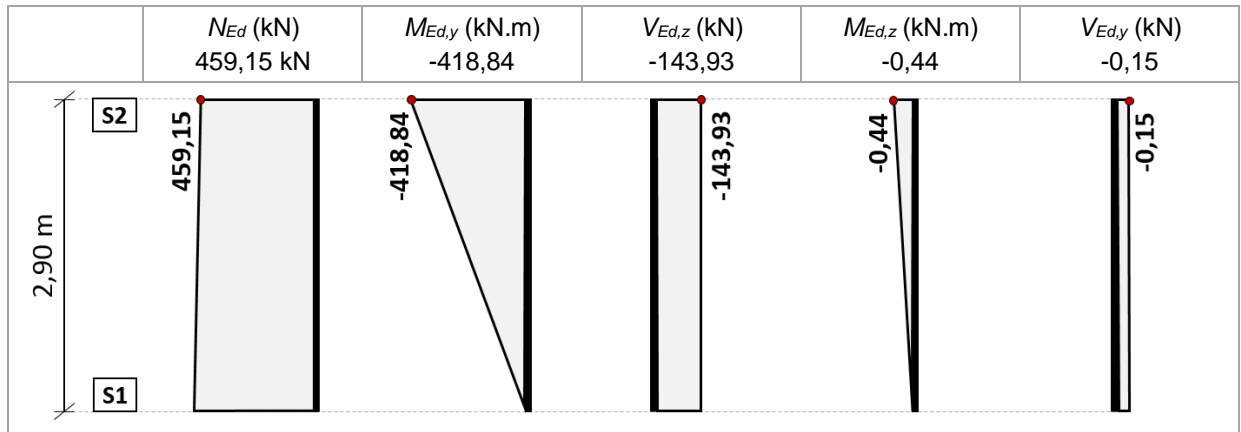


Figura 5.9 – Diagramas de esforços no Pilar A (Pórtico 2) para a combinação ELU condicionante.

No Interface II da ferramenta *AciariUM*, de acordo com a Figura 5.10, é ativado o Módulo *Robot Structural Analysis* (ver 3.5.4).

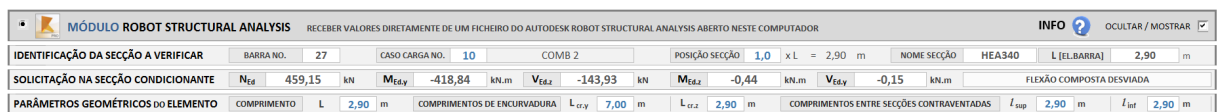


Figura 5.10 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação do Pilar A.

É aberto o ficheiro do *Robot Structural Analysis* que contém a modelação do Edifício e selecionado o Pilar A do Pórtico 2.

Na ferramenta *AciariUM*, no campo “*Caso de Carga No.*”, é identificado o Caso de Carga Nº10, o correspondente no programa à Combinação de Ações ELU Nº2 (aquela que se identifica como sendo a mais desfavorável). No campo “*Posição da Secção*” é definida a posição relativa da secção condicionante no elemento.

No separador “*Results Connect*” da barra de ferramentas do Microsoft Excel é ativada a opção “*Calculate all*”. Os valores de cálculo dos esforços atuantes na secção a verificar são automaticamente recolhidos a partir do ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador. Estes procedimentos podem ser consultados em maior detalhe em 3.5.4.

Os parâmetros geométricos que caracterizam o elemento são comunicados à ferramenta no mesmo espaço (Figura 5.10). São inseridos de forma manual nos campos da ferramenta *AciariUM* destinados ao efeito, em coerência com o que foi definido na Figura 5.7: $L = 2,90$ m; $L_{cr,y} = 7,0$ m; $L_{cr,z} = 2,90$ m; $l_{sup} = 2,90$ m; $l_{inf} = 2,90$ m.

5.5.3 Classificação da secção transversal HE 340 A

A classificação da secção transversal é realizada no espaço do Interface III da *AciariUM* identificado na Figura 5.11. Todas as ferramentas utilizadas indicam que a secção transversal HE 340 A, quando sujeita a flexão composta desviada, é da Classe 1.

Figura 5.11 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal HE 340 A.

5.5.4 Verificação da resistência da secção HE 340 A aos estados limite últimos

A resistência da secção transversal aos estados limite últimos é verificada no Interface III da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.12).

Figura 5.12 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal HE 340 A aos ELU.

O Quadro 5.11 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação da resistência da secção transversal HE 340 A aos estados limite últimos.

Quadro 5.11 – Verificação da resistência da secção transversal HE 340 A aos ELU.

	$N_{c,Rd}$	$M_{y,Rd}$	$V_{z,Rd}$	$M_{z,Rd}$	$V_{y,Rd}$	$M_{V_{y,Rd}}$	$M_{V_{z,Rd}}$	$M_{NV_{y,Rd}}$	$M_{NV_{z,Rd}}$	FCD
	kN	kN.m	kN	kN.m	kN	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	
<i>AciariUM</i>	3670,5	508,9	713,7	207,9	1671,2	508,9	207,9	508,9	207,9	69%
<i>Robot SA</i>	3670,5	508,9	713,7	207,9	1752,6	-	-	508,9	207,9	69%
<i>CYPE 3D</i>	3671,3	508,8	497,75	207,9	1671,6	-	-	508,8	207,9	65%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.49).

5.5.5 Resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento)

A resistência do elemento à encurvadura (varejamento) é verificada no Interface IV da ferramenta de cálculo (Figura 5.13).

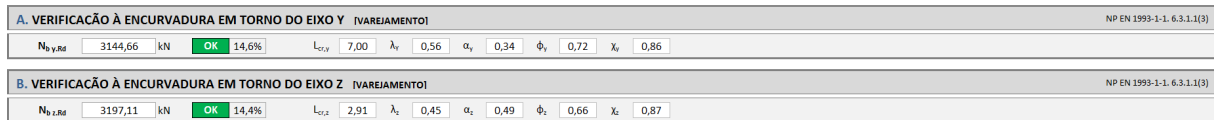


Figura 5.13 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento).

O Quadro 5.12 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação do Pilar A à encurvadura (varejamento).

Quadro 5.12 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura (varejamento).

	λ_y	α_y	φ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$	$Ef.$	λ_z	α_z	φ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$	$Ef.$
					kN						kN	
<i>AciariUM</i>	0,56	0,34	0,72	0,86	3144,7	15%	0,45	0,49	0,66	0,87	3197,1	15%
<i>Robot SA</i>	0,56	0,34	0,72	0,86	3142,8	15%	0,45	0,49	0,66	0,87	3197,1	15%
<i>CYPE 3D</i>	0,56	0,34	0,72	0,85	3137,2	15%	0,45	0,49	0,66	0,87	3197,1	15%

5.5.6 Resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento)

A resistência do elemento à encurvadura lateral (bambeamento) é verificada no Interface IV da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.14).

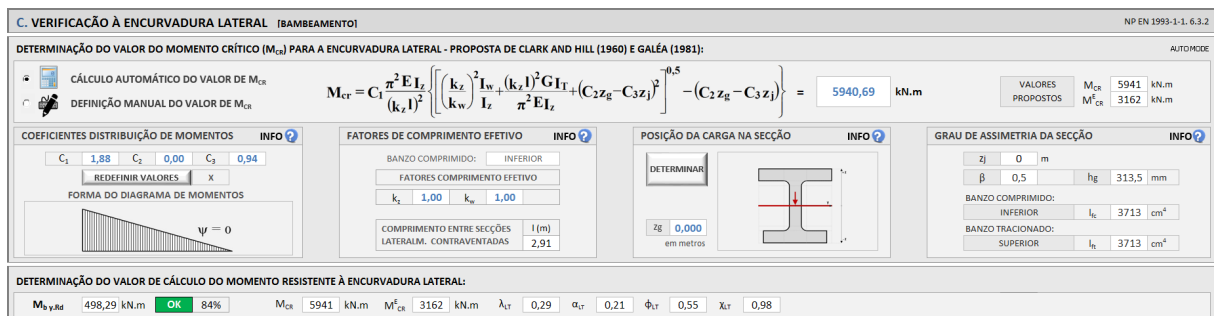


Figura 5.14 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento).

Identifica-se o banzo inferior, por ser o banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y, aquele que é suscetível de sofrer deste fenómeno de instabilidade.

Os coeficientes distribuição de momentos, C_i , são definidos na janela associada ao botão “Redefinir Valores” (Figura 5.15). Na janela associada ao botão “Determinar” (Figura 5.16), é definido o parâmetro z_g marcando a opção correspondente à aplicação da carga ao nível do centro de corte da secção transversal.

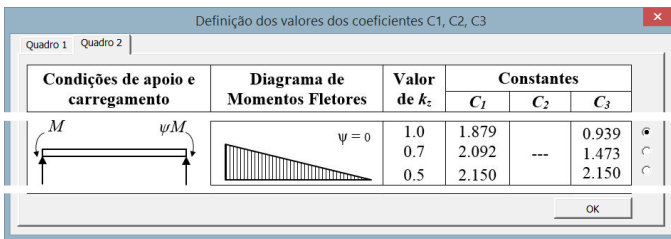


Figura 5.15 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Pilar A).

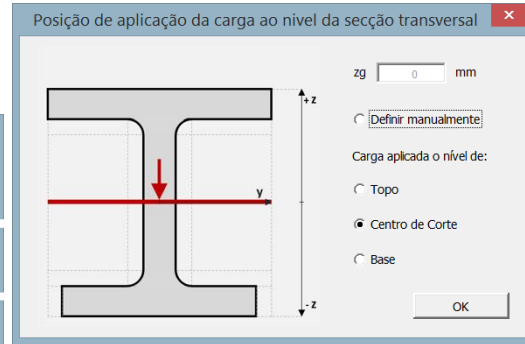


Figura 5.16 – Janela de definição do parâmetro z_g (Pilar A).

O Quadro 5.13 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento).

Quadro 5.13 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura lateral (bambeamento).

	C_1	C_2	C_3	$k_{z,inf}$	$k_{w,inf}$	M_{cr} kN.m	λ_{LT}	α_{LT}	ϕ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	$Ef.$
<i>AciariUM</i>	1,88	0	0,94	1,00	1,00	5940,7	0,29	0,21	0,55	0,98	498,3	84%
<i>Robot SA</i>	1,88	0	0,94	1,00	1,00	5929,3	0,29	0,21	0,55	0,98	498,3	84%
<i>CYPE 3D</i>	1,88	-	-	1,00	1,00	5942,0	0,29	0,21	0,55	0,98	498,2	84%

5.5.7 Resistência do Pilar A à encurvadura por esforço transverso (enfundamento)

A resistência do elemento à encurvadura por esforço transverso é verificada no Interface IV da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.17).

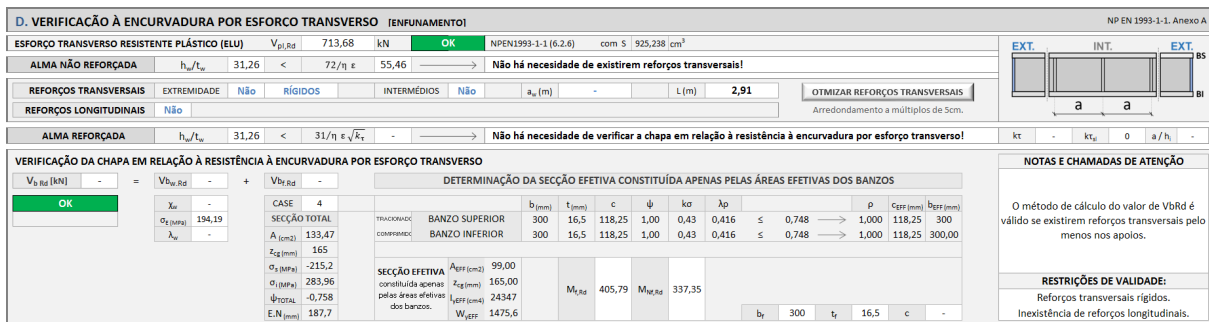


Figura 5.17 – Interface IV (excerto): resistência do Pilar A à encurvadura por esforço transverso.

A ferramenta e o programa *CYPE 3D* indicam que não existe necessidade de verificar o Pilar A à encurvadura por esforço transversal.

No relatório de cálculo fornecido pelo *Robot Structural Analysis* não foram apresentados resultados em relação a este assunto, razão pela qual se considera que o programa não faz esta verificação.

5.5.8 Verificação do Pilar A à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)

A análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão é realizada no Interface V da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.18).

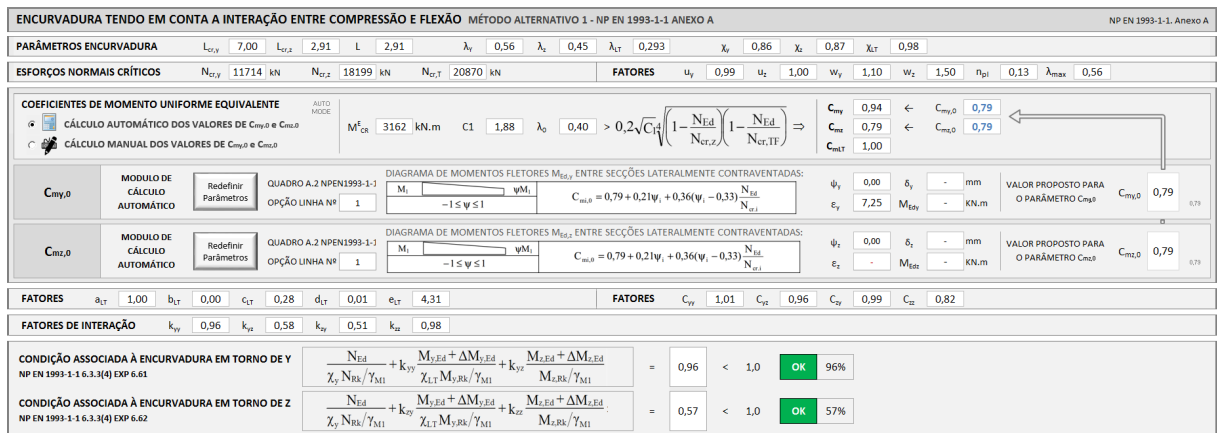


Figura 5.18 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global do Pilar A sujeito a flexão composta com compressão.

É ativado o cálculo automático dos coeficientes de momento uniforme $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$. A determinação destes parâmetros é auxiliada pelas janelas associadas aos botões “*Redefinir Parâmetros*” (Figura 5.19). É selecionado o primeiro dos casos constantes do Quadro A.2 da NP EN 1993-1-1 [1].

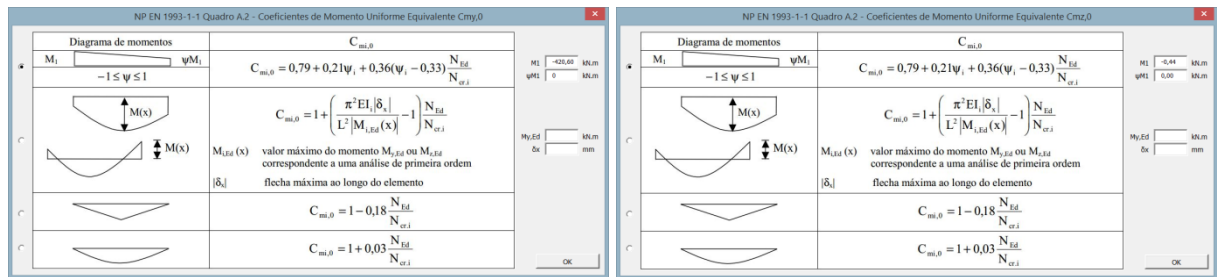


Figura 5.19 – Janelas de definição dos coeficientes de momento uniforme (Pilar A).

O Quadro 5.14 compara os principais resultados obtidos relativamente à análise de estabilidade global do Pilar A.

Quadro 5.14 – Verificação da resistência do Pilar A à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global).

	$N_{cr,y}$ kN	$N_{cr,z}$ kN	$N_{cr,T}$ kN	λ_0	C_{my}	C_{mz}	C_{mLT}	a_{LT}	b_{LT}	c_{LT}	d_{LT}	e_{LT}
<i>AciariUM</i>	11714	18199	20870	0,40	0,94	0,79	1,00	1,00	0,00	0,28	0,01	4,31
<i>Robot</i>	11670	18200	20765	0,40	0,94	0,79	1,00	1,00	0,00	0,29	0,01	4,33
<i>CYPE 3D</i>	11525	18200	20883	0,39	0,94	0,79	1,00	1,00	0,00	0,26	0,01	4,11

	C_{yy}	C_{yz}	C_{zy}	C_{zz}	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	Verificação (Exp.6.61)	Verificação (Exp.6.62)
<i>AciariUM</i>	1,01	0,96	0,99	0,82	0,96	0,58	0,51	0,99	96%	57%
<i>Robot</i>	1,01	0,96	0,99	0,82	0,96	0,58	0,51	0,99	96%	57%
<i>CYPE 3D</i>	1,01	0,97	0,99	0,83	0,97	0,59	0,51	0,97	92%	54%

5.5.9 Relatório final de segurança (Pilar A)

O Pilar A do Pórtico 2, caso mais condicionante de entre os elementos do Grupo1 (grupo definido de acordo com o Quadro 5.9), verifica a segurança em relação aos estados limite últimos. A taxa de eficiência, de acordo com a ferramenta *AciariUM*, é de 96%.

No Interface VI da ferramenta *AciariUM* é produzido um relatório de cálculo completo pronto a ser exportado, que é apresentado no Anexo D.2 deste documento. Os relatórios de cálculo produzidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para este caso são apresentados nos Anexos D.3 e D.4, respetivamente.

O Quadro 5.15 resume e compara os principais resultados obtidos no processo de verificação.

Quadro 5.15 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação do Pilar A.

	$N_{c,Rd}$ kN	$M_{y,Rd}$ kN.m	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{z,Rd}$ kN.m	$V_{y,Rd}$ kN	<i>FCD</i>	$N_{b,y,Rd}$ kN	$N_{b,z,Rd}$ kN	$M_{b,Rd}$ kN.m	$V_{b,Rd}$ kN	Ver. (6.61)	Ver. (6.62)
<i>AciariUM</i>	3670,5	508,9	713,7	207,9	1671,2	69%	3144,7	3197,1	498,3	-	96%	57%
<i>Robot</i>	3670,5	508,9	713,7	207,9	1752,6	69%	3142,8	3197,1	498,3	-	96%	57%
<i>CYPE 3D</i>	3671,3	508,8	497,75	207,9	1671,6	65%	3137,2	3197,1	498,2	-	92%	54%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.49).

As diferentes abordagens consideram diferentes áreas A_v resistentes ao esforço transversal, o que se reflete nos valores da resistência da secção transversal ao corte.

As diferenças nos resultados apresentados pelo *CYPE 3D* acontecem principalmente porque, neste caso, o programa partiu de valores dos esforços atuantes ligeiramente inferiores.

5.6 Verificação de segurança aos ELU – Viga B₁ (Pórtico 3)

A Viga B₁ é caracterizada geometricamente de acordo com os dados na Figura 5.20. É constituída por um perfil reconstituído soldado (PRS) de altura variável.

No Anexo E.1 são documentados os Interfaces da ferramenta *AciariUM* usada para verificação de segurança aos ELU da Viga B₁ do Pórtico 3.

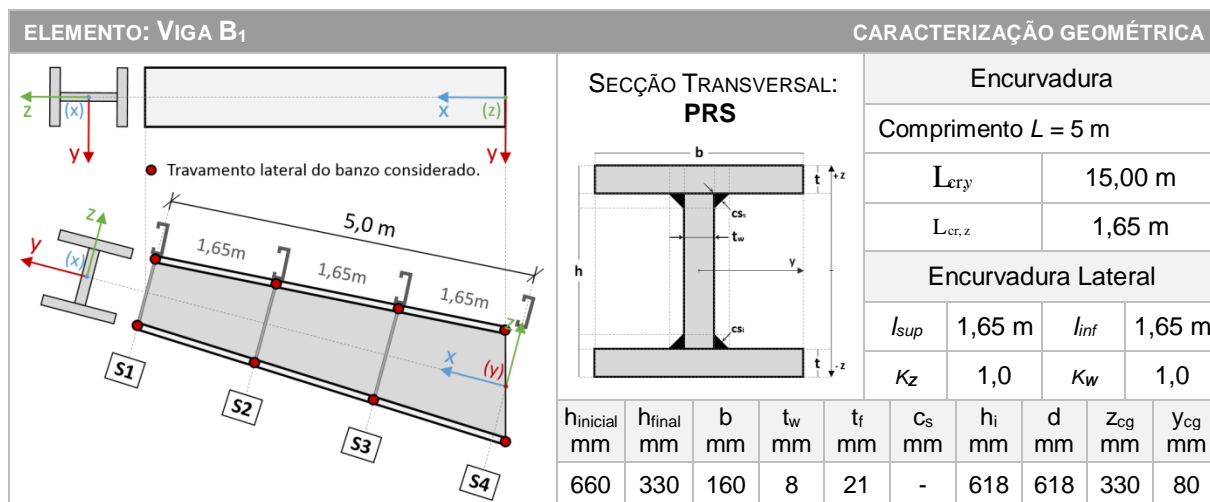


Figura 5.20 – Caracterização geométrica da Viga B₁.

O elemento é um tramo da viga B. A viga B tem comprimento total de 15 m. Considera-se o comprimento de encurvadura em torno do eixo y igual ao comprimento da viga ($L_{cr,y} = 15\text{ m}$).

Toma-se o comprimento de encurvadura do tramo a analisar em torno do eixo z igual ao comprimento entre secções lateralmente contraventadas, isto é, entre madres ($L_{cr,z} = 1,65\text{ m}$).

A encurvadura para fora do plano é evitada com recurso a um sistema composto definido de acordo com as Figuras 5.21 e 5.22 [6]:

- O aparafusamento das madres ao banzo superior garante o contraventamento lateral da viga, impedindo deslocamentos transversais do banzo comprimido (Figura 5.21). O travamento do banzo superior é feito em secções espaçadas de 1,65m.
- O sistema materializado de acordo com a Figura 5.22 impede a translação lateral do banzo inferior e a rotação do elemento em torno do seu eixo longitudinal. O banzo inferior é travado a cada 1,65m.

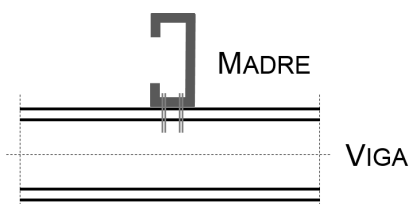


Figura 5.21 – Contraventamento lateral do banzo superior da Viga B.

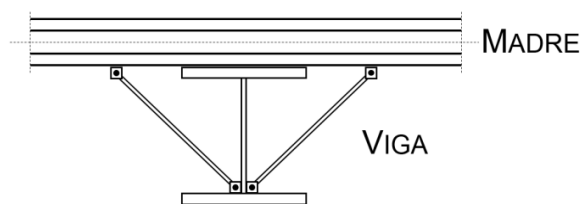


Figura 5.22 – Contraventamento lateral do banzo inferior da Viga B.

De acordo com a estratégia definida em 5.3.3 a modelação da Viga B₁ no programa *CYPE 3D* é realizada dividindo-a em subelementos (EL1, EL2 e EL3) de comprimentos iguais às distâncias entre secções lateralmente contraventadas ($l = 1,65\text{m}$), de acordo com a Figura 5.23.

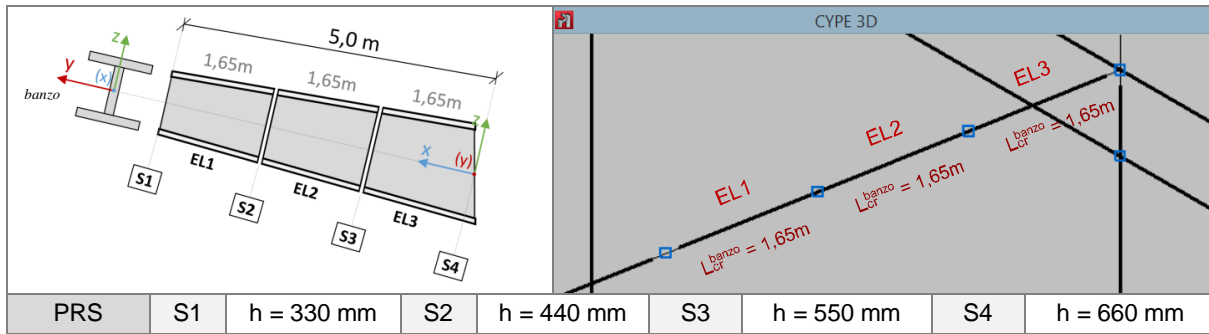


Figura 5.23 – Estratégia de modelação da Viga B₁ no *CYPE 3D*.

Não existem restrições à rotação em torno do eixo z nas secções de extremidade dos tramos de comprimento l . Para cada tramo definem-se os comprimentos de encurvadura, $L_{cr,y} = 15,0\text{m}$ e $L_{cr,z} = 1,65\text{m}$, e os comprimentos de encurvadura lateral de cada banzo, $L_{cr,z}^{banzo} = 1,65\text{m}$. A verificação incide sobre o mais condicionante dos três tramos (EL3).

5.6.1 Caracterização geométrica da secção transversal PRS

No Interface I (Figura 5.24) é ativado o Módulo Manual (consultar 3.5.3) de definição das dimensões da secção transversal. É comunicada individualmente cada uma das dimensões principais da secção transversal à ferramenta de cálculo. A ferramenta *AciariUM* parte dessa informação para calcular automaticamente as propriedades mecânicas da secção transversal.

SEÇÃO		TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
h	b _s	b _i	tw	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	cs _s	cs _i			
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
660	160	160	8	21	21	0	0	116,6	330,0	80,0	618	618	0,00	0,00			

Figura 5.24 – Interface I (excerto): definição das dimensões do perfil PRS (S4).

O Quadro 5.16 compara os principais resultados obtidos relativamente às propriedades mecânicas da secção transversal.

Quadro 5.16 – Propriedades mecânicas da secção transversal PRS.

	A	I _y	W _y	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _z	W _{pl,z}	i _z	A _{vy}	I _T
	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴
<i>AciariUM</i>	116,6	84358	2556,3	2910,9	26,9	49,4	1436	179,5	278,7	3,5	67,2	103,6
<i>Robot SA</i>	116,6	84358	2556,3	-	26,9	59,3	1436	179,5	-	3,5	67,2	101,1
<i>CYPE 3D</i>	116,6	84358	2556,3	-	-	49,4	1436	179,5	278,7	-	67,2	109,3

5.6.2 Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural

Identifica-se como condicionante a secção S4 da Viga B₁ onde atuam os esforços identificados na Figura 5.25. A Combinação de Ações ELU 2 é a condicionante.

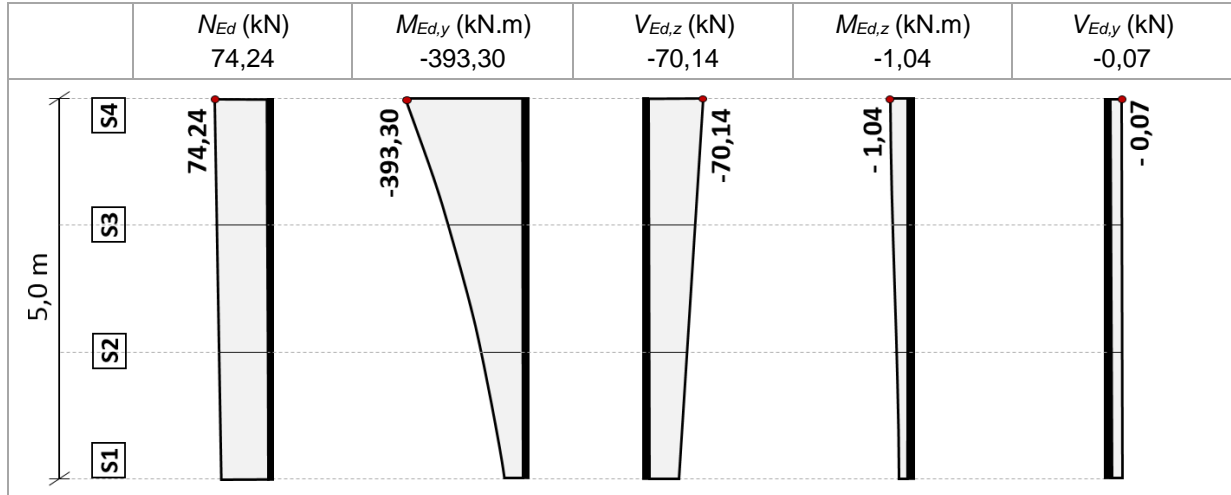


Figura 5.25 – Diagramas de esforços na Viga B₁ (Pórtico 3) para a combinação ELU condicionante.

No Interface II da ferramenta *AciariUM* é selecionado o Módulo Manual (consultar 3.5.3) de introdução do valor de cálculo dos esforços atuantes na secção a verificar e dos parâmetros geométricos que definem o sistema estrutural (Figura 5.26). São introduzidos os dados recolhidos das Figuras 5.20 e 5.25.



Figura 5.26 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação da Viga B₁.

5.6.3 Classificação da secção transversal PRS

A classificação da secção transversal *PRS* é realizada no Interface III (Figura 5.27). Todas as abordagens indicam que a secção transversal sujeita a flexão composta desviada é da Classe 3.

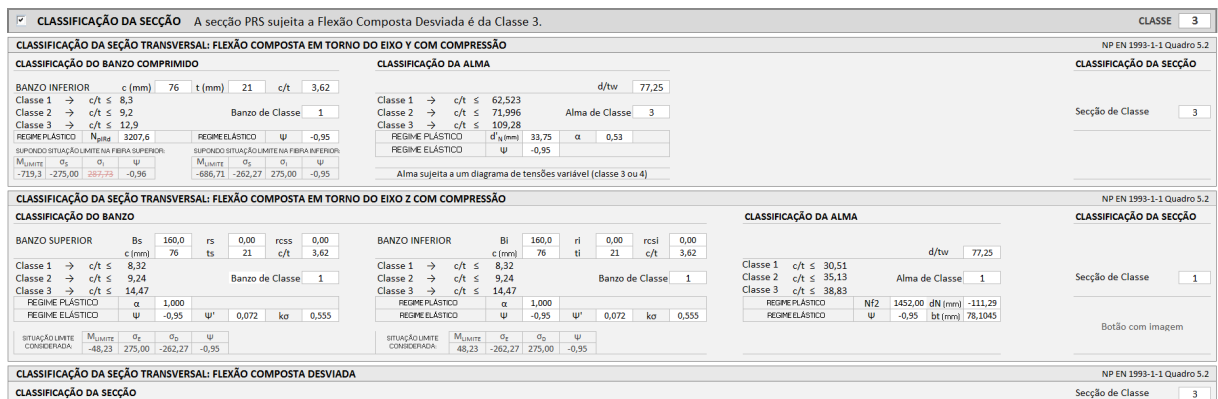


Figura 5.27 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal *PRS*.

5.6.4 Verificação da resistência da secção PRS aos estados limite últimos

A resistência da secção transversal aos estados limite últimos é verificada no Interface III da ferramenta de cálculo (Figura 5.28).

A. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES NP EN 1993-1-1, 6.2

Tração	$N_{t,Rd}$	3207,60	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)
Compressão	$N_{c,Rd}$	3207,60	kN	OK	2%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)
Esforço Transverso	$V_{z,Rd}$	736,19	kN	OK	10%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S_y 1455,44 cm ³
Momento Fletor	$M_{y,Rd}$	702,98	kN.m	OK	56%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	$V_{y,Rd}$	714,39	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S_z 134,06 cm ³
Momento Fletor	$M_{z,Rd}$	49,37	kN.m	OK	2%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)

B. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA NP EN 1993-1-1, 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR $M_{y,z}$]

$V_{z,Ed}$ (kN) 70,14 < 50% $V_{pl,Rd,z}$ (kN) 942 ρ 0,00 $F_{y,Ed}$ (kN) 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso $V_{z,Rd}$ Área restante

$A_{z,2}$ 59,33 $A_{z,1}$ 57,31

$I_{y,2,y}$ 17994,5 $I_{y,2,z}$ 66962,4

$W_{pl,y,2,y}$ 527,1 $W_{pl,y,2,z}$ 2029,2

$W_{pl,z,2,y}$ 527,1 $W_{pl,z,2,z}$ 2029,2

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR $M_{z,z}$]

$V_{y,Ed}$ (kN) 0,07 < 50% $V_{pl,Rd,y}$ (kN) 1067 ρ 0,00 $F_{z,Ed}$ (kN) 275,0 f_z 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso $V_{y,Rd}$ Área restante

$A_{y,2}$ 67,20 $A_{y,1}$ 49,44

$I_{z,2,y}$ 1433,6 $I_{z,2,z}$ 2,6

$W_{pl,z,2,y}$ 179,2 $W_{pl,z,2,z}$ 0,3

$W_{pl,y,2,y}$ 179,2 $W_{pl,y,2,z}$ 0,3

C. INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO NP EN 1993-1-1, 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vz] com o momento fletor resistente [MRd,y]

EL $MV_{z,Rd}$ 702,98 kN.m OK 56% $MV_{y,Rd}$ 702,98 kN.m OK 56%

$M_{V,z,Rd} = W_{y,Av} \cdot F_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_{yz}$ γ_{M0}

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vy] com o momento fletor resistente [MRd,z]

EL $MV_{z,Rd}$ 49,37 kN.m OK 2% $MV_{y,Rd}$ 49,37 kN.m OK 2%

$M_{V,z,Rd} = W_{z,Av} \cdot F_{yz} + W_{z,Ar} \cdot f_{yz}$ γ_{M0}

G. INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS DA CLASSE 3] NP EN 1993-1-1, 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

A	-0,52	<	1,0	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N_{Ed}	$M_{y,Ed}$	V_z	$M_{z,Ed}$	V_y
2%	-55,9%	0,0%	2,1%	0%
CONTRIBUIÇÃO				
N_{Ed}	$M_{y,Ed}$	V_z	$M_{z,Ed}$	V_y
2%	55,9%	0,0%	2,1%	0%
C	0,60	<	1,0	OK

B	-0,56	<	1,0	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N_{Ed}	$M_{y,Ed}$	V_z	$M_{z,Ed}$	V_y
-56%	2%	-55,9%	0,0%	-2,1%
CONTRIBUIÇÃO				
N_{Ed}	$M_{y,Ed}$	V_z	$M_{z,Ed}$	V_y
2%	55,9%	0,0%	-2,1%	0%
D	0,56	<	1,0	OK

Figura 5.28 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal PRS aos ELU.

O Quadro 5.17 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação da resistência da secção transversal PRS aos estados limite últimos.

Quadro 5.17 – Verificação da resistência da secção transversal PRS aos ELU.

	$N_{c,Rd}$	$M_{y,Rd}$	$V_{z,Rd}$	$M_{z,Rd}$	$V_{y,Rd}$	$M_{V,y,Rd}$	$M_{V,z,Rd}$	$M_{NV,y,Rd}$	$M_{NV,z,Rd}$	FCD
	kN	kN.m	kN	kN.m	kN	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	
AciariUM	3207,6	703,0	785,0	49,4	1066,9	703,0	49,4	703,0	49,4	60%
Robot SA	3207,6	703,0	942,0	49,4	1066,9	-	-	-	-	60%
CYPE 3D	3207,6	703,0	785,0	49,4	1066,9	-	-	-	-	60%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.51).

5.6.5 Resistência da Viga B₁ à encurvadura (varejamento)

A resistência do elemento à encurvadura (varejamento) é verificada no Interface IV da ferramenta de cálculo (Figura 5.29).

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO - ENCURVADURA POR ESFORÇO AXIAL] NP EN 1993-1-1, 6.3.1.1(3)

$N_{0,Rd,y}$ 2614,74 kN OK 2,8% $L_{cr,y}$ 15,00 λ_y 0,64 α_1 0,34 ϕ_y 0,78 χ_y 0,82

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO - ENCURVADURA POR ESFORÇO AXIAL] NP EN 1993-1-1, 6.3.1.1(3)

$N_{0,Rd,z}$ 2627,17 kN OK 2,8% $L_{cr,z}$ 1,65 λ_z 0,54 α_2 0,49 ϕ_z 0,73 χ_z 0,82

Figura 5.29 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B₁ à encurvadura (varejamento).

O Quadro 5.18 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação da Viga B₁ à encurvadura (varejamento).

Quadro 5.18 – Verificação da resistência da Viga B₁ à encurvadura (varejamento).

	λ_y	α_y	φ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$ kN	$Ef.$	λ_z	α_z	φ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$ kN	$Ef.$
<i>AciariUM</i>	0,64	0,34	0,78	0,82	2614,7	3%	0,54	0,49	0,73	0,82	2627,2	3%
<i>Robot SA</i>	0,69	0,34	0,82	0,79	2531,1	3%	0,53	0,49	0,72	0,82	2646,0	3%
<i>CYPE 3D</i>	0,64	-	-	1,00	-	-	0,54	-	-	1,00	-	-

5.6.6 Resistência da Viga B₁ à encurvadura lateral (bambeamento)

A resistência do elemento à encurvadura lateral (bambeamento) é verificada no Interface IV da ferramenta de cálculo. Identifica-se o banzo superior, por ser o banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y, aquele que é suscetível de sofrer deste fenómeno de instabilidade.

Existe pouca orientação para a determinação do momento crítico no caso de elementos com secção variável, sendo habitual, de forma conservativa, determinar o momento crítico elástico com base na secção de menor inércia [7]. O *CYPE 3D* considerou, para as situações testadas, a secção de maior altura (S4) para determinação do valor do momento crítico. O *Robot Structural Analysis* foi mais ponderado, considerando para o cálculo a secção central (média) do tramo. De entre as propostas, opta-se por adotar a metodologia proposta pelo *Robot SA*.

No Interface I, de acordo com a Figura 5.30, a altura da secção transversal é alterada para $h_{\text{médio}}$, a altura da secção transversal intermédia do tramo EL3. A medida é determinada de acordo com a Equação (5.6) para o caso em que a variação da altura da secção transversal é linear. As propriedades mecânicas dessa secção são determinadas automaticamente.

$$h_{\text{médio}} = \frac{h_{\text{inicial}} + h_{\text{final}}}{2} = \frac{660 + 550}{2} = 605 \text{ mm} \quad (5.6)$$

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL														INFO ?			
SECCÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT									A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
		h mm	b _s mm	b _i mm	t _w mm	t _s mm	t _i mm	r _s mm	r _i mm	A cm ²	z _{CG} mm	y _{CG} mm	h _i mm	d mm	cs _s mm	cs _i mm	
PRS	Perfil Soldado	605	160	160	8	21	21	0	0	112,2	302,5	80,0	563	563	0,00	0,00	

Figura 5.30 – Interface I (Excerto): propriedades mecânicas da secção transversal intermédia do tramo EL3 da Viga B₁.

No Interface IV, na janela associada ao botão “*Redefinir Valores*” (Figura 5.31), são definidos os coeficientes distribuição de momentos, C_i . O parâmetro z_g é definido marcando a opção correspondente à aplicação da carga ao nível da face superior da secção transversal na janela associada ao botão “*Determinar*” (Figura 5.32).

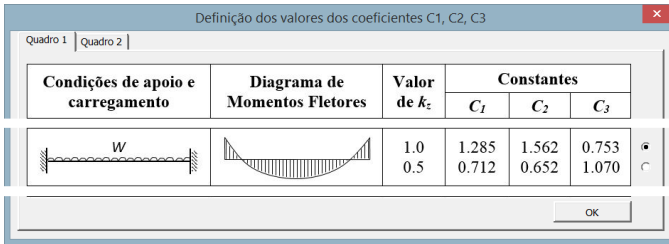


Figura 5.31 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Viga B₁).

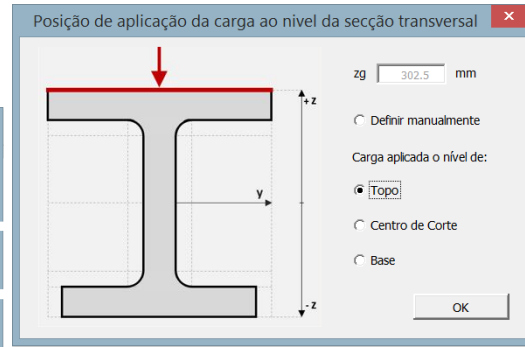


Figura 5.32 – Janela de definição do parâmetro z_g (Viga B₁).

Ainda no mesmo interface é ativada a opção correspondente ao cálculo automático do valor do momento crítico M_{cr} . O valor proposto para o parâmetro é automaticamente transportado para o campo destinado à sua definição (Figura 5.33). Está, portanto, encontrado o valor de M_{cr} .

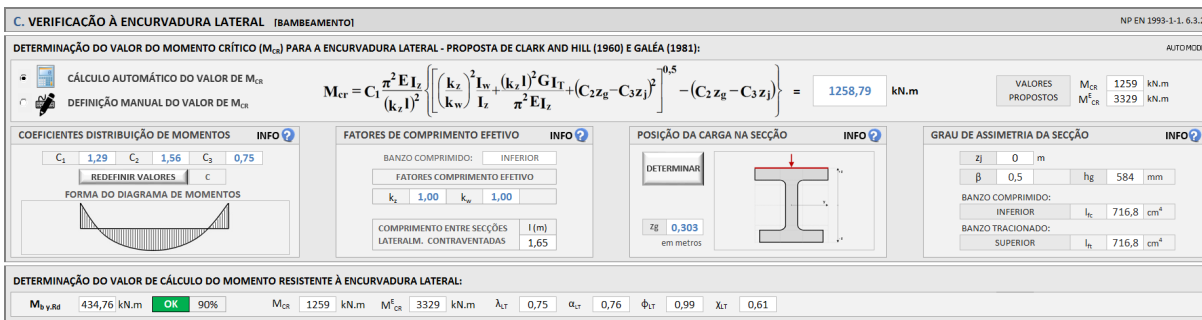


Figura 5.33 – Interface IV (Excerto): determinação do valor do momento crítico M_{cr} da Viga B₁.

O modo de cálculo de M_{cr} é então alterado para Manual. A ferramenta mantém assim o último valor definido para este parâmetro. Nenhuma alteração de outro parâmetro fará, a partir deste momento, com que o valor determinado para o momento crítico M_{cr} se altere automaticamente. As propriedades da secção transversal são reestabelecidas no Interface I para as dimensões correspondentes à secção a verificar (Figura 5.34).

SECCÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A			CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
		h	b_s	b_i	tw	t_s	t_i	r_s	r_i	A	z_{CG}	y_{CG}	h_i	d	cs_s	cs_i		
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
PRS	Perfil Soldado	660	160	160	8	21	21	0	0	116,6	330,0	80,0	618	618	0,00	0,00		

Figura 5.34 – Interface I (Excerto): propriedades mecânicas da secção transversal PRS (S4).

De volta ao Interface IV (Figura 5.35) são finalmente recolhidos os valores de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral, $M_{b,Rd}$, e dos parâmetros correspondentes.

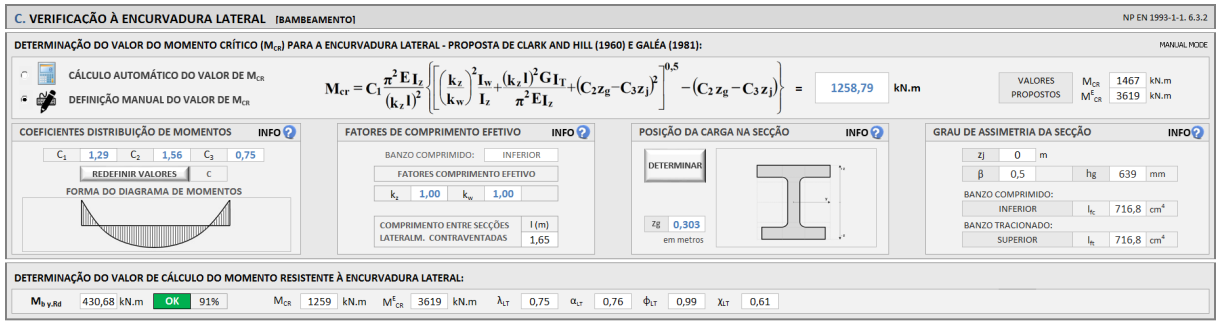


Figura 5.35 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B₁ à encurvadura lateral (bambeamento).

O Quadro 5.19 compara os resultados obtidos relativamente à verificação da Viga B₁ à encurvadura lateral (bambeamento).

Quadro 5.19 – Verificação da resistência da Viga B1 à encurvadura lateral (bambeamento).

	C_1	C_2	C_3	l m	$k_{z,inf}$	$k_{w,inf}$	z_g mm	M_{cr} kN.m	λ_{LT}	α_{LT}	ϕ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	E_f
<i>AciariUM</i>	1,29	1,56	0,75	1,65	1,00	1,00	302,5	1258,8	0,75	0,76	0,99	0,61	430,7	91%
<i>Robot SA</i>	1,28	1,56	0,75	1,65	1,00	1,00	302,5	1263,0	0,75	0,76	0,99	0,61	431,2	91%
<i>CYPE 3D</i>	1,29	1,00	1,00	1,65	1,00	1,00	0,0	4681,9	0,39	0,76	0,65	0,86	604,1	65%

O *CYPE 3D* não permitiu considerar a carga aplicada ao nível da face superior da secção transversal. Tomou $z_g = 0$, o equivalente a admitir que a carga está aplicada ao nível do centro de corte da mesma secção. Este é o principal motivo para as diferenças nos resultados obtidos face às outras abordagens. Neste aspeto o programa não está do lado da segurança.

5.6.7 Resistência da Viga B₁ à encurvadura por esforço transversal (enfundamento)

De acordo com a ferramenta *AciariUM* (Figura 5.36) e o programa *CYPE 3D* a Viga B₁ deve possuir reforços transversais pelo menos nos apoios e ser verificada à encurvadura por esforço transversal (enfundamento).

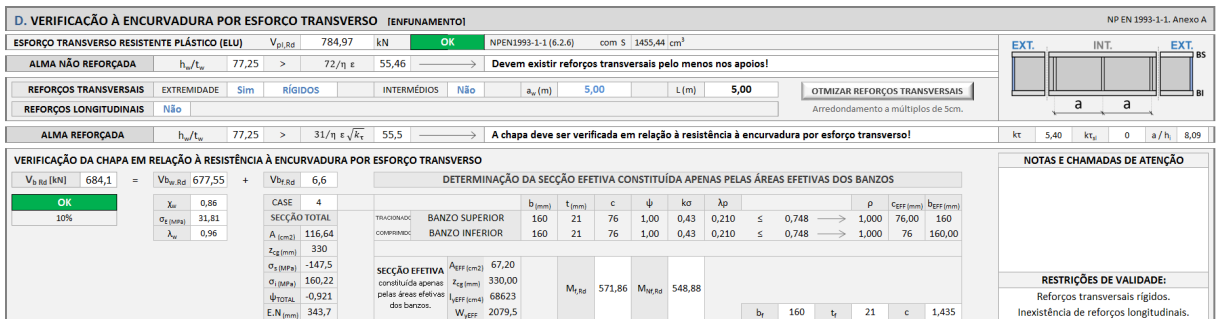


Figura 5.36 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B₁ à encurvadura por esforço transversal.

No relatório de cálculo fornecido pelo *Robot Structural Analysis* não são apresentados resultados relativos a este assunto, razão pela qual se considera que o programa não faz esta verificação.

O Quadro 5.20 compara os resultados obtidos relativamente à verificação da Viga B₁ à encurvadura por esforço transversal (enfundamento).

Quadro 5.20 – Verificação da resistência da Viga B₁ à encurvadura por esforço transversal.

	d/t_w	$\frac{72}{\eta} \varepsilon$	χ_w	λ_w	$V_{bw,Rd}$ kN	$V_{bf,Rd}$ kN	$V_{b,Rd}$ kN	$Ef.$
<i>AciariUM</i>	77,3	55,5	0,86	0,96	677,6	6,6	684,1	10%
<i>Robot SA</i>	77,3	55,5	-	-	-	-	-	-
<i>CYPE 3D</i>	77,3	55,5	0,86	0,97	673,6	-	677,6	10%

O *CYPE 3D* não tem em conta a contribuição do banzo ($V_{bf,Rd}$) para a resistência à encurvadura por esforço transversal.

5.6.8 Verificação da Viga B₁ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)

A análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão é realizada no Interface V da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.37).

Note-se que o momento crítico elástico $M_{cr,E}$, que transita do Interface IV, é determinado, neste caso, com base nas propriedades mecânicas da secção central do elemento de barra, depois de aplicados os procedimentos definidos em 5.6.6. No mesmo contexto, o parâmetro χ_{LT} é calculado com base nas propriedades mecânicas da secção a verificar (S4) mas considerando o momento crítico M_{cr} determinado com base nas propriedades da secção transversal intermédia. É ativada a opção de definição manual dos coeficientes de momento uniforme $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$. Aceitam-se os valores propostos pelo *Robot Structural Analysis*: $C_{my,0} = C_{mz,0} = 1,0$.

Os resultados são exibidos de acordo com a Figura 5.37.

The screenshot shows the 'ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO' window. It includes sections for:

- PARÂMETROS ENCURVADURA:** $L_{cr,1}$ 15,00, $L_{cr,2}$ 1,65, L 5,00, λ_y 0,64, λ_z 0,54, λ_{cr} 0,747, χ_y 0,82, χ_z 0,82, χ_{LT} 0,61.
- ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS:** $N_{cr,1}$ 7771 kN, $N_{cr,2}$ 10934 kN, $N_{cr,T}$ 16285 kN.
- COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE:** M_{cr}^E 3619 kN.m, C_1 1,29, λ_0 0,44. The calculation formula is shown: $> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}$. Coefficients C_{my} , C_{mz} , and $C_{mz,0}$ are all set to 1,00.
- FATORES:** a_{LT} 1,00, b_{LT} 0,00, c_{LT} 0,31, d_{LT} 0,05, e_{LT} 3,23. Other factors: C_{my} 1,00, C_{mz} 0,86, $C_{mz,0}$ 0,99, $C_{mz,0}$ 0,97.
- FATORES DE INTERAÇÃO:** k_{yy} 1,01, k_{zz} 1,01, k_{yz} 1,01, k_{zy} 1,01.
- CONDICÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y:** $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0$ (OK 97%).
- CONDICÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z:** $\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0$ (OK 97%).

Figura 5.37 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global da Viga B₁ sujeita a flexão composta com compressão.

O Quadro 5.21 compara os resultados obtidos relativamente à verificação da Viga B₁ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão.

Quadro 5.21 – Verificação da resistência da Viga B₁ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global).

	$N_{cr,y}$ kN	$N_{cr,z}$ kN	$N_{cr,T}$ kN	λ_0	C_{my}	C_{mz}	C_{mLT}	a_{LT}	b_{LT}	c_{LT}	d_{LT}	e_{LT}
<i>AciariUM</i>	7771	10934	16285	0,46	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,31	0,05	3,23
<i>Robot SA</i>	6475	10905	16162	0,46	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,33	0,06	3,47
<i>CYPE 3D</i>	7771	10934	16378	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-

	C_{yy}	C_{yz}	C_{zy}	C_{zz}	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	Verificação (Exp.6.61)	Verificação (Exp.6.62)
<i>AciariUM</i>	1,00	0,86	0,99	0,97	1,01	1,01	1,01	1,01	97%	97%
<i>Robot SA</i>	1,00	0,85	0,99	0,97	1,01	1,01	1,01	1,01	97%	98%
<i>CYPE 3D</i>	-	-	-	-	1,01	1,01	1,01	1,01	70%	70%

As diferenças nos resultados para o caso do programa *CYPE 3D* estão relacionadas com o facto de o *software* não permitir considerar a carga aplicada a um nível que não o correspondente ao centro de corte da secção transversal, o que se reflete, no que diz respeito a este cálculo, no valor de χ_{LT} .

5.6.9 Relatório final de segurança (Viga B₁)

A Viga B₁ do Pórtico 3, caso mais condicionante de entre os elementos do Grupo 2 (grupo definido de acordo com o Quadro 5.9), verifica a segurança em relação aos estados limite últimos. A taxa de eficiência, de acordo com a ferramenta *AciariUM*, é de 97%.

No Interface VI da ferramenta *AciariUM* é produzido um relatório de cálculo completo pronto a ser exportado, que é apresentado no Anexo E.2 deste documento. Os relatórios de cálculo produzidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para este caso são apresentados nos anexos E.3 e E.4, respetivamente.

O Quadro 5.22 resume e compara os principais resultados obtidos no processo de verificação.

Quadro 5.22 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação da Viga B₁.

	$N_{c,Rd}$ kN	$M_{y,Rd}$ kN.m	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{z,Rd}$ kN.m	$V_{y,Rd}$ kN	FCD	$N_{b,y,Rd}$ kN	$N_{b,z,Rd}$ kN	$M_{b,Rd}$ kN.m	$V_{b,Rd}$ kN	Ver. (6.61)	Ver. (6.62)
<i>AciariUM</i>	3207,6	703,0	785,0	49,4	1066,9	60%	2614,7	2627,2	430,7	684,1	97%	97%
<i>Robot SA</i>	3207,6	703,0	942,0	49,4	1066,9	60%	2531,1	2646,0	431,2	-	97%	98%
<i>CYPE 3D</i>	3207,6	703,0	785,0	49,4	1066,9	60%	-	-	604,1	677,6	70%	70%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.51).

As diferentes abordagens consideram diferentes áreas A_v resistentes ao esforço transversal, o que se reflete nos valores da resistência da secção transversal ao corte.

As diferenças nos resultados apresentados pelo *CYPE 3D* acontecem principalmente porque o programa não permite considerar a aplicação da carga ao nível do topo da secção transversal, o que se reflete no valor do momento crítico M_{cr} .

5.7 Verificação de segurança aos ELU – Viga B₂ (Pórtico 4)

A secção transversal da Viga B₂ é constituída pelo perfil laminado comercial *IPE 330* (S275).

No Anexo F.1 são documentados os Interfaces da ferramenta *AciariUM* usada para verificação de segurança aos ELU da Viga B₂ do Pórtico 4. Os dados e os resultados que nele figuram dizem respeito a esse cálculo.

O elemento a verificar é caracterizado geometricamente de acordo com os dados na Figura 5.38.

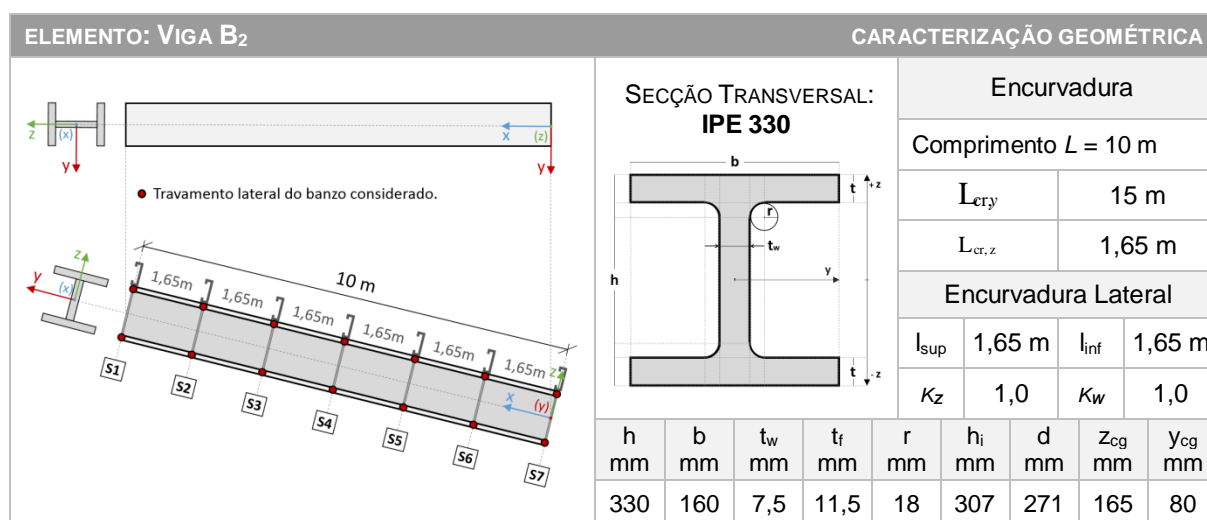


Figura 5.38 – Caracterização geométrica da Viga B₂.

O elemento é um tramo da Viga B. A Viga B tem comprimento total de 15 m. Considera-se o comprimento de encurvadura em torno do eixo y igual ao comprimento da viga ($L_{cr,y} = 15$ m).

Toma-se o comprimento de encurvadura do tramo a analisar em torno do eixo z igual ao comprimento entre secções lateralmente contraventadas, isto é, entre madres ($L_{cr,z} = 1,65$ m).

A encurvadura para fora do plano é evitada com recurso a um sistema composto já definido para o caso anterior de acordo com as Figuras 5.21 e 5.22 [6].

De acordo com a estratégia definida em 5.3.3 a Viga B₂ é modelada no programa *CYPE 3D* (Figura 5.39) dividida em tramos de comprimento igual à distância entre secções lateralmente contraventadas.

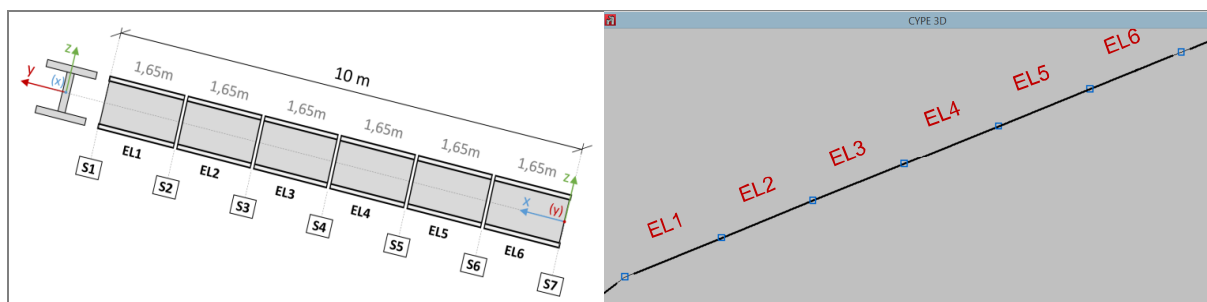


Figura 5.39 – Estratégia de modelação da Viga B₂ no CYPE 3D.

Não existem restrições à rotação em torno do eixo z nas secções de extremidade dos tramos de comprimento l . Para cada tramo são comunicados ao programa os comprimentos de encurvadura, $L_{cr,y} = 15,0\text{m}$ e $L_{cr,z} = 1,65\text{m}$, e os comprimentos de encurvadura lateral de cada banzo, $L_{cr,z}^{\text{banzo}} = 1,65\text{m}$. A verificação incide sobre o mais condicionante dos seis tramos (EL6).

5.7.1 Caracterização geométrica da secção transversal

Embora o perfil *IPE 330* exista na base de dados da ferramenta *AciariUM*, opta-se por ativar no Interface I o Módulo Robot Structural Analysis para recolher automaticamente as principais dimensões da secção transversal a partir de um ficheiro do programa *Robot Structural Analysis* aberto no computador. A ferramenta *AciariUM* parte dessa informação para calcular automaticamente as propriedades mecânicas da secção transversal (Figura 5.40).

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA															INFO ?			
ELEMENTO		SECCÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
NO.	L m			h mm	b _s mm	b _i mm	t _w mm	t _s mm	t _i mm	r _s mm	r _i mm	A cm ²	z _{CG} mm	y _{CG} mm	h _i mm	d mm	cs _s mm	cs _i mm
15	1,67	IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271,0	0,00	0,00

Figura 5.40 – Interface I (excerto): definição das dimensões do Perfil *IPE 330*.

O Quadro 5.23 compara os principais resultados obtidos no que diz respeito às propriedades mecânicas da secção transversal *IPE 330*.

Quadro 5.23 – Propriedades mecânicas da secção transversal *IPE 330*.

	A	I _y	W _y	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _z	W _{pl,z}	i _z	A _{vy}	I _T
	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴
<i>AciariUM</i>	62,6	11767	713,1	804,3	13,7	30,8	788	98,5	153,7	3,5	39,6	28,1
<i>Robot SA</i>	62,6	11767	-	804,0	-	30,8	1095	-	153,7	-	42,3	25,7
<i>CYPE 3D</i>	62,6	11770	713,1	804,0	-	24,8	788	98,5	154,0	-	39,6	28,2

5.7.2 Definição dos esforços de cálculo na secção condicionante e caracterização geométrica do sistema estrutural

Identifica-se como condicionante a secção S7 da Viga B₂ onde atuam os esforços identificados na Figura 5.41. A Combinação de ações ELU 2 é a condicionante.

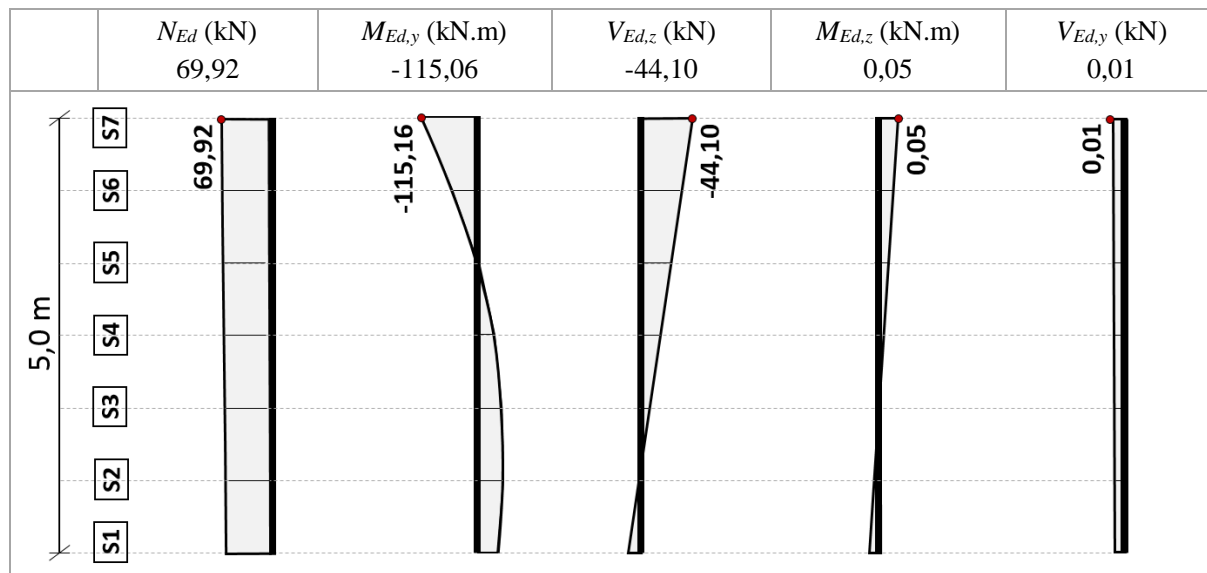


Figura 5.41 – Diagramas de esforços na Viga B₂ (Pórtico 4) para a combinação ELU condicionante.

No Interface II da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.42) é ativado o Módulo *Robot Structural Analysis* (consultar 3.5.4). No ficheiro do *Robot Structural Analysis* que contém a modelação do Edifício é selecionada a Viga B₂ do Pórtico 4.

É identificado na ferramenta o Caso de Carga N°10, o correspondente no programa à Combinação 2 (aquela que se identifica como sendo a mais desfavorável).

No separador “*Results Connect*” da barra de ferramentas do Microsoft Excel é dada ordem de cálculo. Os valores de cálculo dos esforços atuantes na secção a verificar são automaticamente recolhidos a partir de um ficheiro do *Robot Structural Analysis* aberto no computador.

Os parâmetros geométricos que definem o sistema estrutural são comunicados à ferramenta no mesmo espaço (Figura 5.42). São inseridos de forma manual nos campos da ferramenta *AciariUM* destinados ao efeito, em coerência com o que foi definido na Figura 5.38: $L = 10$ m; $L_{cr,y} = 15$ m; $L_{cr,z} = 1,65$ m; $l_{sup} = 1,65$ m; $l_{inf} = 1,65$ m.

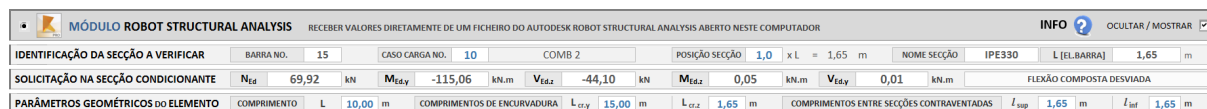


Figura 5.42 – Interface II (excerto): condições de apoio e solicitação da Viga B₂.

5.7.3 Classificação da secção transversal IPE 330

A classificação da secção transversal é realizada no Interface III (Figura 5.43). Todas as abordagens indicam que a secção transversal IPE 330, quando sujeita a flexão composta desviada, é da Classe 1.

Figura 5.43 – Interface III (excerto): classificação da secção transversal IPE 330.

5.7.4 Verificação da resistência da secção IPE 330 aos estados limite últimos

A resistência da secção transversal aos estados limite últimos é verificada no Interface III da ferramenta de cálculo (Figura 5.44).

Figura 5.44 – Interface III (excerto): resistência da secção transversal IPE 330 aos ELU.

O Quadro 5.24 compara os principais resultados obtidos relativamente à verificação da resistência da secção transversal IPE 330 aos estados limite últimos.

Quadro 5.24 – Verificação da resistência da secção transversal *IPe 330* aos ELU.

	$N_{c,Rd}$	$M_{y,Rd}$	$V_{z,Rd}$	$M_{z,Rd}$	$V_{y,Rd}$	$M_{V,y,Rd}$	$M_{V,z,Rd}$	$M_{NV,y,Rd}$	$M_{NV,z,Rd}$	FCD
	kN	kN.m	kN	kN.m	kN	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	
<i>AciariUM</i>	1721,7	221,2	489,2	42,3	625,4	221,2	42,3	221,2	42,3	27%
<i>Robot SA</i>	1721,7	221,2	489,2	42,3	671,3	-	-	221,1	42,3	27%
<i>CYPE 3D</i>	1721,5	221,1	393,0	42,4	628,3	-	-	221,1	42,4	27%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.49).

5.7.5 Resistência da Viga B_2 à encurvadura (varejamento)

A resistência do elemento à encurvadura (varejamento) é verificada no Interface IV da ferramenta de cálculo (Figura 5.45).

The screenshot shows two panels, A and B, for buckling verification. Panel A is for the Y-axis and Panel B is for the Z-axis. Both show a load $N_{b,y,Rd}$ or $N_{b,z,Rd}$ of approximately 849 kN and 1494 kN respectively, with a safety factor of 8.2% and 4.7% respectively. The interface also displays various geometric and material parameters like $L_{cr,y}$, λ_y , α_y , ϕ_y , χ_y and their counterparts for the Z-axis.

Figura 5.45 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B_2 à encurvadura (varejamento).

O Quadro 5.25 compara os resultados obtidos relativamente à verificação da Viga B_2 à encurvadura (varejamento).

Quadro 5.25 – Verificação da resistência da Viga B_2 à encurvadura (varejamento).

	λ_y	α_y	ϕ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$	Ef.	λ_z	α_z	ϕ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$	Ef.
					kN						kN	
<i>AciariUM</i>	1,26	0,21	1,41	0,49	849,1	8%	0,54	0,34	0,70	0,87	1494,5	5%
<i>Robot SA</i>	1,26	0,21	1,41	0,49	849,1	8%	0,54	0,34	0,70	0,87	1494,5	5%
<i>CYPE 3D</i>	1,24	0,21	1,38	0,50	842,9	8%	0,53	0,34	0,70	0,87	1494,5	5%

As diferenças nos resultados devolvidos pelo *CYPE 3D* justificam-se pelo facto de o programa ter considerado para a secção transversal, e exclusivamente para os cálculos relacionados com a resistência da secção transversal à compressão e com a resistência do elemento à encurvadura (varejamento), a Classe 4.

5.7.6 Resistência da Viga B_2 à encurvadura lateral (bambeamento)

A resistência do elemento à encurvadura lateral (bambeamento) é verificada no Interface IV da ferramenta de cálculo (Figura 5.46).

Identifica-se o banzo superior, por ser o banzo comprimido pelo esforço de flexão em torno do eixo y na secção condicionante, aquele que é suscetível de sofrer deste fenómeno de instabilidade.

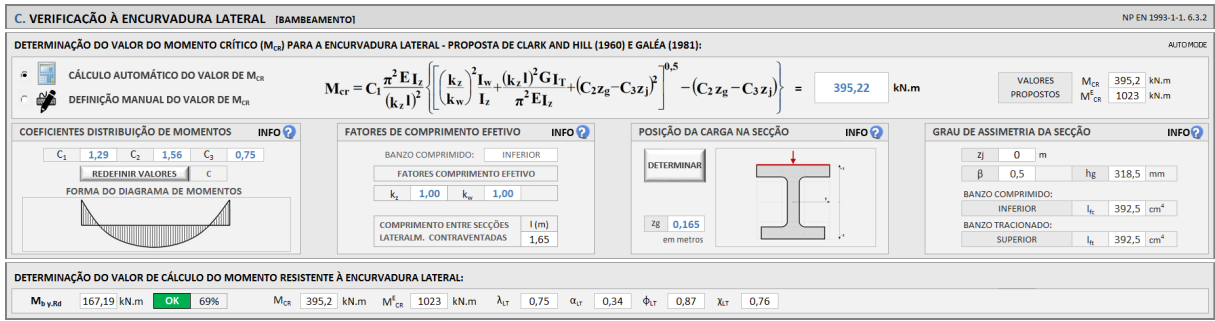


Figura 5.46 – Interface IV (Excerto): resistência da Viga B₂ à encurvadura lateral (bambeamento).

No Interface IV, na janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos, é selecionada a opção marcada na Figura 5.47. O parâmetro z_g é automaticamente determinado pela ferramenta *AciariUM* depois de marcada na janela apresentada na Figura 5.48 a opção correspondente à aplicação da carga ao nível da face superior da secção transversal.

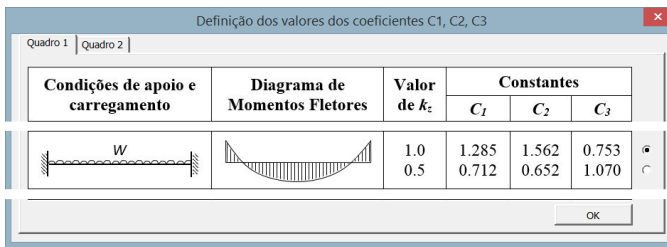


Figura 5.47 – Janela de definição dos coeficientes distribuição de momentos (Viga B₂).

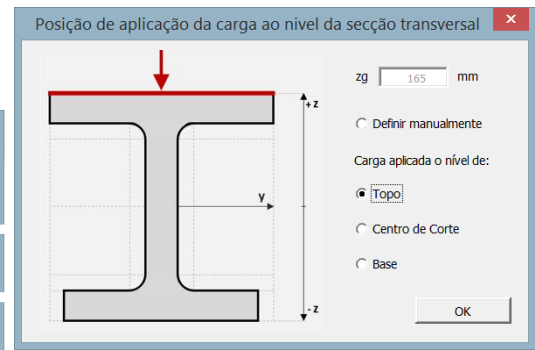


Figura 5.48 – Janela de definição do parâmetro z_g (Viga B₂).

Ainda no Interface IV é marcada a opção correspondente ao cálculo automático do valor do momento crítico. O valor proposto para o parâmetro é automaticamente transportado para a janela destinada à sua definição.

O Quadro 5.26 compara os resultados obtidos relativamente à verificação do elemento à encurvadura lateral (bambeamento).

Quadro 5.26 – Verificação da resistência da Viga B₂ à encurvadura lateral (bambeamento).

	C_1	C_2	C_3	L	$k_{z,inf}$	$k_{w,inf}$	z_g	M_{CR}	λ_{LT}	α_{LT}	ϕ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	Ef
				m			mm	kN.m						
<i>AciariUM</i>	1,29	1,56	0,75	1,65	1,00	1,00	165,0	395,22	0,75	0,34	0,87	0,76	167,2	69%
<i>Robot SA</i>	1,28	1,56	0,75	1,65	1,00	1,00	165,0	392,35	0,75	0,34	0,88	0,75	166,8	69%
<i>CYPE 3D</i>	1,29	1,00	1,00	1,65	1,00	1,00	0,0	1319,3	0,41	0,34	0,62	0,92	203,9	55%

O *CYPE 3D* não permitiu considerar a carga aplicada ao nível da face superior da secção transversal. Este é o motivo para as diferenças nos resultados obtidos face às outras abordagens. Esta é uma opção que não está do lado da segurança.

5.7.7 Resistência da Viga B₂ à encurvadura por esforço transversal (enfundamento)

De acordo com a ferramenta *AciariUM* (Figura 5.49) e o programa *CYPE 3D* não existe necessidade de verificar a Viga B₂ à encurvadura por esforço transversal (enfundamento).

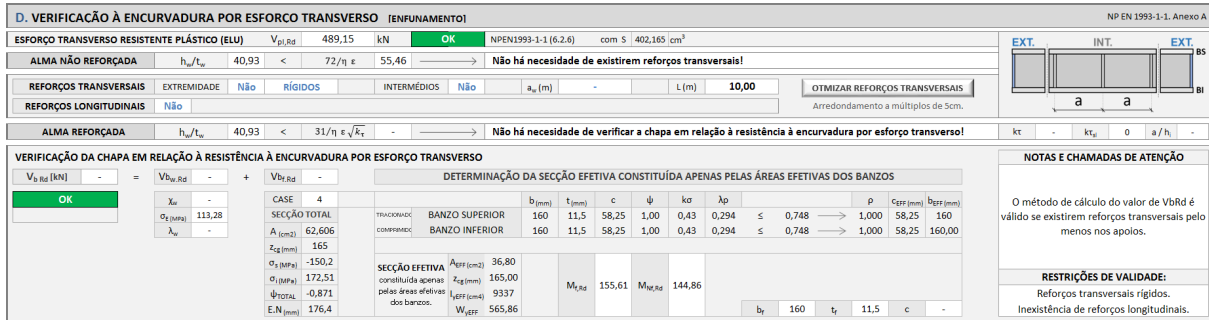


Figura 5.49 – Interface IV (excerto): resistência da Viga B₂ à encurvadura por esforço transversal.

No relatório de cálculo fornecido pelo *Robot Structural Analysis* não foram apresentados resultados relativos a este assunto, razão pela qual se considera que o programa não faz esta verificação.

5.7.8 Verificação da Viga B₂ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global)

A análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão é realizada no Interface V da ferramenta *AciariUM* (Figura 5.50).

É ativada a opção de definição manual dos coeficientes de momento uniforme $C_{my,0}$ e $C_{mz,0}$. Aceitam-se os valores propostos pelo *Robot Structural Analysis*: $C_{my,0} = C_{mz,0} = 1,0$.

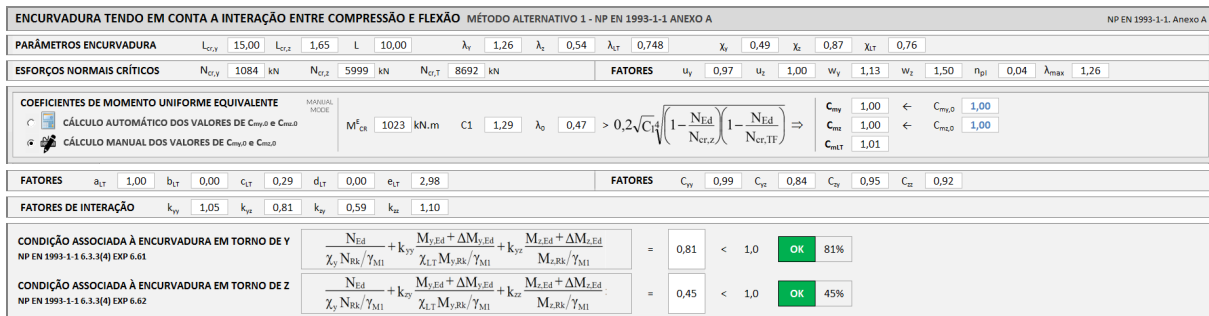


Figura 5.50 – Interface V (excerto): análise de estabilidade global da Viga B₂ sujeita a flexão composta com compressão.

O Quadro 5.27 compara os resultados obtidos relativamente à verificação à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global).

Quadro 5.27 – Verificação da resistência da Viga B₂ à encurvadura tendo em conta a interação entre os esforços de compressão e flexão (estabilidade global).

	$N_{cr,y}$ kN	$N_{cr,z}$ kN	$N_{cr,T}$ kN	λ_0	C_{my}	C_{mz}	C_{mLT}	a_{LT}	b_{LT}	c_{LT}	d_{LT}	e_{LT}
<i>AciariUM</i>	1083,9	5999,3	8691,9	0,47	0,99	1,00	1,00	1,00	0,00	0,29	0	2,98
<i>Robot SA</i>	1083,9	6000,0	8622,8	0,47	0,99	1,00	0,99	1,00	0,00	0,30	0,00	3,02
<i>CYPE 3D</i>	1081,4	5875,8	3026,6	0,84	0,99	1,00	1,02	1,00	0,00	0,23	0,04	2,36

	C_{yy}	C_{yz}	C_{zy}	C_{zz}	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	Verificação (Exp.6.61)	Verificação (Exp.6.62)
<i>AciariUM</i>	0,99	0,84	0,95	0,92	1,05	0,81	0,59	1,10	81%	45%
<i>Robot SA</i>	0,99	0,83	0,95	0,92	1,03	0,81	0,58	1,10	80%	45%
<i>CYPE 3D</i>	0,99	0,87	0,94	0,93	1,05	0,78	0,59	1,09	67%	39%

As diferenças nos resultados para o caso do programa *CYPE 3D* estão relacionadas com o facto de o *software* não permitir considerar a carga aplicada a um nível que não o correspondente ao centro de corte da secção transversal, o que se reflete, no que diz respeito a este cálculo, no valor de χ_{LT} .

5.7.9 Relatório final de segurança (Viga B₂)

A Viga B₂ do Pórtico 3, caso mais condicionante de entre os elementos do Grupo 3 (grupo definido de acordo com o Quadro 5.9), verifica a segurança em relação aos estados limite últimos. A taxa de eficiência, de acordo com a ferramenta *AciariUM*, é de 80%.

No Interface VI da ferramenta *AciariUM* é produzido um relatório de cálculo completo pronto a ser exportado, que é apresentado no Anexo F.2 deste documento. Os relatórios de cálculo produzidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para este caso são apresentados nos anexos F.3 e F.4, respetivamente.

O Quadro 5.28 resume e compara os principais resultados obtidos no processo de verificação.

Quadro 5.28 – Resumo dos resultados relativos ao processo de verificação da Viga B₂.

	$N_{c,Rd}$ kN	$M_{y,Rd}$ kN.m	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{z,Rd}$ kN.m	$V_{y,Rd}$ kN	FCD	$N_{b,y,Rd}$ kN	$N_{b,z,Rd}$ kN	$M_{b,Rd}$ kN.m	$V_{b,Rd}$ kN	Ver. (6.61)	Ver. (6.62)
<i>AciariUM</i>	1721,7	221,2	489,2	42,3	625,4	27%	849,1	1494,5	167,2	-	81%	45%
<i>Robot SA</i>	1721,7	221,2	489,2	42,3	671,3	27%	849,1	1494,5	166,8	-	80%	45%
<i>CYPE 3D</i>	1721,5	221,1	393,0	42,4	628,3	27%	842,9	1494,5	203,9	-	67%	39%

FCD – verificação à flexão composta desviada (eficiência) de acordo com o critério na Equação (4.49).

As diferentes abordagens consideram diferentes áreas A_v resistentes ao esforço transversal, o que se reflete nos valores da resistência da secção transversal ao corte.

As diferenças nos resultados apresentados pelo *CYPE 3D* acontecem principalmente porque o programa não permite considerar a aplicação da carga ao nível da face superior da secção transversal, o que se reflete no valor do momento crítico M_{cr} .

6.1 Considerações finais

Ao longo de todo o documento foram feitas observações, justificadas opções e tiradas conclusões. Como síntese são referidas neste capítulo algumas considerações finais relativamente ao projeto desenvolvido no contexto desta dissertação.

Do estudo comparativo realizado no Capítulo 2 deste documento pode concluir-se que o *Robot Structural Analysis* é o programa que reúne mais valências e versatilidade no tipo de análise levada a cabo neste documento.

A utilização de programas comerciais de análise estrutural implica conhecer as particularidades do software escolhido, de forma a adequar estratégias de modelação em função das suas características. É importante perceber as limitações de cada programa para poder interpretar corretamente os resultados. É essencial controlar e validar de forma sistemática os principais parâmetros devolvidos para produzir resultados com segurança.

De entre os principais aspetos a serem considerados aquando da utilização de um dos programas comerciais de cálculo referidos neste documento chama-se a atenção para:

- a impossibilidade de o *CYPE 3D* considerar a carga aplicada a um nível que não o correspondente ao centro de corte da secção transversal, aspeto que, em algumas situações, poderá estar do lado da insegurança;
- a eventual necessidade de respeitar uma estratégia de modelação, de acordo com o definido em 5.3.3, que permita traduzir corretamente as condições de travamento do elemento e assim quantificar corretamente os parâmetros relacionados com a análise à encurvadura lateral (bambeamento).

Porque alguns dos programas comerciais de análise estrutural disponíveis no mercado não permitem ao utilizador total controlo sobre os procedimentos que dão origem aos resultados que lhe são apresentados, justifica-se a importância de dispor de ferramentas práticas, intuitivas e de utilização simples que contrariem essa tendência, e que permitam validar os resultados devolvidos por esses programas.

Considera-se que a ferramenta *AciariUM* é capaz de responder às referidas necessidades. Aproxima o processo de cálculo, no que diz respeito ao controlo que permite ao utilizador sobre

esse processo, do cálculo manual: todo o algoritmo e procedimento de cálculo relativo a cada parâmetro está constantemente disponível para consulta. Foi ainda desenvolvida uma ligação da ferramenta com o programa *Robot Structural Analysis* para permitir a comunicação automática de dados entre os dois, tornando o processo de validação de resultados rápido e simples.

A *AciariUM* está organizada em interfaces. Cada um desses interfaces realiza procedimentos específicos bem definidos e foi desenhado com preocupação organizativa e estética. A ferramenta dispõe de diferentes módulos de introdução de dados que a tornam bastante versátil. Produz um relatório final de cálculo pronto para exportação. Este documento, em particular o terceiro capítulo, serve como um manual de utilização da ferramenta que deve sempre acompanhá-la.

A metodologia de cálculo de verificação aos estados limite últimos de vigas-coluna em aço está definida na NP EN 1993-1-1 [1]. Existem, no entanto, alguns aspetos que não estão totalmente detalhados. Na bibliografia consultada encontram-se, por vezes, diferentes métodos para dar solução a um mesmo problema. A escolha das metodologias de cálculo implementadas teve por base a procura da solução mais equilibrada. Para cada problema, a solução implementada deve ser eficiente, ter larga aceitação na bibliografia consultada, e ser geral, na medida em que é válida para o maior número de casos.

De entre os procedimentos cuja metodologia adotada pode ser menos consensual, por existirem outras propostas para resolução desses problemas, destacam-se os seguintes:

- Determinação do valor do Momento Crítico para a encurvadura lateral, M_{cr} . A NP EN 1993-1-1 [1] não fornece orientações relativamente à determinação deste parâmetro. Existem vários métodos propostos para a sua determinação. Foi implementada a proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [6], de acordo com 4.10.1, por ser aquela que mais aceitação tem junto da maioria dos autores e trabalhos científicos incluídos na bibliografia consultada e dos programas testados.
- Determinação das propriedades efetivas das secções transversais da Classe 4. De acordo com o explicado em 4.7.2, existem métodos iterativos que consideram o estado de tensão real na peça e que são, em regra, um pouco mais favoráveis que o adotado. Este tema foi alvo de um intenso trabalho de procura da melhor solução e os referidos métodos iterativos foram implementados em versões provisórias da ferramenta de cálculo. Identificou-se que o método aproximado é o mais indicado por ser aquele que é válido para o maior número de casos. É portanto este o método incluído na versão final da *AciariUM*.
- Determinação da área A_{vy} resistente ao esforço transversal V_y . A proposta apresentada em 4.4.2 está coerente com a maior parte da bibliografia consultada, não é, no entanto, totalmente consensual que, no caso de perfis laminados, a área A_{vy} corresponde à área dos banzos.

- Consideração dos efeitos da presença do esforço transversal no cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta. O método adotado em 4.8.5 resulta da interpretação das orientações fornecidas pelo Eurocódigo 3. Não foram encontrados na bibliografia exemplos de aplicação que corroborassem este método nem que propusessem um outro.

O trabalho desenvolvido em colaboração com a empresa CASAIS – Engenharia e Construção S.A. atesta a eficiência da ferramenta *AciariUM* por comparação dos resultados por ela fornecidos com os devolvidos pelos programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para o caso estudado.

A realização deste projeto envolveu outras atividades. Trabalhar de perto com o departamento técnico da empresa CASAIS - Engenharia e Construção S.A. revelou-se um contributo valioso para o trabalho desenvolvido. Uma visita à serralharia O Setenta em Adáufe (Braga) permitiu conhecer o processo de fabricação de estruturas metálicas e algumas generalidades sobre tendências do mercado.

6.2 Desenvolvimentos futuros

A ferramenta de cálculo *AciariUM* é editável por qualquer pessoa que tenha conhecimentos em Microsoft Office Excel e Visual Basic. Este aspeto tem como objetivo motivar desenvolvimentos futuros e confere-lhe grande margem para progressão. O utilizador poderá facilmente adicionar á ferramenta *AciariUM* novos conjuntos de procedimentos que, somados aos já existentes, deem resposta às suas necessidades.

Apesar de o trabalho desenvolvido ter ido além daquilo que foi inicialmente proposto e incluir também assuntos que pertencem já à parte 5 do conjunto de normas NP EN 1993 [3], existe ainda um conjunto quase ilimitado de matérias que poderão ser incluídas na ferramenta de cálculo. A escolha de novas matérias que possam integrar a *AciariUM* virá sempre em função das necessidades de cada utilizador.

Propõe-se, com vista a desenvolvimentos futuros, algumas matérias que, no contexto dos assuntos abordados neste projeto, se revelaram mais pertinentes aquando da aplicação da ferramenta a casos práticos:

- A ferramenta *AciariUM* é direcionada para a verificação aos estados limite últimos de vigas-coluna em aço. Propõe-se criar um novo interface que apoie a realização de verificações relacionadas com os estados limite de utilização de acordo com a secção 7 da NP EN 1993-1-1 [1]: deformação vertical, deformação horizontal e efeitos dinâmicos.
- A ferramenta *AciariUM* permite a verificação de vigas-coluna em aço constituídas por secções transversais em I ou H. Propõe-se o alargamento da ferramenta para que inclu

outros perfis transversais, como por exemplo perfis em U, T e secções cheias, secções tubulares, cantoneiras e secções em caixão. Deve no entanto notar-se que este não será um trabalho simples, uma vez que implicará alterações profundas na ferramenta ao nível dos conteúdos mas também da sua estrutura, especialmente para o que diz respeito á definição geométrica das secções transversais, ao cálculo das suas propriedades mecânicas, à classificação dessas secções, ao cálculo das áreas resistentes aos esforços transversos, à análise relativamente a fenómenos de instabilidade.

- O Módulo Automático de modelação das condições de apoio, travamento e solitação do elemento estrutural, no Interface II da ferramenta *AciariUM*, permite que três tipos de carga possam ser adicionados ao esquema estrutural: carga pontual (normal à barra), carga uniformemente distribuída (normal à barra) e esforço axial. Propõe-se adicionar a este módulo a possibilidade de introdução de momentos flectores a serem aplicados a qualquer ponto na barra. É um trabalho que não oferece dificuldades.
- No conjunto de procedimentos D do Interface IV, dedicado à verificação à encurvadura por esforço transversal do elemento estrutural, é dimensionado o espaçamento máximo entre reforços transversais, de acordo com a secção 5 da NP EN 1993-1-5 [3], por forma a que seja verificada a resistência ao referido fenómeno de instabilidade. Propõe-se incluir um módulo para dimensionamento desses reforços.

Bibliografia

- [1] NP EN 1993-1-1. 2010, Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CT 115 (LNEC).
- [2] ENV 1993-1-1 (Annex F). Eurocode 3 – Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Afnor, 1992.
- [3] NP EN 1993-1-5. 2012, Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço, Parte 1-5: Elementos estruturais constituídos por placas. CT 115 (LNEC).
- [4] NP EN 1990. 2009, Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas. CT 115 (LNEC).
- [5] NP EN 1992-1-1. 2010, Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CT 115 (LNEC).
- [6] SILVA, L. A. P. S., SIMÕES, R. e GERVÁSIO, H., Design of Steel Structures, ECCS, Ernst Sohn, 2010.
- [7] SILVA, L. A. P. S. e GERVÁSIO, H., Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados, CMM, 2007.
- [8] VALENTE, M.I.B, Apontamentos Teóricos e Práticos de Estruturas Metálicas, Universidade do Minho, 2014.
- [9] RAMOS, R.A.R, Nova filosofia de cálculo de estruturas de aço – Eurocódigo 3, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 1993.
- [10] BEG, D., KUHLMANN, U., DAVAINÉ, L., BRAUN, B., Design of Plated Structures, ECCS, Ernst Sohn, 2010.
- [11] BOISSONNADE, N., GREINER, R., JASPART, J.P. e LINDNER, J., Rules for Member Stability in EN1993-1-1: Background documentation and design guidelines, ECCS, 2006.
- [12] SCHILEICH, J.B., MATHIEU, J. e CONAN, Y., Design Handbook for Braced or Non-Sway Steel Buildings According to Eurocode 3, ECCS, 2000.
- [13] JOHANSSON B., MAQUOI, R., SEDLACEK, G., MÜLLER, C., BEG, D., Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements", ECCS, 2007.

- [14] FARINHA, J. S. Brazão e REIS, A. Correia – Tabelas técnicas, 1998.
- [15] Cype Ingenieros S.A., Calculations Manual: Cype Metal 3D. Spain, 1st edition, November 2010.
- [16] Regulamento de Segurança e Ações para Edifícios e Pontes. 1983. Imprensa Nacional Casa da Moeda.

Estrutura da Ferramenta *AciariUM*

Interfaces e relatório final de cálculo da ferramenta de cálculo *AciariUM*, apresentados de acordo com o Capítulo 3 deste documento.

- A.1** Interface I: Secção transversal e propriedades do material;
- A.2** Interface II: Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural;
- A.3.1** Interface III: Resistência da secção transversal (ELU) – Secção bissimétrica da Classe 1;
- A.3.2** Interface III: Resistência da secção transversal (ELU) – Secção monossimétrica da Classe 1;
- A.3.3** Interface III: Resistência da secção transversal (ELU) – Secção da Classe 3;
- A.3.4** Interface III: Resistência da secção transversal (ELU) – Secção da Classe 4;
- A.4** Interface IV: Fenómenos de Encurvadura;
- A.5** Interface V: Análise da estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão;
- A.6** Interface VI: Relatório final de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM*.

Anexo A.1

AciarUM INTERFACE I. SECÇÃO TRANSVERSAL E PROPRIEDADES DO MATERIAL MÓDULO DE CÁLCULO: COMERCIAL

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε		
IPE	h	b ₂	b ₁	t _w	t _s	t ₁	r _s	r ₁	r ₂	r ₃	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	cs _x	cs _y	I _y	W _{1,y0}	W _{1,y1}	W _{pl,y}	I _y	A _{cc}	I _z	W _{1,z0}	W _{1,z1}	W _{pl,z}	I _z	A _{cc}	I _t	I _w x 10 ³	ε
f _y [MPa]	300	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT										A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES															
h	b ₂	b ₁	t _w	t _s	t ₁	r _s	r ₁	r ₂	r ₃	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	cs _x	cs _y	I _y	W _{1,y0}	W _{1,y1}	W _{pl,y}	I _y	A _{cc}	I _z	W _{1,z0}	W _{1,z1}	W _{pl,z}	I _z	A _{cc}	I _t	I _w x 10 ³	
IPE 300	Perfil Laminado	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,8	150,0	75,0	279	249	0,00	0,00															

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA

ELEMENTO	NO.	L	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT										A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES													
h	b ₂	b ₁	t _w	t _s	t ₁	r _s	r ₁	r ₂	r ₃	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	cs _x	cs _y	I _y	W _{1,y0}	W _{1,y1}	W _{pl,y}	I _y	A _{cc}	I _z	W _{1,z0}	W _{1,z1}	W _{pl,z}	I _z	A _{cc}	I _t	I _w x 10 ³		
IPE 330	15	1,67	IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271,0	0,00	0,00													

TIPO DE PERFIL Laminado

CORDÕES DE SOLDADURA:
NÃO EXISTEM CORDÕES DE SOLDADURA.

CLASSE DE AÇO

CONSTITUINTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL

AÇO DA CLASSE: S275

f_y: 275 MPa

f_u: 430 MPa

PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL

E: 210 GPa

G: 80,77 GPa

v: 0,3

α: 1,20E-06 / K

G_m: 7850 Kg/m³

η: 1,20

COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

γ_{M0}: 1,00

γ_{M1}: 1,00

γ_{M2}: 1,25

Redefinir NP EN 1993-1-1

Redefinir NP EN 1993-1-1

Redefinir NP EN 1993-1-1

João M. M. Eiro
 Prof. Ismael Vilela
 Eng.º Miguel Pires

Figura A.1 – Interface I. Secção transversal e propriedades do material.

INTERFACE II. CONDIÇÕES DE APOIO, TRAVAMENTO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL

MÓDULO DE CÁLCULO: AUTOMATIC

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z										
YPE	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	cs _s	cs _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _z	A _v	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _v	I _t	I _w x 10 ⁴
f _y [MPa]	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9

MÓDULO MANUAL INTRODUÇÃO MANUAL DO VALOR DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ATUANTES NA SECÇÃO A VERIFICAR E DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS QUE CARACTERIZAM O SISTEMA ESTRUTURAL

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L 5,00 m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} 2,50 m L_{cr,z} 2,00 m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS l_{sup} 2,00 m l_{inf} 2,00 m

INFO OCULTAR / MOSTRAR

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER VALORES DIRETAMENTE DE UM FICHEIRO DO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS ABERTO NESTE COMPUTADOR

IDENTIFICAÇÃO DA SECÇÃO A VERIFICAR BARRA NO. 1 CASO CARGA NO. 9 COMB 1 POSIÇÃO SECÇÃO 0,5 x L = 2,50 m NOME SECÇÃO IPE 300 L [EL.BARRA] 5,00 m

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L 5,00 m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} 2,50 m L_{cr,z} 2,00 m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS l_{sup} 2,00 m l_{inf} 2,00 m

INFO OCULTAR / MOSTRAR

MÓDULO AUTOMÁTICO MODELAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL PARA CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS PARÂMETROS CORRESPONDENTES PELA FERRAMENTA

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L 5,00 m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} 2,50 m L_{cr,z} 2,00 m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS l_{sup} 2,00 m l_{inf} 2,00 m

INFO OCULTAR / MOSTRAR

GEOMETRIA. CONDIÇÕES DE APOIO

L 5,00 m

EXTREM. ESQ. EXTREM. DTA.

δx	Fixo	Fixo
δy	Fixo	Fixo
δz	Fixo	Fixo
θx	Livre	Livre
θy	Fixo	Fixo
θz	Livre	Livre

ESQUEMA ESTRUTURAL EM ALÇADO

ESQUEMA ESTRUTURAL EM PLANTA - TRAVAMENTO P/ VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA (VAREJAMENTO):

ESQUEMA ESTRUTURAL EM ALÇADO - TRAVAMENTO P/ VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL (BAMBEAMENTO):

DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR (M_j)

DIAGRAMA DE ESFORÇO TRANSVERSO (V_j)

SECÇÃO A VERIFICAR (x) 2,50 m

sector mais comprimido.

TRAVAMENTO ENCURVADURA EM TORNO DE Z

x (m)	1,50	3,50	5,00
-------	------	------	------

TRAVAMENTO ENCURVADURA LATERAL (POR FLEXÃO)

Banzo Superior		Banzo Inferior	
x (m)	x (m)	x (m)	x (m)
0,00	0,00	1,50	1,50
3,50	3,50	3,50	3,50

CARREGAMENTO. SOLICITAÇÃO

N_{Ed} (kN) 200,00 β_{ESD} 0,75 β_{DIR} 1,00

CARGAS CONCENTRADAS			CARGAS DISTRIBUÍDAS				
x (m)	P _i (kN)		x (m)	P _z (kN)	x (m)	P _z (kN)	
A	1,5	50	M	0	35	5	35
B	3,5	50	N				
C			O				
D			P				
E			Q				
F			R				
G			S				
H			T				
I			U				
J			V				
K			X				
L			Z				

Comprimento Encurvadura em torno do Eixo Y	L _{cr,y}	2,50	m
Comprimento Encurvadura em torno do Eixo Z	L _{cr,z}	2,00	m
Distância entre travamentos laterais	l	2,00	m
Distância entre travamentos do banzo superior	l _{sup}	2,00	m
Distância entre travamentos do banzo inferior	l _{inf}	2,00	m

Figura A.2 – Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural.

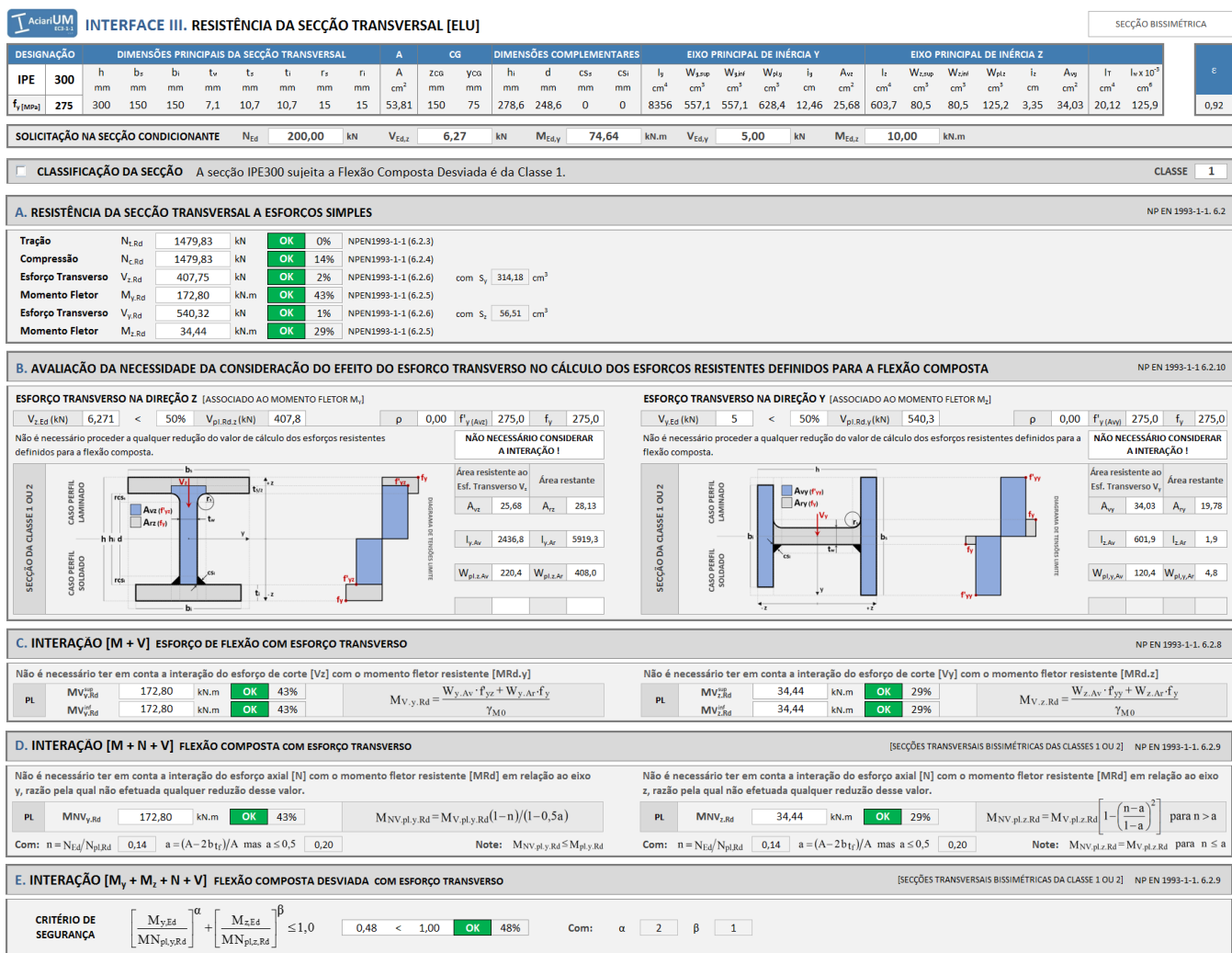
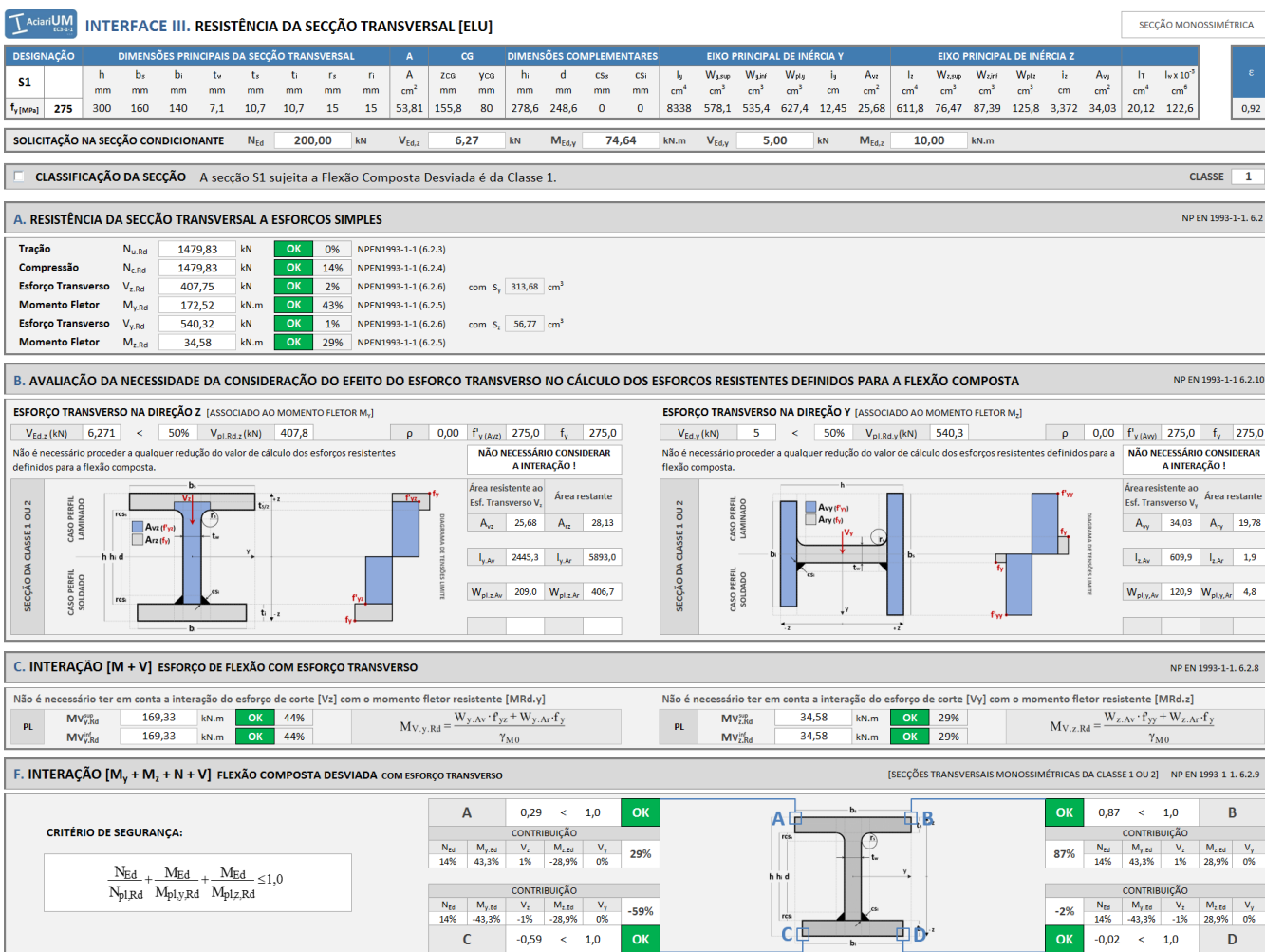


Figura A.3 – Interface III. Resistência da secção transversal aos estados limite últimos: secções bissimétricas da Classe 1 ou 2.



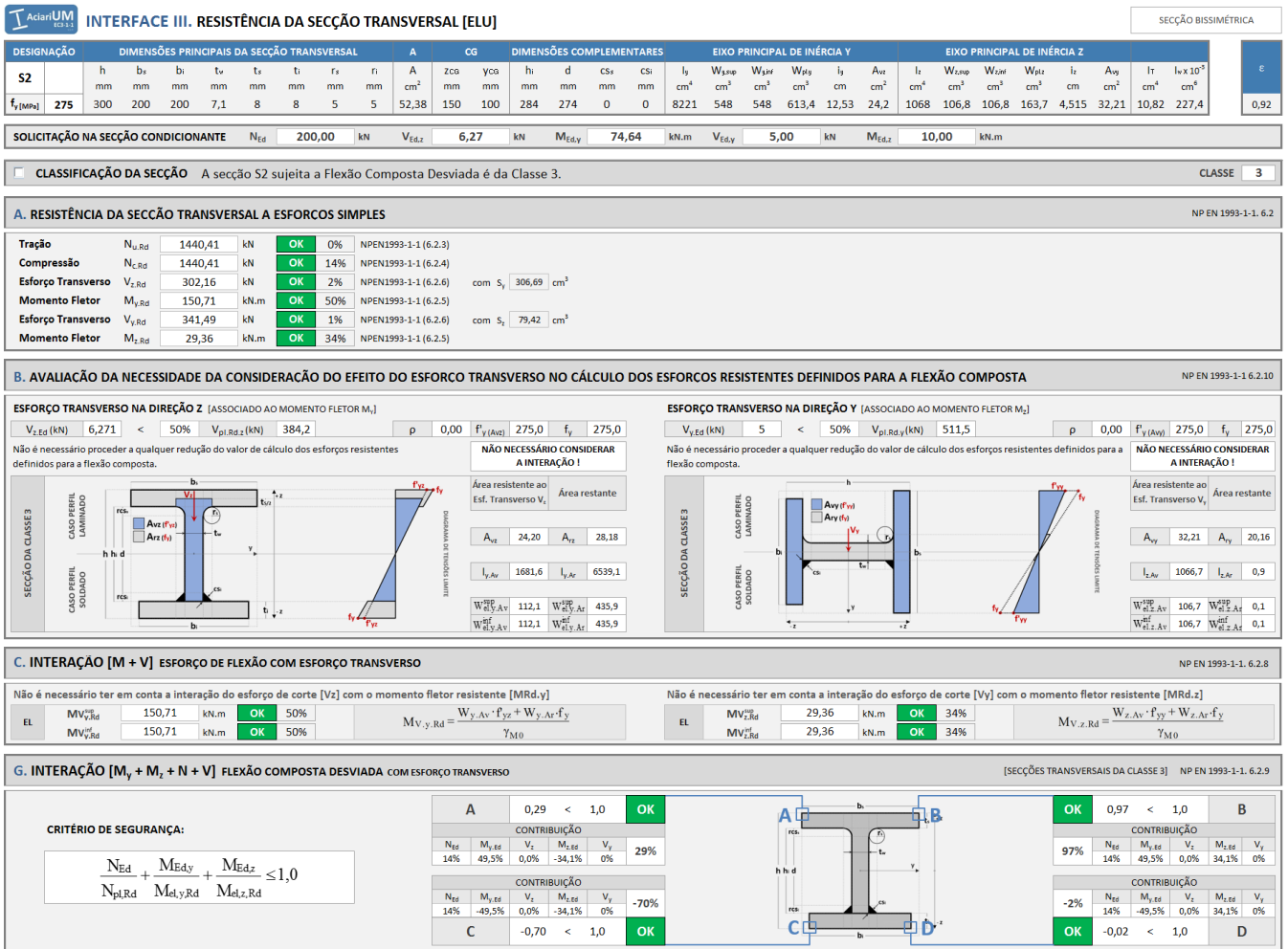


Figura A.5 – Interface III. Resistência da secção transversal aos estados limite últimos: secções da Classe 3.

INTERFACE III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL [ELU]

SECÇÃO BISSIMÉTRICA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε							
S3	h	bs	bi	lv	ts	ti	rs	ri	A	Zca	ycb	hc	d	csz	csi	ly	Wsup	Wsup	Wplz	ly	lz	Wsup	Wsup	Wplz	lz	Avy	It	lx x 10 ³	ε	
f _y [MPa]	300	200	200	7,1	7	7	5	5	48,52	150	100	286	276	0	0	7438	495,9	495,9	558,4	12,38	24,37	934,2	93,42	93,42	143,7	4,388	28,21	8,6	200,3	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção S3 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 4. CLASSE 4

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES EFETIVAS DA SECÇÃO DA CLASSE 4 NP EN 1993-1-1:6.2.9.3 (2)

A_{eff} 47,31 cm² W_{eff,s} 493 cm³ W_{eff,i} 495 cm³ W_{eff,dbr} 93,42 cm³ W_{eff,bsq} 93,42 cm³ e_{Nz}(mm) 0,00 mm Δ_{My} 0,00 kN.m e_{Ny} 0,00 mm Δ_{Mz} 0,00 kN.m

A. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES NP EN 1993-1-1: 6.2

Tração	N _{u,Rd}	1334,32 kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)
Compressão	N _{c,Rd}	1300,89 kN	OK	15%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)
Esforço Transverso	V _{z,Rd}	300,20 kN	OK	2%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _t 278,40 cm ²
Momento Fletor	M _{y,Rd}	135,62 kN.m	OK	55%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	V _{y,Rd}	144,68 kN	OK	3%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _t 71,76 cm ²
Momento Fletor	M _{z,Rd}	25,69 kN.m	OK	39%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)

B. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA NP EN 1993-1-1: 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_y]

V_{Ed,z} (kN) 6,271 < 50% V_{pl,Rd,z} (kN) 386,9 ρ 0,00 F_y(kN) 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso V_z Área restante

A _z	21,72	A _z	26,69
I _{y,Ar}	1678,2	I _{y,Ar}	5735,8
W _{sup,y,Ar}	111,6	W _{sup,y,Ar}	382
W _{inf,y,Ar}	112,1	W _{inf,y,Ar}	383,2

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_z]

V_{Ed,y} (kN) 5 < 50% V_{pl,Rd,y} (kN) 448 ρ 0,00 f_y(kN) 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso V_y Área restante

A _y	28,00	A _y	19,53
I _{z,Ar}	933,333	I _{z,Ar}	0,9
W _{sup,z,Ar}	93,3	W _{sup,z,Ar}	0,1
W _{inf,z,Ar}	93,3	W _{inf,z,Ar}	0,1

C. INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO NP EN 1993-1-1: 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_z] com o momento fletor resistente [MR_{d,y}]

EFF	MV _{z,Rd}	135,62 kN.m	OK	55%	M _{V,y,Rd} = $\frac{W_y \cdot A_v \cdot f_{yz} + W_y \cdot A_r \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	MV _{z,Rd}	136,23 kN.m	OK	55%	

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_y] com o momento fletor resistente [MR_{d,z}]

EFF	MV _{y,Rd}	25,69 kN.m	OK	39%	M _{V,z,Rd} = $\frac{W_z \cdot A_v \cdot f_{yz} + W_z \cdot A_r \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	MV _{y,Rd}	25,69 kN.m	OK	39%	

H. INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS DA CLASSE 4] NP EN 1993-1-1: 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed,y} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{eff,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{eff,z,Rd}} \leq 1,0$$

A	0,31	<	1,0	OK	
CONTRIBUIÇÃO					
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y	31%
15%	53,0%	0,0%	-38,9%	0%	
CONTRIBUIÇÃO					
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y	-78%
15%	-54,8%	0,0%	-38,9%	0%	
C	-0,78	<	1,0	OK	

KO	1,09	>	1,0	B	
CONTRIBUIÇÃO					
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y	109%
15%	53,0%	0,0%	38,9%	0%	
CONTRIBUIÇÃO					
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y	0%
15%	-54,8%	0,0%	38,9%	0%	
D	0,00	<	1,0	D	

João M. Eira
 Prof. Isabel Valente
 Eng. Miguel Pires

Universidade do Minho
 Escola de Engenharia

CASAI

Página | 166

AcariUM INTERFACE IV. FENÓMENOS DE ENCURVADURA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				c							
YPE	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	cs _s	cs _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl_y}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl_z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _w × 10 ²	c
300	300	150	150	7	11	11	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m CLASSE 1

A. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,y,Rd} 1469,70 kN OK 13,6% L_{cr,y} 2,50 λ_y 0,23 α_y 0,21 φ_y 0,53 χ_y 0,99

B. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,z,Rd} 1169,90 kN OK 17,1% L_{cr,z} 2,00 λ_z 0,69 α_z 0,34 φ_z 0,82 χ_z 0,79

C. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL [BAMBEAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.2

DETERMINAÇÃO DO VALOR DO MOMENTO CRÍTICO (M_{cr}) PARA A ENCURVADURA LATERAL - PROPOSTA DE CLARK AND HILL (1960) E GALÉA (1981): AUTOMODE

CÁLCULO AUTOMÁTICO DO VALOR DE M_{cr} $M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z l)^2} \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 I_w + (k_z l)^2 G I_T + (C_2 z_{ge} - C_3 z_j)^2 \right]^{-0,5} - (C_2 z_{ge} - C_3 z_j) = 201,87$ kN.m

VALORES PROPOSTOS M_{cr} 201,9 kN.m M_{cr} 504,9 kN.m

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS INFO? C₁ 1,29 C₂ 1,56 C₃ 0,75

FORMA DO DIAGRAMA DE MOMENTOS

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO INFO? BANCO COMPRIMIDO: SUPERIOR

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO k_y 1,00 k_w 1,00

COMPRIMENTO ENTRE SECÇÕES LATERAL. CONTRAVENTADAS l(m) 2

POSIÇÃO DA CARGA NA SECÇÃO INFO? DETERMINAR z_g 0,150 em metros

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO INFO? z_j 0 m β 0,5 h_g 289,3 mm

BANZO COMPRIMIDO: SUPERIOR I_{yc} 300,9 cm⁴ BANZO TRACIONADO: INFERIOR I_{yt} 300,9 cm⁴

DETERMINAÇÃO DO VALOR DE CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE À ENCURVADURA LATERAL:

M_{b,y,Rd} 123,92 kN.m OK 60% M_{cr} 201,9 kN.m M_{cr} 504,9 kN.m λ_{LT} 0,93 α_{LT} 0,21 φ_{LT} 1,00 χ_{LT} 0,72

D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO] NP EN 1993-1-1. Anexo A

ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (ELU) V_{pl,Rd} 407,75 kN OK NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S 314,178 cm³

ALMA NÃO REFORÇADA h_w/t_w 39,24 < 72/η ε 55,46 Não há necessidade de existirem reforços transversais!

REFORÇOS TRANSVERSAIS EXTREMIDADE Não RÍGIDOS INTERMÉDIOS Não a_w (m) - L (m) 5,00 OTIMIZAR REFORÇOS TRANSVERSAIS

REFORÇOS LONGITUDINAIS Não Arredondamento a múltiplos de 5cm.

ALMA REFORÇADA h_w/t_w 39,24 < 31/η ε √f_{yk} - Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transversal! kt - kt_g 0 a/h_i -

VERIFICAÇÃO DA CHAPA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

V_{b,Rd} [kN] - = V_{b0,Rd} - + V_{b1,Rd} -

OK χ_w - σ_{yk} (MPa) 123,27 λ_w -

DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS

COMPENSAÇÃO	BANZO SUPERIOR	BANZO INFERIOR	b (mm)	t (mm)	c	ψ	κσ	λp	p	c _{EFF} (mm)	b _{EFF} (mm)	
TRACIONADO			150	10,7	56,45	1,00	0,43	0,306	≤ 0,748	→ 1,000	56,45	150
			150	10,7	56,45	1,00	0,43	0,306	≤ 0,748	→ 1,000	56,45	150

SECÇÃO EFETIVA constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos. A_{EFF} (cm²) 32,10 Z_g (mm) 150,00 M_{Ed} 123,19 M_{Ed,Rd} 95,28 I_{y,EFF} (cm⁴) 6720 W_{EFF} 447,97 b_y 150 t_y 10,7 c -

NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO

O método de cálculo do valor de V_{b,Rd} é válido se existirem reforços transversais pelo menos nos apoios.

RESTRICÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.

Figura A.7 – Interface IV. Fenómenos de encurvadura.

AciaUM INTERFACE V. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS EM FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ϕ							
YPE	h	b _s	b	t _v	t _s	t	r _s	r	A	Z _{CG}	y _{CG}	h	d	CS _x	CS _y	I _y	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{pl,z}	I _z	A _w	I _y	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{pl,z}	I _z	A _w	I _t	I _x x 10 ³	ϕ
f _y [MPa]	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,81	150	75	278,6	248,6	0	0	8356	557,1	557,1	628,4	12,46	25,68	603,7	80,5	80,5	125,2	3,35	34,03	20,12	125,9	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 200,00 kN V_{Ed,z} 6,27 kN M_{Ed,y} 74,64 kN.m V_{Ed,y} 5,00 kN M_{Ed,z} 10,00 kN.m CLASSE 1

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO ALTERNATIVO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A NP EN 1993-1-1. Anexo A

PARÂMETROS ENCURVADURA L_{cr,y} 2,50 L_{cr,z} 2,00 L 5,00 λ_y 0,23 λ_z 0,69 λ_{LT} 0,925 χ_y 0,99 χ_z 0,79 χ_{LT} 0,72

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS N_{cr,y} 27710 kN N_{cr,z} 3128 kN N_{cr,T} 4895 kN FATORES u_y 1,00 u_z 0,99 w_y 1,13 w_z 1,50 n_{pl} 0,14 λ_{max} 0,69

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE AUTO MODE CÁLULO AUTOMÁTICO DOS VALORES DE C_{my,0} e C_{mz,0} M^{cr} 504,9 kN.m C1 1,29 λ₀ 0,58 > 0,2√C₁√(1 - N_{Ed}/N_{cr,z})(1 - N_{Ed}/N_{cr,T}) ⇒ C_{my,0} 1,00 C_{mz,0} 1,00 C_{mLT} 1,06

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{Ed,x} ENTRE SECCÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C_{my,0} = 1 + (π²EI_yδ₁/L²M_{Ed,x}(x)) - 1 N_{Ed}/N_{cr,y} ψ_y - δ_y 20 mm VALOR PROPOSTO PARA O PARÂMETRO C_{my,0} 1,01

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{Ed,z} ENTRE SECCÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C_{mz,0} = 1 + 0,03 N_{Ed}/N_{cr,z} ψ_z - δ_z - mm VALOR PROPOSTO PARA O PARÂMETRO C_{mz,0} 1,00

FATORES a_{LT} 1,00 b_{LT} 0,03 c_{LT} 0,39 d_{LT} 0,63 e_{LT} 1,84 FATORES C_{yy} 1,00 C_{yz} 0,88 C_{zy} 0,89 C_{zz} 0,93

FATORES DE INTERAÇÃO k_{yy} 1,07 k_{yz} 0,84 k_{zy} 0,62 k_{zz} 1,14

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 1,02 > 1,0$ KO 102%

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.62 $\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,87 < 1,0$ OK 87%

Jóh M. M. Eira
Prof. Isabel Valente
Eng.º Miguel Pires

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

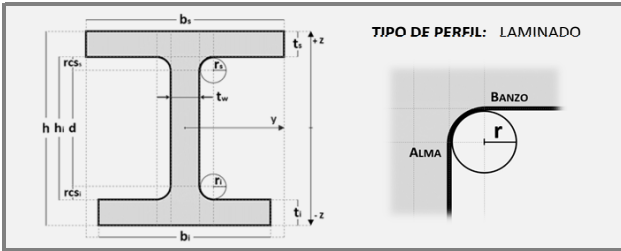
GRUPO CASAI

Figura A.8 – Interface V. Análise da estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão.

O ELEMENTO SUJEITO A FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA E CONSTITUÍDO PELO PERFIL TRANSVERSAL IPE 300 S275 (SECÇÃO DA CLASSE 1) NÃO VERIFICA TODAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA.

KO 102%

DESIGNAÇÃO		DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				PROPRIEDADES		
IPE	300	h	bs	bi	tw	ts	ti	rs	ri	A	zCG	ycG	hi	d	css	csi	E	v	η
f _y [MPa]	275	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	GPa	-	-
		300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,812	150	75	278,6	248,6	0	0	210	0,3	1,2



EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					
I _y	W _{y.sup}	W _{y.inf}	W _{pl.y}	i _y	Av _z
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
8356,1	557,07	557,07	628,36	12,461	25,682

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					
I _z	W _{z.sup}	W _{z.inf}	W _{pl.z}	i _z	Av _y
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
603,73	80,498	80,498	125,22	3,3495	34,031

CLASSE DE RESISTÊNCIA	
AÇO DA CLASSE	S275
f _y	235 MPa
f _u	360 MPa
ε = 0,92	
COEFICIENTES	
γ _{M0}	1,00
γ _{M1}	1,00
γ _{M2}	1,25

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO: N_{Ed} 200,00 kN, M_{Ed.y} 74,64 kN, V_{Ed.z} 6,27 kN.m, M_{Ed.z} 10,00 kN, V_{Ed.y} 5,00 kN.m

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO: A secção IPE sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. CLASSE 1

III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

SECÇÃO BISSIMÉTRICA

RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES						NP EN 1993-1-1. 6.2
Tração	N _{t,Rd}	1479,83	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)
Compressão	N _{c,Rd}	1479,83	kN	OK	14%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)
Esforço Transverso	V _{z,Rd}	407,75	kN	OK	2%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _y 314,18 cm ³
Momento Fletor	M _{y,Rd}	172,80	kN.m	OK	43%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	V _{y,Rd}	540,32	kN	OK	1%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _z 56,51 cm ³
Momento Fletor	M _{z,Rd}	34,44	kN.m	OK	29%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)

AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA

NP EN 1993-1-1 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO EM Z-Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _y]				ESFORÇO TRANSVERSO EM Y-Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _z]					
V _{Ed.z} (kN)	6,27	<	50% V _{pl.z,Rd} (kN) 408	ρ	0,00	f' _y (Av _z)	275	f _y	275
Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.				Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.					
SEÇÃO DA CLASSE 1/2	CASO PERFIL LAMINADO	Área resistente ao Esf. Transv. Vz	Área restante	SEÇÃO DA CLASSE 1/2	CASO PERFIL LAMINADO	Área resistente ao Esf. Transv. Vy	Área restante		
		A _{vz} 25,6817	A _{rz} 28,1303			A _{vy} 34,0314	A _{ry} 19,7806		
		I _{z,Av} 2436,78	I _{z,Ar} 5919,28			I _{z,Av} 601,875	I _{z,Ar} 1,85671		
		W _{pl,vz} 220,389	W _{pl,sz} 407,967			W _{pl,vy} 120,375	W _{pl,sy} 4,84383		

INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS DAS CLASSES 1, 2, 3 OU 4]

NP EN 1993-1-1. 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vz] com o momento fletor resistente [MR _{d.y}]				Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vy] com o momento fletor resistente [MR _{d.z}]			
PLÁSTICO	MV _{y,Rd} ^{sup}	172,80	kN.m	OK	43%	MV _{y,Rd} = $\frac{W_{y,Av} \cdot f_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	
	MV _{y,Rd} ^{inf}	172,80	kN.m	OK	43%		
PLÁSTICO	MV _{z,Rd} ^{sup}	34,44	kN.m	OK	29%	MV _{z,Rd} = $\frac{W_{z,Av} \cdot f_{yy} + W_{z,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	
	MV _{z,Rd} ^{inf}	34,44	kN.m	OK	29%		

INTERAÇÃO [M + N + V] FLEXÃO COMPOSTA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DAS CLASSES 1 OU 2]

NP EN 1993-1-1. 6.2.9

Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo y, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse valor.				Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo z, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse			
PLÁSTICO	MNV _{y,Rd}	172,80	kN.m	OK	43%	MNV _{pl,y,Rd} = MV _{pl,y,Rd} $\left(\frac{1-n}{1-0,5a} \right)$	
						Note: MNV _{pl,y,Rd} ≤ M _{pl,y,Rd} Com: n = N _{Ed} /N _{pl,Rd} 0,14 a = (A - 2b _{tf})/A mas a ≤ 0,5 0,20	
PLÁSTICO	MNV _{z,Rd}	34,44	kN.m	OK	29%	MNV _{pl,z,Rd} = MV _{pl,z,Rd} $\left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]$	
						Note: MNV _{pl,z,Rd} = MV _{pl,z,Rd} para n ≤ a	

INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DA CLASSE 1 OU 2]

NP EN 1993-1-1. 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{MN_{pl,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{MN_{pl,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1,0$	0,48 <	1,00	OK	48%	Com: α 2 β 1
-----------------------	---	--------	------	----	-----	--------------

IV. RESISTÊNCIA DO ELEMENTO A FENÓMENOS DE ENCURVADURA

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b.y,Rd} 1469,70 kN OK 14% L_{cr,y} 2,5 m λ_y 0,23 α_y 0,21 φ_y 0,53 χ_y 0,99

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b.z,Rd} 1169,90 kN OK 17% L_{cr,z} 2 m λ_z 0,69 α_z 0,34 φ_z 0,82 χ_z 0,79

MOMENTO CRÍTICO PARA A ENCURVADURA LATERAL M_{cr}:

VALOR DO MOMENTO CRÍTICO M_{cr} CALCULADO AUTOMÁTICAMENTE PELA FERRAMENTA:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\frac{(k_z)^2 I_w + (k_z l)^2 G I_T + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2}{(k_w)^2 I_z} \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} = 201,87 \text{ kN.m} \quad M_{CR_E} = 504,94 \text{ kN.m}$$

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS

C1 1,29 C2 1,56 C3 0,75

FORMA DO DIAGRAMA DE MOMENTOS

FATORES DE COMPRIM. EFETIVO

BANZO SUPERIOR COMPRIMIDO

l	2	m
k _z	1,00	k _w 1,00

POSIÇÃO DA CARGA AO NÍVEL DA SECÇÃO

z_g 0,15 m

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO

z_j = 0,8 · (2 · β_f - 1) · h_g / 2,0 quando β_f > 0,5

z_j = 1,0 · (2 · β_f - 1) · h_g / 2,0 quando β_f > 0,5

β_f 0,5 h_g 289,3 mm z_j 0 m

M_{b,Rd} 123,92 kN.m **OK** 60% M_{cr} 201,87 kN.m M_{CR_E} 504,94 kN.m λ_{LT} 0,93 α_{LT} 0,21 φ_{LT} 1,00 χ_{LT} 0,72

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO]

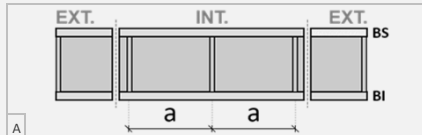
ALMA NÃO REFORÇADA:

h_w/t_w 39,239 < 72/η ε 55,465 → Não há necessidade de existirem reforços transversais!

ALMA COM REFORÇOS TRANSVERSAIS:

EXTREMIDADE Não INTERMÉDIOS Não ESPAÇAMENTO ENTRE REFORÇOS: a_w - m

h_w/t_w 39,239 < 31/η ε √k_τ - → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço trans k_τ - k_{τ,sl} 0,00



VERIFICAÇÃO DA ALMA EM RELAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

CONTRIBUIÇÃO DA ALMA V_{b,w,Rd} - kN V_{bw,Rd} = $\frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$ com χ_w - σ_E 123,27 MPa λ_w -

CONTRIBUIÇÃO BANZOS V_{b,f,Rd} - kN V_{bf,Rd} = $\frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$ com M_{Nf,Rd} 95,28

V_{b,Rd} - kN **OK**

V. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO À ESTABILIDADE GLOBAL

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS N_{cr,y} 27710,3 kN N_{cr,z} 3128,26 kN N_{cr,t} 4895,01 kN FATORES u_y 1,00 u_z 0,99 w_y 1,13 w_z 1,50 η_{pl} 0,14 λ_{max} 0,69

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME:

VALORES DOS PARÂMETROS C_{my,0} e C_{mz,0} CALCULADOS AUTOMATICAMENTE PELA FERRAMENTA:

C_{my,0} QUADRO A.2 NPEN1993-1-1 OPÇÃO LINHA Nº 2 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{ed,y} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C_{mi,0} = $1 + \left(\frac{\pi^2 EI_x |\delta_x|}{L^2 |M_{i,Ed}(X)|} - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ ψ_y - δ_y 20 mm C_{my,0} 1,01

C_{mz,0} QUADRO A.2 NPEN1993-1-1 OPÇÃO LINHA Nº 4 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{ed,z} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C_{mi,0} = $1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ ψ_z - δ_z - mm C_{mz,0} 1,00

λ₀ = $\sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = 0,58 > 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}} \right)} = 0,22 \Rightarrow C_{my} 0,00 C_{mz} 1,00 C_{mLT} 0,00$

FATORES a_{LT} 1,00 b_{LT} 0,03 c_{LT} 0,39 d_{LT} 0,63 e_{LT} 1,84 FATORES C_{yy} 1,00 C_{yz} 0,88 C_{zy} 0,89 C_{zz} 0,93

FATORES DE INTERAÇÃO k_{yy} 1,07 k_{yz} 0,84 k_{zy} 0,62 k_{zz} 1,14

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 1,02 > 1,0$ **KO** 102%

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,87 < 1,0$ **OK** 87%

ANEXO I. NOTAÇÃO:

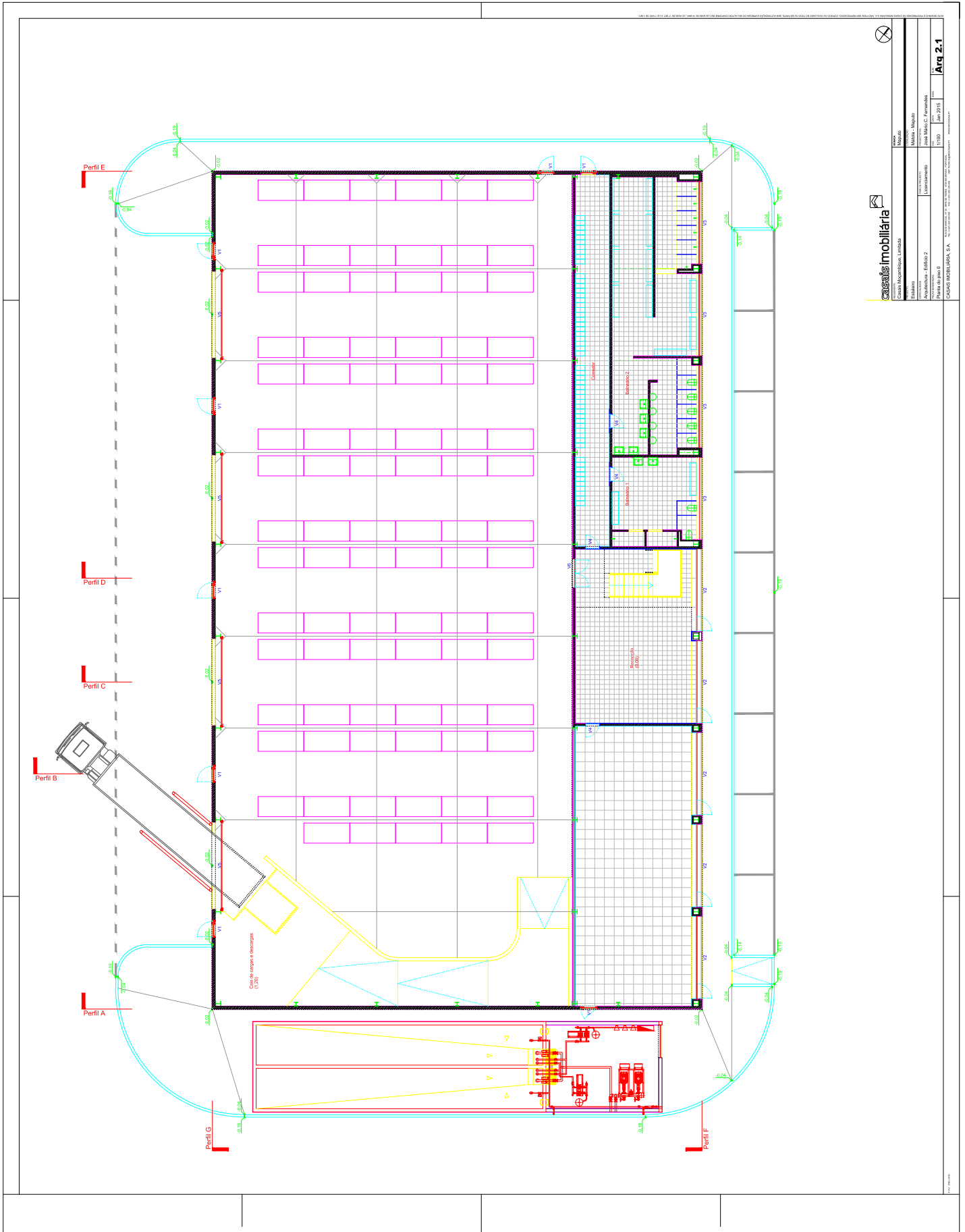
A	área da secção transversal (cm ²)
z _{cg}	coordenada em z da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
y _{cg}	coordenada em y da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
I _(i)	momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo (i) (cm ⁴)
W _{y,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
W _{y,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
W _{z,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo superior (cm ³)
W _{z,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo inferior (cm ³)
W _{pl,y}	módulo de flexão plástico da secção transversal (cm ³)
i _(i)	raio de giração da secção transversal relativo ao eixo (i) (cm)
A _{v,(i)}	área resistente aos esforço transverso V _(i) (cm ²)
I _T	constante de torção de St. Venant (cm ⁴)
I _w	constante de empenamento (cm ⁶)
E	módulo de elasticidade (GPa)
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico

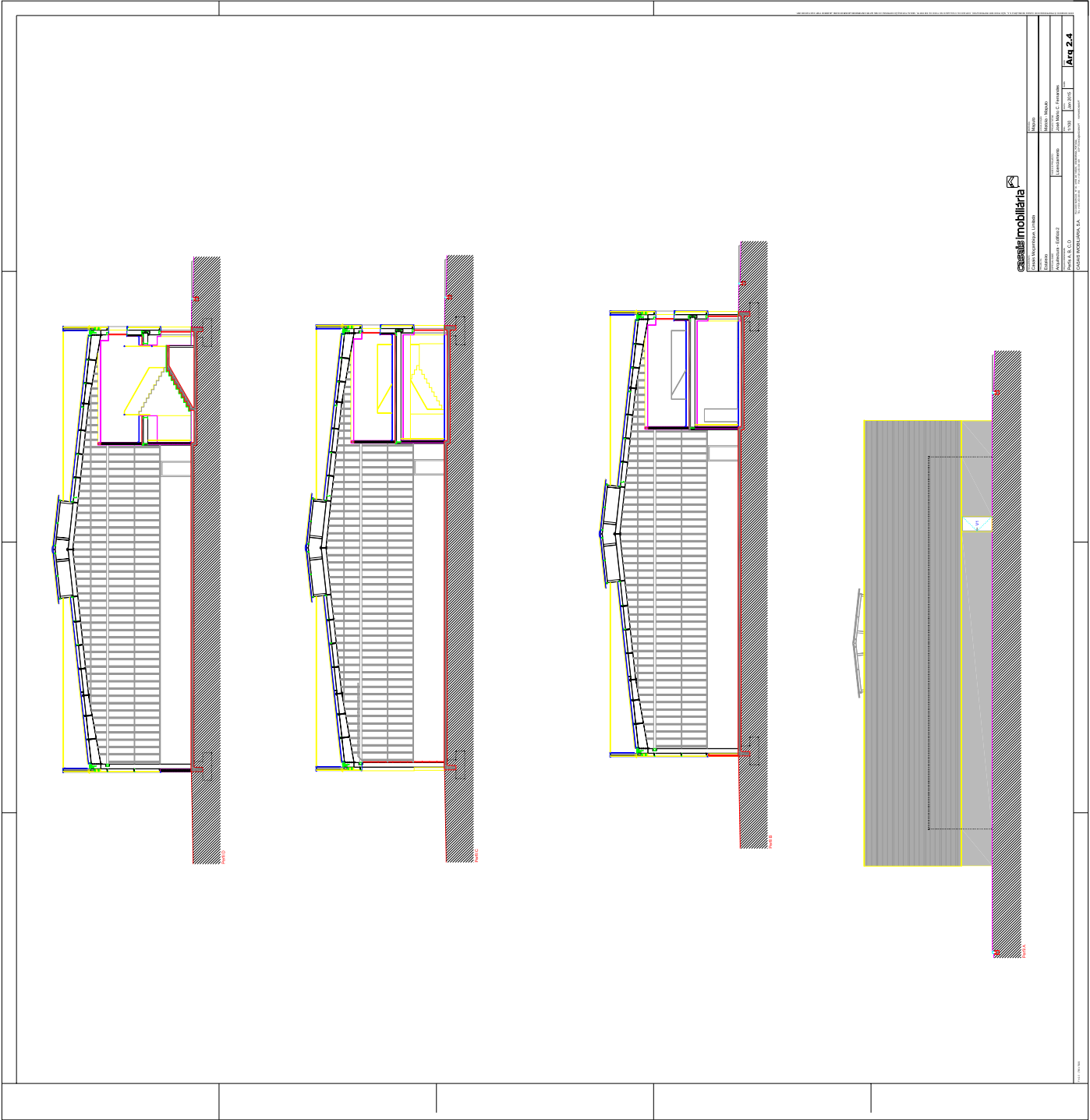
η	coeficiente para calcular a área de corte
f_y	tensão de cedência (MPa)
f_u	tensão última (MPa)
$\gamma_{M(i)}$	coeficientes parciais de segurança γ_{M0} , γ_{M1} , γ_{M2}
ϵ	fator que depende de f_y
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal atuante (kN)
$M_{(i),Ed}$	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal atuante na direção (i) (kN)
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de tração (kN)
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão (kN)
$M_{(i),Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente na direção (i) (kN)
$A_{v,z}$	área resistente ao esforço transversal V_z (cm ²)
$A_{r,z}$	área restante relativamente à área A_{vz} ($A - A_{vz}$) (cm ²)
$A_{v,y}$	área resistente ao esforço transversal V_y (cm ²)
$A_{r,y}$	área restante relativamente à área A_{vy} ($A - A_{vy}$) (cm ²)
ρ	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos
$f'_y(A_{v,z})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vz} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_z no cálculo momento fletor resistente $M_{v,y,Rd}$ - Abrevia-se em $f'_{y,z}$ (MPa)
$f'_y(A_{v,y})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vy} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_y no cálculo do resistente $M_{v,z,Rd}$ - Abrevia-se em $f'_{y,y}$ (MPa)
$W_{el,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{el,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo superior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo inferior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo superior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo inferior da secção transversal
$M_{v,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra superior da secção transversal (kN.m)
$M_{v,y,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra inferior da secção transversal (kN.m)
$M_{v,z,Rd sup}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo superior (kN.m)
$M_{v,z,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo inferior (kN.m)
$M_{Nv,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{z,Ed}$ (kN.m)
$M_{Nv,z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{y,Ed}$ (kN.m)
$N_{b,(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura em relação ao eixo (i) de um elemento comprimido (kN)
$L_{cr,(i)}$	comprimento de encurvadura em relação ao eixo (i) (kN)
$\lambda_{(i)}$	esbelteza normalizada associada à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\alpha_{(i)}$	fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos associado à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\Phi_{(i)}$	valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{(i)}$
$\chi_{(i)}$	coeficiente de redução para o modo de encurvadura em relação ao eixo (i)
M_{cr}	momento crítico de encurvadura lateral (kN.m)
$M_{cr,E}$	momento crítico elástico de encurvadura lateral (kN.m)
$C_{(i)}$	coeficientes C_1 , C_2 e C_3 dependentes da forma do diagrama de momentos flectores e das condições de apoio nas extremidades do tramo de comprimento l a analisar
l	comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo considerado (m)
k_z	fator de comprimento efetivo referente às restrições à rotação em torno do eixo z das secções de extremidade do tramo de comprimento l
k_w	fator de comprimento efetivo referente às restrições ao empenamento das secções de extremidade do tramo de comprimento l
z_g	coordenada em z do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal (m)
z_j	parâmetro que traduz o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y (m)
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral (kN.m)
λ_{LT}	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
α_{LT}	fator de imperfeição para a encurvadura lateral
Φ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
a_w	distância entre reforços transversais da alma (m)
$V_{d,w,Rd}$	valor de cálculo da contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
$V_{d,f,Rd}$	valor de cálculo da contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
χ_w	coeficiente de redução para a encurvadura por esforço transversal
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos (kN.m)
$M_{Nf,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, reduzido pela presença de um esforço normal N_{Ed} (kN.m)
$V_{d,Rd}$	valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal
$N_{cr,y}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y (kN)
$N_{cr,z}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z (kN)
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por torção (kN)
C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
A_{eff}	área efetiva de uma secção transversal (cm ²)
$W_{y,eff,s}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
$W_{y,eff,i}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,DIR}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,ESQ}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema direita da secção transversal (cm ³)
e_{Nz}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo z (mm)
Δ_{My}	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Nz} (kN.m)
e_{Ny}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo y (mm)
Δ_{Mz}	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Ny} (kN.m)

Peças desenhadas do Projeto de Arquitetura

Peças desenhadas do projeto de arquitetura do Edifício 2 do Estaleiro de Moçambique, apresentado no Capítulo 5 deste documento:

- Planta do Piso 0;
- Planta do Piso 1;
- Planta da Cobertura;
- Perfis A, B, C, D;
- Perfis E, F, G.





casas inmobiliária

Nome: MAURICIO Endereço: Av. ... Cidade: ...		Data: ... Hora: ...	
Projeto: ... Autor: ...		Escala: ... Folha: ...	
Cliente: ... Rua: ...		Nº: ... Bairro: ...	
Cidade: ... Estado: ...		País: ... Telefone: ...	
E-mail: ... Site: ...		Página: ... Total: ...	

Fig. 2.4

Combinações de Ações ELU

Combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias (combinações fundamentais) consideradas para verificação aos ELU do caso estudado no Capítulo 5 deste documento. São geradas de acordo com o disposto na secção 6.4.3.2 do regulamento NP EN 1990 [4].

Quadro C.1 – Combinações de Ações ELU referentes ao caso de estudo apresentado no Capítulo 5.

Nº	γ_G	$G_k + \gamma_Q \times \psi_0$	$Q_k + \gamma_Q \times \psi_0$	$W_{k1} + \gamma_Q \times \psi_0$	$W_{k2} + \gamma_Q \times \psi_0$	$W_{k3} + \gamma_Q \times \psi_0$	W_{k4}
Cargas Permanentes G_k :							
1	1,35	$G_k + 0 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Sobrecarga Q_k (+ W_k favorável):							
2	1,35	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
3	1,00	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Sobrecarga Q_k (+ W_{k1} desfavorável):							
4	1,35	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 1,5 \times 0,6$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
5	1,00	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 1,5 \times 0,6$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Sobrecarga Q_k (+ W_{k2} desfavorável):							
6	1,35	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 1,5 \times 0,6$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
7	1,00	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 1,5 \times 0,6$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Sobrecarga Q_k (+ W_{k3} desfavorável):							
8	1,35	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 1,5 \times 0,6$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
9	1,00	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 1,5 \times 0,6$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Sobrecarga Q_k (+ W_{k4} desfavorável):							
10	1,35	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 1,5 \times 0,6$	W_{k4}
11	1,00	$G_k + 1,50 \times 1$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 1,5 \times 0,6$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Vento Q_{k1} :							
12	1,35	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 1,5 \times 1$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
13	1,00	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 1,5 \times 1$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Vento Q_{k2} :							
14	1,35	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 1,5 \times 1$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
15	1,00	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 1,5 \times 1$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Vento Q_{k3} :							
16	1,35	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 1,5 \times 1$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
17	1,00	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 1,5 \times 1$	$W_{k3} + 0 \times 0$	W_{k4}
Ação Variável de Base – Vento Q_{k4} :							
18	1,35	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 1,5 \times 1$	W_{k4}
19	1,00	$G_k + 1,50 \times 0$	$Q_k + 0 \times 0$	$W_{k1} + 0 \times 0$	$W_{k2} + 0 \times 0$	$W_{k3} + 1,5 \times 1$	W_{k4}

Verificação aos ELU do Pilar A

Verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2, de acordo com a secção 5.5 deste documento.

- D.1** Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU do Pilar A do Pórtico 2.
- D.2** Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU do Pilar do Pórtico 2.
- D.3** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU do Pilar do Pórtico 2.
- D.4** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU do Pilar do Pórtico 2.

Verificação aos ELU do Pilar A

Verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2, de acordo com a secção 5.5 deste documento.

Anexo D.1

Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU do Pilar A do Pórtico 2.

AcianUM **INTERFACE I. SECÇÃO TRANSVERSAL E PROPRIEDADES DO MATERIAL** MÓDULO DE CÁLCULO: COMERCIAL

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				e						
HE A	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _w x 10 ⁻²	e
f _y [MPa]	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165	150	297	243	0	0	27693	1678	1678	1850	14,4	44,95	7436	495,7	495,7	755,9	7,464	105,3	127,2	1824	0,92

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i		
HE A 340	Perfil Laminado	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165,0	150,0	297	243	0,00	0,00

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA

ELEMENTO	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
NO.	L	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i		
27	2,91	HEA 340	Perfil Laminado	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165,0	150,0	297	243,0	0,00	0,00

TIPO DE PERFIL Laminado

CORDÕES DE SOLDADURA:
NÃO EXISTEM CORDÕES DE SOLDADURA.

CLASSE DE AÇO CONSTITUINTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL	AÇO DA CLASSE	S275	PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL	E	210	GPa	α	1,20E-06	/ K	Redefinir NP EN 1993-1-1	COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA	Y _{M0}	1,00	Redefinir NP EN 1993-1-1	
	f _y	275		MPa	G	80,77	GPa	G _m	7850			Kg/m ³	Y _{M1}		1,00
	f _u	430		MPa	v	0,3		η	1,20				Y _{M2}		1,25

João M. M. Eira
 Prof. Assistente
 Eng.º Miguel Pires

Universidade do Minho
 Escola de Engenharia

GRUPO CASAIS

Figura D.1 – Interface I. Secção transversal e propriedades do material: Pilar A do Pórtico 2.

AcariUM INTERFACE II. CONDIÇÕES DE APOIO, TRAVAMENTO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL MÓDULO DE CÁLCULO: ROBOT

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε		
HE A	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _x	r _i	A	z _{co}	y _{ca}	h _i	d	cs _x	cs _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl_y}	I _y	A _{st}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl_z}	I _z	A _{st}	I _t	I _v × 10 ³	ε
f _y [MPa]	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165	150	297	243	0	0	27693	1678	1678	1850	14,4	44,95	7436	495,7	495,7	755,9	7,464	105,3	127,2	1824	0,92

MÓDULO MANUAL INTRODUÇÃO MANUAL DO VALOR DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ATUANTES NA SECÇÃO A VERIFICAR E DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS QUE CARACTERIZAM O SISTEMA ESTRUTURAL INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER VALORES DIRETAMENTE DE UM FICHEIRO DO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS ABERTO NESTE COMPUTADOR INFO ? OCULTAR / MOSTRAR


IDENTIFICAÇÃO DA SECÇÃO A VERIFICAR BARRA NO. 27 CASO CARGA NO. 10 COMB 2 POSIÇÃO SECÇÃO 1,0 x L = 2,90 m NOME SECÇÃO HEA340 L [EL.BARRA] 2,90 m

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 459,15 kN M_{Edy} -418,84 kN.m V_{Edz} -143,93 kN M_{Edz} -0,44 kN.m V_{Edy} -0,15 kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L 2,90 m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} 7,00 m L_{cr,z} 2,90 m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS L_{sup} 2,90 m L_{inf} 2,90 m

MÓDULO AUTOMÁTICO MODELAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL PARA CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS PARÂMETROS CORRESPONDENTES PELA FERRAMENTA INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

João M. M. Eira
 Prof. Isidoro Vicente
 Eng. Miguel Pires


 Universidade do Minho
 Escola de Engenharia



 GRUPO CASAIS

Figura D.2 – Interface II. Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural: Pilar A do Pórtico 2.

AcianUM INTERFACE III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL [ELU] SECÇÃO BISSIMÉTRICA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε								
HE A	340	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	cs _s	cs _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _x × 10 ³	ε
f _y [MPa]	275	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165	150	297	243	0	0	27693	1678	1678	1850	14,4	44,95	7436	495,7	495,7	755,9	7,464	105,3	127,2	1824	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 459,15 kN V_{Ed,z} -143,93 kN M_{Ed,y} -418,84 kN.m V_{Ed,y} -0,15 kN M_{Ed,z} -0,44 kN.m

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção HE A340 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. CLASSE 1

A. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES NP EN 1993-1-1. 6.2

Tração	N _{t,Rd}	3670,50	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)
Compressão	N _{c,Rd}	3670,50	kN	OK	13%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)
Esforço Transverso	V _{z,Rd}	713,68	kN	OK	20%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _y 925,24 cm ³
Momento Fletor	M _{y,Rd}	508,88	kN.m	OK	82%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	V _{y,Rd}	1671,19	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _z 354,62 cm ³
Momento Fletor	M _{z,Rd}	207,89	kN.m	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)

B. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA NP EN 1993-1-1. 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_y]

V_{z,Ed} (kN) 143,9 < 50% V_{pl,z,Rd} (kN) 713,7 p 0,00 F_y (kN) 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso V_t Área restante
A_{ve} 44,95 A_{re} 88,52
I_{y,Ar} 5786,6 I_{y,Ar} 21906,1
W_{pl,z,Ar} 458,6 W_{pl,z,Ar} 1381,9

ESFORÇO TRANSVERSO NA DIREÇÃO Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_z]

V_{y,Ed} (kN) 0,15 < 50% V_{pl,y,Rd} (kN) 1671 p 0,00 F_y (kN) 275,0 f_y 275,0

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

NÃO NECESSÁRIO CONSIDERAR A INTERAÇÃO!

Área resistente ao Esf. Transverso V_t Área restante
A_{ve} 105,26 A_{re} 28,22
I_{z,Ar} 7425,0 I_{z,Ar} 10,5
W_{pl,y,Ar} 742,5 W_{pl,y,Ar} 13,4

C. INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO NP EN 1993-1-1. 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_z] com o momento fletor resistente [MR_{d,y}]

PL	MV _{z,Rd}	508,88	kN.m	OK	82%	M _{V_z,Rd} = $\frac{W_{y,Ar} \cdot f_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	MV _{y,Rd}	508,88	kN.m	OK	82%	

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V_y] com o momento fletor resistente [MR_{d,z}]

PL	MV _{y,Rd}	207,89	kN.m	OK	0%	M _{V_y,Rd} = $\frac{W_{z,Ar} \cdot f_{yz} + W_{z,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	MV _{z,Rd}	207,89	kN.m	OK	0%	

D. INTERAÇÃO [M + N + V] FLEXÃO COMPOSTA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DAS CLASSES 1 OU 2] NP EN 1993-1-1. 6.2.9

É necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR_d] em relação ao eixo y.

PL	MNV _{y,Rd}	475,96	kN.m	OK	88%	MNV _{y,Rd} = M _{V_y,Rd} (1-n)/(1-0,5a)
----	---------------------	--------	------	----	-----	--

Com: n = N_{Ed}/N_{pl,Rd} 0,13 a = (A-2b_t)/A mas a ≤ 0,5 0,13 Note: MNV_{y,Rd} ≤ M_{pl,y,Rd}

Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR_d] em relação ao eixo z, razão pela qual não efetuou qualquer redução desse valor.

PL	MNV _{z,Rd}	207,89	kN.m	OK	0%	MNV _{z,Rd} = M _{V_z,Rd} [1 - ((n-a)/(1-a)) ²] para n > a
----	---------------------	--------	------	----	----	--

Com: n = N_{Ed}/N_{pl,Rd} 0,13 a = (A-2b_t)/A mas a ≤ 0,5 0,13 Note: MNV_{z,Rd} = M_{V_z,Rd} para n ≤ a

E. INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DA CLASSE 1 OU 2] NP EN 1993-1-1. 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA $\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{Npl,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{Npl,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1,0$ 0,78 < 1,00 OK 78% Com: α 2 β 1

Figura D.3 – Interface III. Resistência da secção transversal (ELU): Pilar A do Pórtico 2.

AcisriUM INTERFACE V. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS EM FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL									DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε						
HE A	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	c _s	c _{si}	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _y	A _v	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _v	I _t	I _x x 10 ²	ε
340	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165	150	297	243	0	0	27693	1678	1678	1850	14,4	44,95	7436	495,7	495,7	755,9	7,464	105,3	127,2	1824	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE		N _{Ed}	459,15	kN	V _{Ed,z}	-143,93	kN	M _{Ed,y}	-418,84	kN.m	V _{Ed,y}	-0,15	kN	M _{Ed,z}	-0,44	kN.m	CLASSE	1
-------------------------------------	--	-----------------	--------	----	-------------------	---------	----	-------------------	---------	------	-------------------	-------	----	-------------------	-------	------	--------	---

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO ALTERNATIVO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A

PARÂMETROS ENCURVADURA	L _{cr,y}	7,00	L _{cr,z}	2,91	L	2,91	λ _y	0,56	λ _z	0,45	λ _{1T}	0,293	χ _y	0,86	χ _z	0,87	χ _{1T}	0,98
------------------------	-------------------	------	-------------------	------	---	------	----------------	------	----------------	------	-----------------	-------	----------------	------	----------------	------	-----------------	------

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS	N _{cr,y}	11714	kN	N _{cr,z}	18199	kN	N _{cr,T}	20870	kN	FATORES	u _y	0,99	u _z	1,00	w _y	1,10	w _z	1,50	η _{pl}	0,13	λ _{max}	0,56
---------------------------	-------------------	-------	----	-------------------	-------	----	-------------------	-------	----	---------	----------------	------	----------------	------	----------------	------	----------------	------	-----------------	------	------------------	------

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE

CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS VALORES DE C_{my,0} e C_{mz,0} M^e_{CR} 3162 kN.m C₁ 1,88 λ₀ 0,40 > 0,2√C₁√(1 - N_{Ed}/N_{cr,z})(1 - N_{Ed}/N_{cr,T}) =>

C_{my,0} 0,94 < C_{my,0} 0,79
 C_{mz,0} 0,79 < C_{mz,0} 0,79
 C_{m1T} 1,00

C _{my,0}	MODULO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO	Redefinir Parâmetros	QUADRO A.2 NPEN1993-1-1	OPÇÃO LINHA Nº	1	DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M _{Ed,y} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS:	ψ _y	0,00	δ _y	-	mm	VALOR PROPOSTO PARA O PARÂMETRO C _{my,0}	C _{my,0}	0,79
-------------------	------------------------------	----------------------	-------------------------	----------------	---	--	----------------	------	----------------	---	----	---	-------------------	------

C _{mz,0}	MODULO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO	Redefinir Parâmetros	QUADRO A.2 NPEN1993-1-1	OPÇÃO LINHA Nº	1	DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M _{Ed,z} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS:	ψ _z	0,00	δ _z	-	mm	VALOR PROPOSTO PARA O PARÂMETRO C _{mz,0}	C _{mz,0}	0,79
-------------------	------------------------------	----------------------	-------------------------	----------------	---	--	----------------	------	----------------	---	----	---	-------------------	------

FATORES	a _{1T}	1,00	b _{1T}	0,00	c _{1T}	0,28	d _{1T}	0,01	e _{1T}	4,31	FATORES	C _{yy}	1,01	C _{yz}	0,96	C _{yy}	0,99	C _{zz}	0,82
---------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	---------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

FATORES DE INTERAÇÃO	k _{yy}	0,96	k _{yz}	0,58	k _{yy}	0,51	k _{zz}	0,98
----------------------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{1T} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}}$	=	0,96	<	1,0	OK	96%
CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{1T} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}}$	=	0,57	<	1,0	OK	57%



João M. M. Eiro
 Prof. Isidoro Vilela
 Eng. Miguel Pires
 
 Universidade do Minho
 Escola de Engenharia
 
 GRUPO CASAI

Figura D.5 – Interface V. Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão: Pilar A do Pórtico 2.

Verificação aos ELU do Pilar A

Verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2, de acordo com a secção 5.5 deste documento.

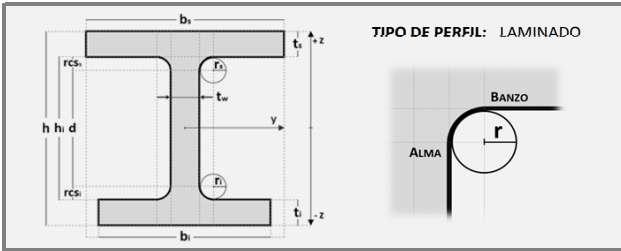
Anexo D.2

Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2.

O ELEMENTO SUJEITO A FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA E CONSTITUÍDO PELO PERFIL TRANSVERSAL HEA 340 S275 (SECÇÃO DA CLASSE 1) VERIFICA TODAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA.

OK 96%

DESIGNAÇÃO		DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				PROPRIEDADES		
HE A	340	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _{ss}	c _{si}	E	v	η
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	GPa	-	-
f_y [MPa]	275	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,47	165	150	297	243	0	0	210	0,3	1,2



EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					
I _y	W _{y,sup}	W _{y,inf}	W _{pl,y}	i _y	Av _z
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
27693	1678,3	1678,3	1850,5	14,404	44,95

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					
I _z	W _{z,sup}	W _{z,inf}	W _{pl,z}	i _z	Av _y
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
7435,5	495,7	495,7	755,95	7,4638	105,26

CLASSE DE RESISTÊNCIA	
ε	0,92
AÇO DA CLASSE S275	
f _y	235 MPa
f _u	360 MPa

COEFICIENTES	
γ _{M0}	1,00
γ _{M1}	1,00
γ _{M2}	1,25

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO N_{Ed} 459,15 kN M_{Ed,y} -418,84 kN V_{Ed,z} -143,93 kN.m M_{Ed,z} -0,44 kN V_{Ed,y} -0,15 kN.m

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção HEA 340 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. **CLASSE** 1

III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

SECÇÃO BISSIMÉTRICA

RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES					
Tração	N _{t,Rd}	3670,50 kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)
Compressão	N _{c,Rd}	3670,50 kN	OK	13%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)
Esforço Transverso	V _{z,Rd}	713,68 kN	OK	20%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _y 925,24 cm ³
Momento Fletor	M _{y,Rd}	508,88 kN.m	OK	82%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	V _{y,Rd}	1671,19 kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S _z 354,62 cm ³
Momento Fletor	M _{z,Rd}	207,89 kN.m	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)

AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA NP EN 1993-1-1 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO EM Z-Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _y]				ESFORÇO TRANSVERSO EM Y-Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _z]					
V _{Ed,z} (kN)	144	<	50% V _{pl,z,Rd} (kN) 714	ρ	0,00	f' _y (Av _z)	275	f _y	275
Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.				Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.					
SEÇÃO DA CLASSE 1/2		Área resistente ao Esf. Transv. Vz	Área restante	SEÇÃO DA CLASSE 1/2		Área resistente ao Esf. Transv. Vy	Área restante		
		A _{vz} 44,9503	A _{rz} 88,5225			A _{vy} 105,258	A _{ry} 28,215		
		I _{z,Av} 5786,56	I _{z,Ar} 21906,1			I _{z,Av} 7425	I _{z,Ar} 10,5088		
		W _{pl,vz} 458,563	W _{pl,sz} 1391,91			W _{pl,vy} 742,5	W _{pl,sy} 13,4475		

INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS DAS CLASSES 1, 2, 3 OU 4] NP EN 1993-1-1 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vz] com o momento fletor resistente [MR _{d,y}]				Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [Vy] com o momento fletor resistente [MR _{d,z}]							
PLÁSTICO	MV _{y,Rd} ^{sup}	508,88 kN.m	OK	82%	MV _{y,Rd} = $\frac{W_{y,Av} \cdot f_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	PLÁSTICO	MV _{z,Rd} ^{sup}	207,89 kN.m	OK	0%	MV _{z,Rd} = $\frac{W_{z,Av} \cdot f_{yy} + W_{z,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	MV _{y,Rd} ^{inf}	508,88 kN.m	OK	82%			MV _{z,Rd} ^{inf}	207,89 kN.m	OK	0%	

INTERAÇÃO [M + N + V] FLEXÃO COMPOSTA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DAS CLASSES 1 OU 2] NP EN 1993-1-1 6.2.9

É necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo y.				Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo z, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse							
PLÁSTICO	MNV _{y,Rd}	475,96 kN.m	OK	88%	MNV _{pl,y,Rd} = $M_{V,pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5a)}$	PLÁSTICO	MNV _{z,Rd}	207,89 kN.m	OK	0%	MNV _{pl,z,Rd} = $M_{V,pl,z,Rd} \cdot \left[1 - \frac{(n-a)^2}{1-a}\right]$
Note: MNV _{pl,y,Rd} ≤ M _{pl,y,Rd}				Com: n = N _{Ed} /N _{pl,Rd} 0,13 a = (A - 2b _{tf})/A mas a ≤ 0,5 0,13		Note: MNV _{pl,z,Rd} = M _{V,pl,z,Rd} para n ≤ a					

INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECÇÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DA CLASSE 1 OU 2] NP EN 1993-1-1 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{MN_{pl,y,Rd}}\right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{MN_{pl,z,Rd}}\right]^\beta \leq 1,0$	0,78 < 1,00	OK	78%	Com: α 2 β 1
-----------------------	---	-------------	----	-----	--------------

IV. RESISTÊNCIA DO ELEMENTO A FENÓMENOS DE ENCURVADURA

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1 6.3.1.1(3)

N _{b,y,Rd}	3144,66 kN	OK	15%	L _{cr,y}	7 m	λ _y	0,56	α _y	0,34	φ _y	0,72	χ _y	0,86
---------------------	------------	----	-----	-------------------	-----	----------------	------	----------------	------	----------------	------	----------------	------

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1 6.3.1.1(3)

N _{b,z,Rd}	3197,11 kN	OK	14%	L _{cr,z}	2,91 m	λ _z	0,45	α _z	0,49	φ _z	0,66	χ _z	0,87
---------------------	------------	----	-----	-------------------	--------	----------------	------	----------------	------	----------------	------	----------------	------

MOMENTO CRÍTICO PARA A ENCURVADURA LATERAL M_{CR}:

VALOR DO MOMENTO CRÍTICO M_{CR} CALCULADO AUTOMÁTICAMENTE PELA FERRAMENTA:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\frac{(k_z)^2 I_w + (k_z l)^2 G I_T + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2}{I_z \pi^2 E I_z} \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} = 5940,69 \text{ kN.m} \quad M_{CR_E} = 3161,62 \text{ kN.m}$$

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS C1: 1,88 C2: 0,00 C3: 0,94 FORMA DO DIAGRAMA DE MOMENTOS 	FATORES DE COMPRIM. EFETIVO BANZO INFERIOR COMPRIMIDO l: 2,91 m k _z : 1,00 k _w : 1,00	POSIÇÃO DA CARGA AO NÍVEL DA SECÇÃO z _g : 0 m	GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO z _j = 0,8 · (2 · β _f - 1) · h _g /2,0 quando β _f > 0,5 z _j = 1,0 · (2 · β _f - 1) · h _g /2,0 quando β _f > 0,5 β _f : 0,5 h _g : 313,5 mm z _j : 0 m
---	---	--	--

M_{b,Rd}: 498,29 kN.m **OK** 84% M_{CR}: 5940,69 kN.m M_{CR_E}: 3161,62 kN.m λ_{LT}: 0,29 α_{LT}: 0,21 φ_{LT}: 0,55 χ_{LT}: 0,98

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO]

ALMA NÃO REFORÇADA:
 h_w/t_w: 31,263 < 72/η ε: 55,465 → Não há necessidade de existirem reforços transversais!

ALMA COM REFORÇOS TRANSVERSAIS:
 EXTREMIDADE: Não INTERMÉDIOS: Não ESPAÇAMENTO ENTRE REFORÇOS: a_w: - m
 h_w/t_w: 31,263 < 31/η ε √k_τ: - → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço trans: k_τ: - k_{τ,sl}: 0,00

VERIFICAÇÃO DA ALMA EM RELAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

CONTRIBUIÇÃO DA ALMA: V_{b,w,Rd}: - kN V_{bw,Rd} = $\frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$ com χ_w: - σ_E: 194,19 MPa λ_w: -

CONTRIBUIÇÃO BANZOS: V_{b,f,Rd}: - kN V_{bf,Rd} = $\frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$ com M_{Nf,Rd}: 337,35

V_{b,Rd}: - kN **OK**

V. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO À ESTABILIDADE GLOBAL

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS: N_{cr,y}: 11713,5 kN N_{cr,z}: 18198,8 kN N_{cr,T}: 20869,6 kN FATORES: u_y: 0,99 u_z: 1,00 w_y: 1,10 w_z: 1,50 η_{pl}: 0,13 λ_{max}: 0,56

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME:

VALORES DOS PARÂMETROS C_{my,0} e C_{mz,0} CALCULADOS AUTOMATICAMENTE PELA FERRAMENTA:

C_{my,0}
 QUADRO A.2 NPEN1993-1-1 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{ed,y} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS:
 OPÇÃO LINHA Nº 1 M₁ ψ M₁ -1 ≤ ψ ≤ 1 C_{mi,0} = 0,79 + 0,21ψ_i + 0,36(ψ_i - 0,33) $\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ ψ_y: 0,00 δ_y: - mm C_{my,0}: 0,79
 ε_y: 7,25 M_{y,Ed}: - kN.m

C_{mz,0}
 QUADRO A.2 NPEN1993-1-1 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M_{ed,z} ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS:
 OPÇÃO LINHA Nº 1 M₁ ψ M₁ -1 ≤ ψ ≤ 1 C_{mi,0} = 0,79 + 0,21ψ_i + 0,36(ψ_i - 0,33) $\frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ ψ_z: 0,00 δ_z: - mm C_{mz,0}: 0,79
 ε_z: - M_{z,Ed}: - kN.m

$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = 0,40 > 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}} \right)} = 0,27 \Rightarrow C_{my}: 0,00 \quad C_{mz}: 1,01 \quad C_{mLT}: 0,00$

FATORES: a_{LT}: 1,00 b_{LT}: 0,00 c_{LT}: 0,28 d_{LT}: 0,01 e_{LT}: 4,31 FATORES: C_{yy}: 1,01 C_{yz}: 0,96 C_{zy}: 0,99 C_{zz}: 0,82

FATORES DE INTERAÇÃO: k_{yy}: 0,96 k_{yz}: 0,58 k_{zy}: 0,51 k_{zz}: 0,98

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y
 NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,96 < 1,0$ **OK** 96%

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z
 NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61 $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,57 < 1,0$ **OK** 57%

ANEXO I. NOTAÇÃO:

A	área da secção transversal (cm ²)
z _{cg}	coordenada em z da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
y _{cg}	coordenada em y da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
I _(i)	momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo (i) (cm ⁴)
W _{y,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
W _{y,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
W _{z,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo superior (cm ³)
W _{z,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo inferior (cm ³)
W _{pl,y}	módulo de flexão plástico da secção transversal (cm ³)
i _(i)	raio de giração da secção transversal relativo ao eixo (i) (cm)
A _{v,(i)}	área resistente aos esforço transverso V _(i) (cm ²)
I _T	constante de torção de St. Venant (cm ⁴)
I _w	constante de empenamento (cm ⁶)
E	módulo de elasticidade (GPa)
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico

η	coeficiente para calcular a área de corte
f_y	tensão de cedência (MPa)
f_u	tensão última (MPa)
$\gamma_{M(i)}$	coeficientes parciais de segurança γ_{M0} , γ_{M1} , γ_{M2}
ϵ	fator que depende de f_y
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal atuante (kN)
$M_{(i),Ed}$	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal atuante na direção (i) (kN)
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de tração (kN)
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão (kN)
$M_{(i),Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente na direção (i) (kN)
$A_{v,z}$	área resistente ao esforço transversal V_z (cm ²)
$A_{r,z}$	área restante relativamente à área A_{vz} ($A - A_{vz}$) (cm ²)
$A_{v,y}$	área resistente ao esforço transversal V_y (cm ²)
$A_{r,y}$	área restante relativamente à área A_{vy} ($A - A_{vy}$) (cm ²)
ρ	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos
$f_y(A_{v,z})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vz} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_z no cálculo momento fletor resistente $M_{y,y,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,z}$ (MPa)
$f_y(A_{r,y})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vy} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_y no cálculo do resistente $M_{v,z,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,y}$ (MPa)
$W_{el,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área A(i) em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{el,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área A(i) em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área A(i) em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo superior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área A(i) em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo inferior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área A(i) em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área A(i) em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área A(i) em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo superior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área A(i) em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo inferior da secção transversal
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra superior da secção transversal (kN.m)
$M_{y,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra inferior da secção transversal (kN.m)
$M_{v,z,Rd sup}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo superior (kN.m)
$M_{v,z,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo inferior (kN.m)
$M_{NV,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{z,Ed}$ (kN.m)
$M_{NV,z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{y,Ed}$ (kN.m)
$N_{b,(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura em relação ao eixo (i) de um elemento comprimido (kN)
$L_{cr,(i)}$	comprimento de encurvadura em relação ao eixo (i) (kN)
$\lambda_{(i)}$	esbelteza normalizada associada à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\alpha_{(i)}$	fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos associado à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\Phi_{(i)}$	valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{(i)}$
$\chi_{(i)}$	coeficiente de redução para o modo de encurvadura em relação ao eixo (i)
M_{cr}	momento crítico de encurvadura lateral (kN.m)
$M_{cr,E}$	momento crítico elástico de encurvadura lateral (kN.m)
$C_{(i)}$	coeficientes C_1 , C_2 e C_3 dependentes da forma do diagrama de momentos flectores e das condições de apoio nas extremidades do tramo de comprimento l a analisar
l	comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo considerado (m)
k_z	fator de comprimento efetivo referente às restrições à rotação em torno do eixo z das secções de extremidade do tramo de comprimento l
k_w	fator de comprimento efetivo referente às restrições ao empenamento das secções de extremidade do tramo de comprimento l
z_g	coordenada em z do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal (m)
z_j	parâmetro que traduz o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y (m)
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral (kN.m)
λ_{LT}	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
α_{LT}	fator de imperfeição para a encurvadura lateral
Φ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
a_w	distância entre reforços transversais da alma (m)
$V_{b,w,Rd}$	valor de cálculo da contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
$V_{b,f,Rd}$	valor de cálculo da contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
χ_w	coeficiente de redução para a encurvadura por esforço transversal
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos (kN.m)
$M_{N,f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, reduzido pela presença de um esforço normal N_{Ed} (kN.m)
$V_{b,Rd}$	valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal
$N_{cr,y}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y (kN)
$N_{cr,z}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z (kN)
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por torção (kN)
C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
A_{eff}	área efetiva de uma secção transversal (cm ²)
$W_{y,eff,s}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
$W_{y,eff,i}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,DIR}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,ESQ}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema direita da secção transversal (cm ³)
e_{Nz}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo z (mm)
Δ_{My}	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Nz} (kN.m)
e_{Ny}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo y (mm)
Δ_{Mz}	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Ny} (kN.m)

Verificação aos ELU do Pilar A

Verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2, de acordo com a secção 5.5 deste documento.

Anexo D.3

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2.

Symbol	Values	Unit	Symbol description
MEMBER: 27 Pilar A_27 ; COORDINATE: x = 0.50 L = 1.455 m			
Cross-section properties: HEA 340			
Ax	133.473	cm2	Cross-section area
Ay	110.388	cm2	Shear area - y-axis
Az	44.950	cm2	Shear area - z-axis
X	123.000	cm4	Torsional constant
Y	27693.100	cm4	Moment of inertia of a section about the y-axis
Z	7436.000	cm4	Moment of inertia of a section about the z-axis
Wply	1850.620	cm3	Plastic section modulus about the y (major) axis
Wplz	755.963	cm3	Plastic section modulus about the z (minor) axis
I	33.000	cm	Height of cross-section
b	30.000	cm	Width of cross-section
f	1.650	cm	Flange thickness
t	0.950	cm	Web thickness
Y	14.404	cm	Radius of gyration - y-axis
Z	7.464	cm	Radius of gyration - z-axis
Anb	1.00		Net area to gross area ratio
Eta	1.20		Factor for Av calculation

Material:

Name	S 275 (S275)
fy	275.0000 MPa
fu	430.0000 MPa
gM0	1.00
gM1	1.00
gM2	1.25

Designations of additional codes:

EN112	EN 1991-1-2:2003 - Fire loads on a structure
EN312	EN 1993-1-2:2005 - Steel structures - fire design
EN313	EN 1993-1-3:2005 - Steel structures from cold-formed sections
EN315	EN 1993-1-5:2005 - Steel structures - plated elements
EC111	ECCS No111:2001 - Guidebook with recommendations for design of steel structures
ENV311	ENV 1993-1-1:1992 - Steel structures - general code

Class of section

cf	1.825	cm	flange width
f	1.650	cm	flange thickness
cf/ff	7.17		Flange slenderness
KLF	1		Flange class
bw	24.300	cm	Web height
t	0.950	cm	Web thickness
bw/t	25.58		Web slenderness
alfa	0.86		Relative extent of the compressed plastic zone
psi	-0.75		Stress or strain ratio

Symbol	Values	Unit	Symbol description
KLW	1		Web class
(hw/tw)/lim	55.46		limit slenderness of a web for shear
hw/tw	31.26		web slenderness for shear
KLSZ	Plastic		Web class (shear)
KL	1		Section type

Parameters of buckling analysis:

About the y axis of cross-section

Curve,y	b		Buckling curve
Lcr,y	7.000	m	Effective buckling length
Lamy	48.60		Slenderness ratio
Lam,y	0.56		Non-dimensional slend. ratio for buckling
alfa,y	0.34		Imperfection factor
fi,y	0.72		Coefficient for calculation of X
Xy	0.86		Reduction factor for buckling
Ny,b,Rd	3144.6707	kN	Design buckling resistance of comp. member

About the z axis of cross-section

Curve,z	c		Buckling curve
Lcr,z	2.910	m	Effective buckling length
Lamz	38.99		Slenderness ratio
Lam,z	0.45		Non-dimensional slend. ratio for buckling
alfa,z	0.49		Imperfection factor
fi,z	0.66		Coefficient for calculation of X
Xz	0.87		Reduction factor for buckling
Nz,b,Rd	3197.1392	kN	Design buckling resistance of comp. member

Parameters of lateral-torsional buckling analysis:

General method [6.3.2.2]

Lcr,upp	2.910	m	Lateral buckling length of upper flange
Lcr,low	2.910	m	Lateral buckling length of lower flange
C1	1.88		Factor for Mcr calculations
C2	0.00		Factor for Mcr calculations
C3	0.94		Factor for Mcr calculations
w	1827067.027	cm6	Warping constant
zg	0.000	cm	Distance from the point where the load is applied to the center of gravity
Mcr	5929.2759	kN*m	Critical moment for lateral-torsional buckling
Lam_LT	0.29		Non-dimens. slend. ratio for lat.-tors. buckling
Curve,LT	a		Lateral buckling curve
alfa,LT	0.21		Imperfection factor for lateral buckling curves
fi,LT	0.55		Coefficient for calculation of XLT
XLT	0.98		Reduction factor for lateral-torsional buckling

Parameters of global stability analysis of member

Method of interaction parameter calculations - Annex A

Ncr,y	11713.7118	kN	Euler buckling load in y direction
Ncr,z	18200.0442	kN	Euler buckling load in z direction
Ncr,T	20765.4611	kN	Critical force (lateral-torsional buckling)

Symbol	Values	Unit	Symbol description
My	0.99		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
Mz	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
w	1.10		Coefficient related to ratio of section properties
Lam_0	1.50		Coefficient related to ratio of section properties
Lam_0	0.40		Relative slenderness for lateral buckling (constant ratio)
Cmy,0	0.79		Parameter related to bending moment distribution
Cmz,0	0.79		Parameter related to bending moment distribution
Cmy	0.94		Parameter related to bending moment distribution
Cmz	0.79		Parameter related to bending moment distribution
Cmy,0LT	0.79		Parameter related to bending moment distribution
CmyLT	0.94		Parameter related to bending moment distribution
CmLT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
alphaLT	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	0.00		Coefficient for calculation of Cyy
Cyy	1.01		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	0.28		Coefficient for calculation of Cyz
Cyz	0.96		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	0.01		Coefficient for calculation of Czy
Czy	0.99		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	4.31		Coefficient for calculation of Czz
Czz	0.82		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
ky	0.96		Interaction parameter
kz	0.58		Interaction parameter
kzy	0.51		Interaction parameter
kzz	0.98		Interaction parameter

Internal forces at characteristic points of cross section

N.Ed	459.1505	kN	axial force N.Ed
My.Ed	-209.4176	kN*m	bending moment My.Ed
My.Ed,max	-418.8353	kN*m	Maximal moment
Mz.Ed	-0.2126	kN*m	bending moment Mz.Ed
Vy.Ed	0.1461	kN	shear force Vy.Ed
Vz.Ed	-143.9296	kN	shear force Vz.Ed
Mz.Ed,max	-0.4251	kN*m	Maximal moment

Design forces:

Nc,Rd	3670.5075	kN	Design compression resistance
Nb,Rd	3144.6707	kN	Design buckling resistance of comp. member
Nb,Rd	498.2992	kN*m	Design buckling resistance moment

About the y axis of cross-section

Wy,pl,Rd	508.9205	kN*m	Design plastic resistance moment
Wy,el,Rd	461.5517	kN*m	Design elastic resistance moment
Wy,c,Rd	508.9205	kN*m	Design moment resistance
MN,y,Rd	508.9205	kN*m	Reduced design plastic resistance moment
Vy,c,Rd	1752.6449	kN	Design plastic shear resistance

About the z axis of cross-section

Mz,pl,Rd	207.8898	kN*m	Design plastic resistance moment
----------	----------	------	----------------------------------

Symbol	Values	Unit	Symbol description
Mz,el,Rd	136.3267	kN*m	Design elastic resistance moment
Mz,c,Rd	207.8898	kN*m	Design moment resistance of a compressed section part
MN,z,Rd	207.8898	kN*m	Reduced design plastic resistance moment
Vz,c,Rd	713.6850	kN	Design plastic shear resistance

Verification formulas:

Section strength check:			
UFS[Nc]	0.13		N.Ed/Nc,Rd
UFS[Nc]MyMz	0.17		(My.Ed/MN.y,Rd)^2.00 + (Mz.Ed/MN.z,Rd)^2.00
UFS[Vy]	0.00		Vy.Ed/Vy,c,Rd
UFS[Vz]	0.20		Vz.Ed/Vz,c,Rd

Global stability check of member:

UFB[Lambda]	0.23		Max(Lambda,y/Lambda,max ; Lambda,z/Lambda,max)
UFB[My]	0.84		My.Ed,max/Mb,Rd
UFB[N]MyMz	0.96		N.Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + ky*My.Ed,max/(XLT*My,Rk/gM1)
UFB[N]MyMz	0.57		N.Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kz*Mz.Ed,max/(XLT*My,Rk/gM1)

Ratio:

RAT	0.96		Efficiency ratio
-----	------	--	------------------

Section

MEMBER: 27

Pilar A_27 ;

Cross-section

properties:

Cross-section a	
Shear area - y-a	
Shear area - z-a	
Torsional const	
Moment of inertia	
Moment of inertia	
Plastic section	
Plastic section	
Height of cross-	
Width of cross-	
Flange thickness	
Web thickness	
Radius of gyration	
Radius of gyration	
(6.2.2.2)	
(6.2.6.(3))	

Material:

S 275 (S 275)	
(3.2)	
(3.2)	
(6.1.(1))	

Verificação aos ELU do Pilar A

Verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2, de acordo com a secção 5.5 deste documento.

Anexo D.4

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU do Pilar A do Pórtico 2.

Bar N41/N113

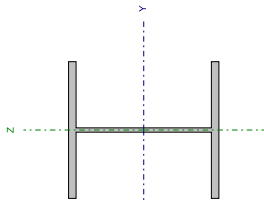
Section: HE 340 A
Material: Steel (S275 (EN 1993-1-1))

Nodes		Mechanical characteristics				
Initial	Final	Length (m)	Area (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _x ⁽²⁾ (cm ⁴)	
N41	N113	2.910	133.50	27690.00	7436.00	127.20

Notes:
(1) Inertia with respect to the indicated axis
(2) Uniform torsional moment of inertia

	Buckling		Lateral buckling	
	XY plane	XZ plane	Top fl.	Bot. fl.
β	1.00	2.43	1.00	1.00
L _k	2.910	7.057	2.910	2.910
C _m	0.790	0.790	1.000	1.000
C ₁	-	-	-	1.879

Notation:
 β : Buckling coefficient
L_k: Buckling length (m)
C_m: Moment coefficient
C₁: Critical moment modification factor



Bar	CHECKS (EUROCODE 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010)											
	L _k	N _{Ed}	N _{Rd}	M _{Ed}	M _{Rd}	V _{Ed}	V _{Rd}	M _{Ed} /M _{Rd}	M _{Ed} /M _{Rd}	M _{Ed} /M _{Rd}	M _{Ed} /M _{Rd}	Stress
N41/N113	2.910 m	0.00	0.00	2.91 m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	VERIFIED
	Verified	D.N.P. ¹⁾	D.N.P. ¹⁾	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		1 = 14.7	1 = 0.2	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 0.1	1 = 91.3

Notation:
1): Crossing of the web induced by the compressed flange
2): The check does not proceed as there is no tensile axial force
3): The check does not proceed as there is no bending moment
4): The check does not proceed as there is no shear force
5): The check does not proceed as there is no torsion
6): The check does not proceed as there is no axial force for any combination. Therefore the check does not proceed.
D.N.P.: Not applicable.

Crushing of the web induced by the compressed flange (Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2006, Article 8)

The following criteria must be satisfied:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{c,ef}}}$$

31.26 ≤ 230.61 ✓

Where:

- h_w**: Height of the web.
- t_w**: Web thickness.
- A_w**: Area of the web.
- A_{c,ef}**: Reduced area of the compressed flange.
- k**: Coefficient which depends on the class of the section.
- E**: Modulus of Elasticity.
- f_{yf}**: Steel elastic limit of the compressed flange.

Where:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistance to axial tension (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.3)

The check does not proceed, as there is no tensile axial force.

Compression resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.4)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

η : 0.126 ✓

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

η : 0.147 ✓

The worst case design force occurs at node N41, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

N_{c,Ed}: 461.58 kN

N_{c,Rd}: 3671.25 kN

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the compressed elements of a section.

Class: 2

A: Area of the gross section for class 1, 2 and 3 sections.

A: 133.50 cm²

f_{yd}: Steel design strength.

f_{yd}: 275.00 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y: 275.00 MPa

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

γ_{M0}: 1.00

Buckling resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.3.1)

The design buckling resistance **N_{b,Rd}** of a compressed bar is given by:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

Where:

A: Area of the gross section for class 1, 2 and 3 sections.

A: 133.50 cm²

f_{yd}: Steel design strength.

f_{yd}: 275.00 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Where:

f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y: 275.00 MPa

γ_{M1}: Partial safety factor of the material.

γ_{M1}: 1.00

χ: Reduction coefficient due to buckling.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1$$

Where:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

α : Elastic imperfection coefficient.

$\bar{\lambda}$: Reduced slenderness.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}_y$: 0.56

$\bar{\lambda}_z$: 0.45

$\bar{\lambda}_T$: 0.42

N_{cr}: Critical elastic buckling axial force, obtained from the smallest of the following values:
N_{cr,y}: Critical elastic buckling axial force with respect to the Y axis.
N_{cr,z}: Critical elastic buckling axial force with respect to the Z axis.
N_{cr,T}: Critical elastic buckling axial force due to torsion.

N_{cr} : 11524.78 kN
N_{cr,y} : 11524.78 kN
N_{cr,z} : 18200.04 kN
N_{cr,T} : 20883.05 kN

Y - Axis bending resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1;NA 2010, Article 6.2.5)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

η : 0.798 ✓

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

η : 0.815 ✓

For positive bending:

The worst case design force occurs at node N113, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE.

M_{Ed}: Worst case design bending moment.

M_{Ed} : 405.90 kN·m

For negative bending:

The worst case design force occurs at node N113, for load combination SW+1.5-Direcção0Graus..

M_{Ed}: Worst case design bending moment.

M_{Ed} : 41.86 kN·m

The design bending moment resistance **M_{b,Rd}** is given by:

$$M_{b,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the flat elements of a section submitted to simple bending.

Class : 2

W_{pl,y}: Plastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 1 and 2 sections.

W_{pl,y} : 1850.00 cm³

f_{yd}: Steel design strength.

f_{yd} : 275.00 MPa

Where:

f_y: Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1;NA 2010, Table 3.1)

f_y : 275.00 MPa

γ_{wo}: Partial safety factor of the material.

γ_{wo} : 1.00

Lateral buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1;NA 2010, Article 6.3.2)

The design bending moment resistance **M_{b,Rd}** is given by:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

Where:

W_{pl,y}: Plastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 1 and 2 sections.

W_{pl,y} : 1850.00 cm³

f_{yd}: Steel design strength.

f_{yd} : 275.00 MPa

Where:

f_y: Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1;NA 2010, Table 3.1)

f_y : 275.00 MPa

γ_{wt}: Partial safety factor of the material.

γ_{wt} : 1.00

χ_{LT}: Reduction factor due to lateral buckling.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \leq 1$$

Where:

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

α_{LT}: Elastic imperfection coefficient.

α_{LT} : 0.21

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

λ_{LT} : 0.29

M_{cr}: Critical elastic lateral buckling moment.

The critical elastic lateral buckling moment 'M_{cr}' is established in the following way:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left\{ \left(\frac{k_z}{k_y} \right)^2 \cdot \frac{I_w \cdot L^2 \cdot G \cdot I_t + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_1)^2}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} \right\}^{0.5} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_1)$$

Where:

I_z: Moment of inertia of the gross section, with respect to the Z-axis.

I_z : 7436.00 cm⁴

I_w: Uniform torsional constant.

I_w : 127.20 cm⁴

E: Modulus of Elasticity.

E : 210000 MPa

G: Elastic modulus of steel.

G : 81000 MPa

L_z: Effective buckling length of the top flange.

L_z : 2.910 m

C₁: Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

C₁ : 1.88

C₂: Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

C₂ : 1.00

C₃: Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

C₃ : 1.00

k_z: Effective length coefficient, which depends on the rotation restrictions at the ends of the bar.

k_z : 0.46

k_y: Effective length coefficient, which depends on the rotation restrictions at the ends of the bar.

k_y : 0.46

z_g: Distance between the application point of the load and the shear centre, with respect to the Z-axis.

z_g : 0.00 mm

z₁: Asymmetric parameter of the section, with respect to the Y-axis.

z₁ : 0.00 mm

Where:

z_g: Distance in the direction of the Z axis between the load application point and the geometric centre.

z_g : 0.00 mm

z₁: Distance in the direction of the Z-axis between the shear centre and the geometric centre.

z₁ : 0.00 mm

z₁: Asymmetric parameter of the section, with respect to the Y-axis.

z₁ : 0.00 mm

$$z_1 = z_g - 0.5 \cdot \int_A (y^2 + z^2) \cdot (z/I_y) \cdot dA$$

Z - Axis bending resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.5)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

For positive bending:

The worst case design force occurs at node N113, for load combination SW+1.5·DirecçãoGraus..

M_{Ed}^+ : Worst case design bending moment.

For negative bending:

The worst case design force occurs at node N113, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

M_{Ed}^- : Worst case design bending moment.

The design bending moment resistance $M_{c,Rd}$ is given by:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_{yd}$$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the flat elements of a section submitted to simple bending.

$W_{pl,z}$: Plastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 1 and 2 sections.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{MO} : Partial safety factor of the material.

Produced by an educational version of CYPE

Resistance to shear in the Z direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.280} \quad \checkmark$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

The shear resistance $V_{c,Rd}$ is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{td}}{\sqrt{5}}$$

Where:

A_v : Transverse shear area.

$$A_v = h \cdot t_w$$

Where:

h : Depth of the section.

t_w : Web thickness.

f_{td} : Steel design strength.

$$f_{td} = f_y / \gamma_{MO}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{MO} : Partial safety factor of the material.

Shear buckling of the web: (Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2006, Article 5) Even though transverse stiffeners have not been provided, it is not necessary to check the buckling resistance of the web, as the following is verified:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

Where:

λ_w : Slenderness of the web.

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

λ_{max} : Maximum slenderness.

$$\lambda_{max} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

η : Coefficient which allows to consider the additional resistance in plastic regime because of hardening due to deformed material.

ε : Reduction factor.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Where:

f_{ref} : Reference elastic limit.

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

$$31.26 < \underline{55.46} \quad \checkmark$$

$$\lambda_w : \underline{31.26}$$

$$\lambda_{max} : \underline{55.46}$$

$$\eta : \underline{1.20}$$

$$\varepsilon : \underline{0.92}$$

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

Resistance to shear in the Y direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta < \underline{0.001}$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

The shear resistance $V_{c,Rd}$ is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

Where:

A_v : Transverse shear area.

$$A_v = A \cdot d \cdot t_w$$

Where:

A : Area of the gross section.

d : Height of the web.

t_w : Web thickness.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0} : Partial safety factor of the material.

Combined bending moment Y and shear force Z resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.8)

It is not necessary to reduce the design bending resistance, as the worst case shear force V_{Ed} is not greater than 50% of the design shear resistance $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$139.49 \text{ kN} \leq 248.87 \text{ kN}$$

The worst case design forces occur at a point situated at a distance of 0.208 m from node N41, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$V_{c,Rd}$: Design resistant shear force.

Combined bending moment Z and shear force Y resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.8)

It is not necessary to reduce the design bending resistance, as the worst case shear force V_{Ed} is not greater than 50% of the design shear resistance $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.14 \text{ kN} \leq 835.81 \text{ kN}$$

The worst case design forces occur at a point situated at a distance of 0.208 m from node N41, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$V_{c,Rd}$: Design resistant shear force.

Combined bending and axial resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.9)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right] + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right] \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.638}$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.913}$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.558}$$

The worst case design forces occur at node N113, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

Where:

$N_{c,Ed}$: Compressive axial force to be withstood from the analysis.

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Worst case bending moments, in accordance with the Y and Z axes, respectively.

Class: Section class, according to its deformation capacity and plastic resistance development of its flat elements, for axial load and simple bending.

$M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$: Reduced design plastic resistant bending moments, about the Y and Z axes, respectively.

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a) \leq M_{pl,Rd}$$

$$n \leq a \rightarrow M_{y,Rd} = M_{pl,Rd}$$

$$\alpha = 2; \beta = 5 \cdot n \geq 1$$

Where:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$N_{pl,Rd}$: Compressive resistance of the gross section.

$M_{pl,Rd}$, $M_{pl,Rd}$: Bending resistance of the gross section in plastic conditions, with respect to the Y and Z axes, respectively.

$$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A : Area of the gross section.

b : Flange width.

t_f : Thickness of the flange.

Buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.3.3)

A : Area of the gross section.

$W_{pl,y}$, $W_{pl,z}$: Plastic resistance moduli corresponding to the fibre with greatest stress about the Y and Z axes, respectively.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{M1} : Partial safety factor of the material.

K_{yy} , K_{zz} , K_{yy} , K_{zz} : Interaction coefficients.

$$K_{yy} = C_{my} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{H_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,y}}$$

$$K_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{H_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,z}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$N_{c,Ed}$:	452.49	kN
$M_{y,Ed}$:	405.90	kN·m
$M_{z,Ed}$:	0.40	kN·m
Class :	2	
$M_{y,Rd}$:	508.75	kN·m
$M_{z,Rd}$:	207.87	kN·m

$$\alpha : \underline{2.000}$$

$$\beta : \underline{1.000}$$

$$n : \underline{0.123}$$

$N_{pl,Rd}$:	3671.25	kN
$M_{pl,Rd,y}$:	508.75	kN·m
$M_{pl,Rd,z}$:	207.87	kN·m
a :	0.26	
A :	133.50	cm ²
b :	30.00	cm
t_f :	16.50	mm

A :	133.50	cm ²
$W_{pl,y}$:	1850.00	cm ³
$W_{pl,z}$:	755.90	cm ³
f_{yd} :	275.00	MPa

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.00}$$

$$K_{yy} : \underline{0.97}$$

$$K_{yz} : \underline{0.58}$$

$$k_{xy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{H_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{xy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \frac{H_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

Auxiliary terms:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[2 - \frac{1.6}{W_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{W_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \cdot \eta_{pi} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{pl,y}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{W_z^2} \cdot \eta_{pi} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y} \cdot \frac{W_{pl,z}}{W_{pl,y}}}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{W_y^2} \cdot \eta_{pi} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z} \cdot \frac{W_{pl,y}}{W_{pl,z}}}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[2 - \frac{1.6}{W_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{W_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \cdot \eta_{pi} \right] \geq \frac{W_{pl,z}}{W_{pl,z}}$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_z}{I_y} \geq 0$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z}}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z} \cdot \frac{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y}}{M_{y,Ed}}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z} \cdot \frac{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y}}{M_{y,Ed}} \cdot \frac{M_{pl,z}}{C_{mz} \cdot M_{pl,z}}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y}}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{e,y}} \leq 1.5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{e,z}} \leq 1.5$$

$$\eta_{pi} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

Given that:

$$\bar{\lambda}_0 > 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,t}}\right)}$$

$$C_{my} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\epsilon_y} \cdot a_{LT}}$$

$$C_{mz} = C_{m,z,0}$$

$$k_{xy} : 0.51$$

$$k_{xz} : 0.97$$

$$\mu_y : 1.00$$

$$\mu_z : 1.00$$

$$C_{yy} : 1.01$$

$$C_{yz} : 0.97$$

$$C_{zy} : 0.99$$

$$C_{zz} : 0.84$$

$$a_{LT} : 1.00$$

$$b_{LT} : 0.00$$

$$c_{LT} : 0.26$$

$$d_{LT} : 0.01$$

$$e_{LT} : 4.08$$

$$w_y : 1.10$$

$$w_z : 1.50$$

$$\eta_{pi} : 0.12$$

$$0.39 > 0.27$$

$$C_{my} : 0.94$$

$$C_{mz} : 0.79$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,t}}\right)}}$$

$$\epsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{pl,y}}$$

$C_{m,y,0}$: Equivalent uniform bending moment factors.

C_1 : Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

χ_y, χ_z : Buckling reduction coefficients, about the Y and Z axes, respectively.

χ_{LT} : Lateral buckling reduction coefficient.

$\bar{\lambda}_{max}$: Maximum slenderness between $\bar{\lambda}_y$ and $\bar{\lambda}_z$.

$\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$: Reduced slendernesses with respect to the Y and Z axes, respectively.

$\bar{\lambda}_{LT}$: Reduced slenderness.

$\bar{\lambda}_0$: Reduced slenderness, with respect to lateral buckling, for a uniform bending moment.

$W_{e,y}, W_{e,z}$: Elastic resistant modules corresponding to the compressed fibre, about the Y and Z axes, respectively.

$N_{cr,y}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Y axis.

$N_{cr,z}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Z axis.

$N_{cr,t}$: Critical elastic buckling axial force due to torsion.

I_y : Moment of inertia of the gross section, with respect to the Y-axis.

I_x : Uniform torsional moment of inertia.

Produced by an educational version of CYPE

Combined bending, axial and shear resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.10)

It is not necessary to reduce the design bending and axial force resistance, as the buckling effect can be ignored due to shear.

Additionally, the worst case design shear force V_{Ed} is less than or equal to 50% of the design shear resistance $V_{e,Rd}$.

The worst case design forces occur at a point situated at a distance of 0.208 m from node N41, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE.+0.9·Direcção90grausposiçãocentral.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{e,Rd,z}}{2}$$

Where:

$V_{Ed,z}$: Worst case design shear force.

$V_{e,Rd,z}$: Design resistant shear force.

$$131.75 \text{ kN} \leq 248.87 \text{ kN} \quad \checkmark$$

$$V_{Ed,z} : 131.75 \text{ kN}$$

$$V_{e,Rd,z} : 497.75 \text{ kN}$$

Torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.7)

The check does not proceed, as there is no torsional moment.

Combined Z shear and torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.7)

There is no interaction between torsional moment and shear force for any combination. Therefore the check does not proceed.

Verificação aos ELU da Viga B₁

Verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3, de acordo com a secção 5.6 deste documento.

- E.1** Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.
- E.2** Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.
- E.3** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.
- E.4** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.

Verificação aos ELU da Viga B₁

Verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3, de acordo com a secção 5.6 deste documento.

Anexo E.1

Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.

Anexo E.1

AcianUM INTERFACE I. SECÇÃO TRANSVERSAL E PROPRIEDADES DO MATERIAL MÓDULO DE CÁLCULO: MANUAL

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					e				
PR	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{ytop}	W _{ybot}	W _{y1/2}	I _y	A ₀₂	I _z	W _{ztop}	W _{zbot}	W _{z1/2}	I _z	A ₀₃	I _r	I _w x 10 ⁻²	e	
f _t [MPa]	275	660	160	160	8	21	21	0	0	116,6	330	80	618	618	0	0	84358	2556	2556	2911	26,89	59,33	1436	179,5	179,5	278,7	3,509	67,2	103,6	1463	0,92

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
		h	b ₂	b ₁	t _w	t ₂	t ₁	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	
PR	Perfil Laminado	660	160	160	8	21	21	0	0	116,6	330,0	80,0	618	618	0,00	0,00	

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA

ELEMENTO	NO.	L	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
		m			h	b ₂	b ₁	t _w	t ₂	t ₁	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	
	27	2,91	HEA 340	Perfil Laminado	330	300	300	9,5	16,5	16,5	27	27	133,5	165,0	150,0	297	243,0	0,00	0,00	

TIPO DE PERFIL Laminado

CORDÕES DE SOLDADURA:
NÃO EXISTEM CORDÕES DE SOLDADURA.

BANZO
ALMA

CLASSE DE AÇO

CONSTITUINTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL

AÇO DA CLASSE

f_y MPa

f_u MPa

PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL

E GPa α / K

G GPa G_m Kg/m²

ν η

Redefinir
NP EN 1993-1-1

COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA

γ_{M0} Redefinir
NP EN 1993-1-1

γ_{M1}

γ_{M2}

João M. M. Eira Prof. Isabel Valente Eng.º Miguel Pires Universidade do Minho Escola de Engenharia GRUPO CASAIS

Figura E.1 – Interface I. Secção transversal e propriedades do material: Viga B₁ do Pórtico 3.

AcademUM **INTERFACE II. CONDIÇÕES DE APOIO, TRAVAMENTO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL** MÓDULO DE CÁLCULO:

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z											
PRS	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{ytop}	W _{yinf}	W _{iy}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{ztop}	W _{zinf}	W _{iz}	I _z	A _{vs}	I _t	I _v x 10 ³	ε	
f _y [MPa]	275	660	160	160	8	21	21	0	0	116,6	330	80	618	618	0	0	84358	2556	2556	2911	26,89	51,12	1436	179,5	179,5	278,7	3,509	67,2	103,6	1463	0,92

MÓDULO MANUAL INTRODUÇÃO MANUAL DO VALOR DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ATUANTES NA SECÇÃO A VERIFICAR E DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS QUE CARACTERIZAM O SISTEMA ESTRUTURAL INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} **74,24** kN M_{Ed,y} **-393,30** kN.m V_{Ed,z} **-70,14** kN M_{Ed,x} **-1,04** kN.m V_{Ed,y} **-0,07** kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L **5,00** m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} **15,00** m L_{cr,z} **1,65** m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS l_{sup} **1,65** m l_{inf} **1,65** m

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER VALORES DIRETAMENTE DE UM FICHEIRO DO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS ABERTO NESTE COMPUTADOR INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

MÓDULO AUTOMÁTICO MODELAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL PARA CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS PARÂMETROS CORRESPONDENTES PELA FERRAMENTA INFO ? OCULTAR / MOSTRAR



José M. M. Eira
Prof. Isabel Valente
Eng. Miguel Pires

Universidade do Minho
Escola de Engenharia


Figura E.2 – Interface II. Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural: Viga B₁ do Pórtico 3.

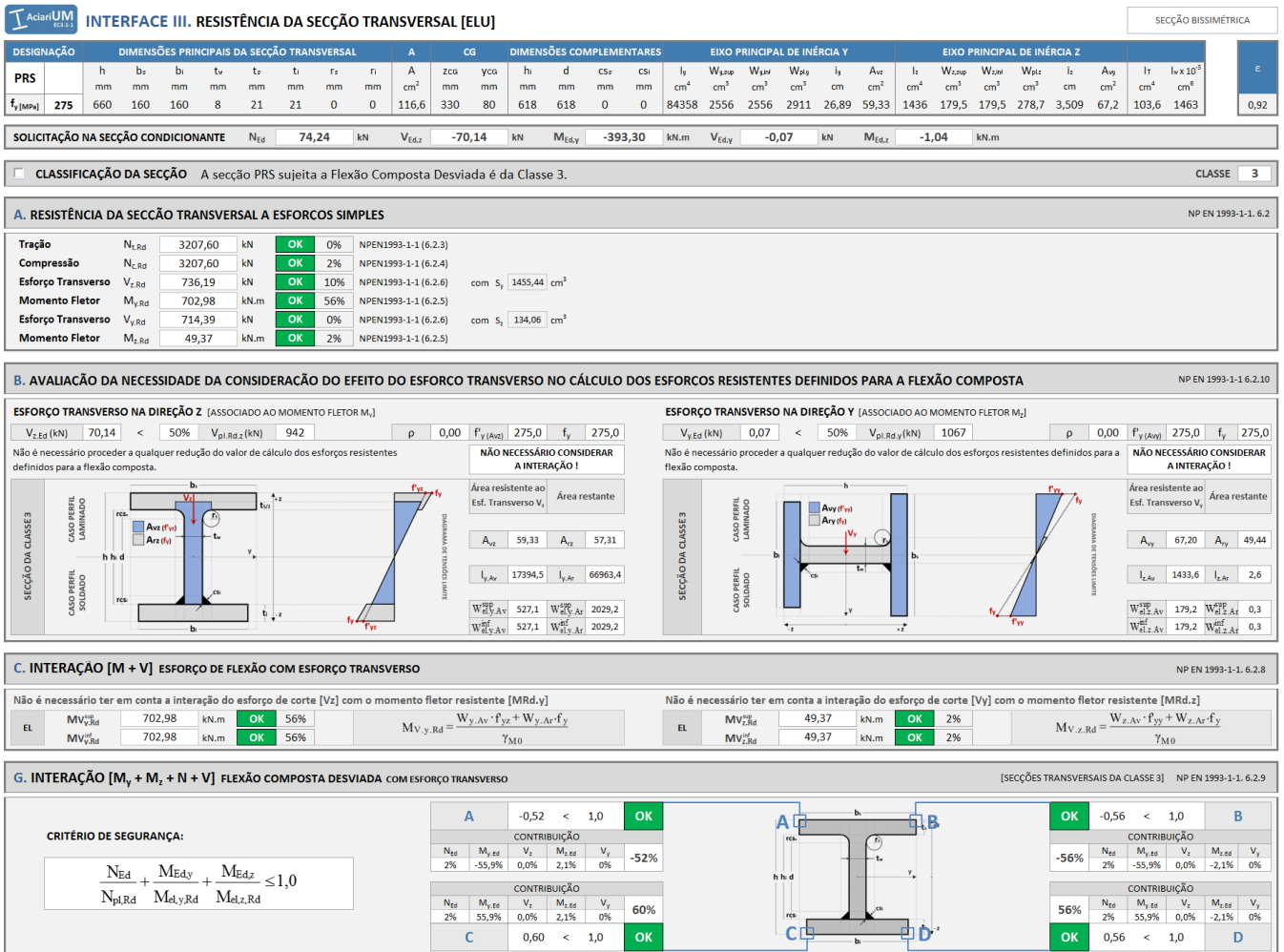


Figura E.3 – Interface III. Resistência da seção transversal (ELU): Viga B₁ do Pórtico 3.

AcariUM INTERFACE IV. FENÓMENOS DE ENCURVADURA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										A	OG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES						EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε			
PRS	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	t _s	r	r _i	r _s	A	Z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{pl,z}	I _z	A _{ve}	I _z	W _{pl,z}	W _{el,z}	W _{pl,z}	I _z	A _{ve}	I _t	I _w × 10 ³	ε
f _y [MPa]	275	660	160	160	8	21	21	0	0	0	116,6	330	80	618	618	0	0	84358	2556	2556	2911	26,89	49,44	1436	179,5	179,5	278,7	3,509	67,2	103,6	1463	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 74,24 kN V_{Ed,z} -70,14 kN M_{Ed,y} -393,30 kN.m V_{Ed,y} -0,07 kN M_{Ed,z} -1,04 kN.m CLASSE 3

A. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,y,Rd} 2614,74 kN OK 2,8% L_{cr,y} 15,00 λ_y 0,64 α_y 0,34 φ_y 0,78 χ_y 0,82

B. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,z,Rd} 2628,38 kN OK 2,8% L_{cr,z} 1,65 λ_z 0,54 α_z 0,49 φ_z 0,73 χ_z 0,82

C. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL [BAMBEAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.2

DETERMINAÇÃO DO VALOR DO MOMENTO CRÍTICO (M_{cr}) PARA A ENCURVADURA LATERAL - PROPOSTA DE CLARK AND HILL (1960) E GALÉA (1981):

CÁLCULO AUTOMÁTICO DO VALOR DE M_{cr} M_{cr} = C₁ π² E I_z / (k_w l)² [(k_z I_w + (k_z l)² G I_T + (C₂ z_{cg} - C₃ z_{ji})²]^{0,5} - (C₂ z_{cg} - C₃ z_{ji}) = 1258,79 kN.m

VALORES PROPOSTOS M_{cr} 1467 kN.m M_{cr} 3619 kN.m

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS C₁ 1,29 C₂ 1,56 C₃ 0,75

FORMA DO DIAGRAMA DE MOMENTOS

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO BANZO COMPRIMIDO: INFERIOR

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO k_z 1,00 k_w 1,00

COMPRIMENTO ENTRE SECÇÕES LATERALM. CONTRAVENTADAS l (m) 1,65

POSICIÓN DA CARGA NA SECÇÃO Z_g 0,303 em metros

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO β 0,5

BANZO COMPRIMIDO: INFERIOR I_{cg} 716,8 cm²

BANZO TRACIONADO: SUPERIOR I_{cg} 716,8 cm²

DETERMINAÇÃO DO VALOR DE CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE À ENCURVADURA LATERAL: M_{b,y,Rd} 430,68 kN.m OK 91% M_{cr} 1259 kN.m M_{cr} 3619 kN.m λ_{LT} 0,75 α_{LT} 0,76 φ_{LT} 0,99 χ_{LT} 0,61

D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO] NP EN 1993-1-1. Anexo A

ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (ELU) V_{pl,Rd} 784,97 kN OK NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S 1455,44 cm²

ALMA NÃO REFORÇADA h_w/t_w 77,25 > 72/η ε 55,46 Devem existir reforços transversais pelo menos nos apoios!

REFORÇOS TRANSVERSAIS EXTREMIDADE Sim RÍGIDOS INTERMÉDIOS Não a_w (m) 5,00 L (m) 5,00 OTIMIZAR REFORÇOS TRANSVERSAIS

REFORÇOS LONGITUDINAIS Não Arredondamento a múltiplos de 5cm.

ALMA REFORÇADA h_w/t_w 77,25 > 31/η ε √k_ε 55,5 A chapa deve ser verificada em relação à resistência à encurvadura por esforço transverso! kt 5,40 kt_ε 0 a/h_i 8,09

VERIFICAÇÃO DA CHAPA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

V_{b,Rd} [kN] 684,1 = V_{b,w,Rd} 677,55 + V_{b,f,Rd} 6,6

DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS

TRACIONADO	BANZO SUPERIOR	b (mm)	t (mm)	c	ψ	κσ	λ _p	ρ	c _{eff} (mm)	b _{eff} (mm)	
COMPRESSO	BANZO INFERIOR	160	21	76	1,00	0,43	0,210	≤	0,748	1,000	76,00
		160	21	76	1,00	0,43	0,210	≤	0,748	1,000	76

SECÇÃO EFETIVA constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos. A_{eff} [cm²] 67,20 z_{cg} [mm] 330,00 I_{eff} [cm⁴] 68623 M_{b,Rd} 571,86 M_{pl,Rd} 548,88 W_{eff} 2079,5 b_y 160 t_y 21 c 1,435

NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO

RESTRICÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.

Figura E.4 – Interface IV. Fenómenos de Encurvadura: Viga B₁ do Pórtico 3.

Académico INTERFACE V. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS EM FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A			CG			DIMENSÕES COMPLEMENTARES						EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε
PR	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	n	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{pl,y}	W _{sp,y}	W _{pl,z}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{pl,z}	W _{sp,z}	W _{pl,z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _v × 10 ³	ε	
f _y [MPa]	275	660	160	160	8	21	21	0	116,6	330	80	618	618	0	0	84358	2556	2556	2911	26,89	49,44	1436	179,5	179,5	278,7	3,509	67,2	103,6	1463	0,92	

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE		N _{Ed}	74,24	kN	V _{Ed,z}	-70,14	kN	M _{Ed,y}	-393,30	kN.m	V _{Ed,y}	-0,07	kN	M _{Ed,z}	-1,04	kN.m	CLASSE	3
-------------------------------------	--	-----------------	-------	----	-------------------	--------	----	-------------------	---------	------	-------------------	-------	----	-------------------	-------	------	--------	---

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO ALTERNATIVO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A NP EN 1993-1-1, Anexo A

PARÂMETROS ENCURVADURA	l _{cr,y}	15,00	l _{cr,z}	1,65	L	5,00	λ _y	0,64	λ _z	0,54	λ _{LT}	0,747	χ _y	0,82	χ _z	0,82	χ _{LT}	0,61
------------------------	-------------------	-------	-------------------	------	---	------	----------------	------	----------------	------	-----------------	-------	----------------	------	----------------	------	-----------------	------

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS	N _{cr,y}	7771	kN	N _{cr,z}	10934	kN	N _{cr,T}	16285	kN	FATORES	u _y	1,00	u _z	1,00	w _y	1,14	w _z	1,50	η _{pl}	0,02	λ _{max}	0,64
---------------------------	-------------------	------	----	-------------------	-------	----	-------------------	-------	----	---------	----------------	------	----------------	------	----------------	------	----------------	------	-----------------	------	------------------	------

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE

CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS VALORES DE C_{my,0} e C_{mz,0}

CÁLCULO MANUAL DOS VALORES DE C_{my,0} e C_{mz,0}

M^e_{CR} 3619 kN.m C₁ 1,29 λ₀ 0,44 > 0,2√C₁√(1 - N_{Ed}/N_{cr,z})(1 - N_{Ed}/N_{cr,TF}) ⇒

C_{my} 1,00 < C_{my,0} 1,00

C_{mz} 1,00 < C_{mz,0} 1,00

C_{mLT} 1,00

FATORES	a _{LT}	1,00	b _{LT}	0,00	c _{LT}	0,31	d _{LT}	0,05	e _{LT}	3,23	FATORES	C _{yy}	1,00	C _{yz}	0,86	C _{zy}	0,99	C _{zz}	0,97
---------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	---------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

FATORES DE INTERAÇÃO	k _{yy}	1,01	k _{yz}	1,01	k _{zy}	1,01	k _{zz}	1,01
----------------------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + K_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + K_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0 \text{ OK } 97\%$$

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.62

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + K_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + K_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0 \text{ OK } 97\%$$

Figura E.5 – Interface V. Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão: Viga B₁ do Pórtico 3.

Verificação aos ELU da Viga B₁

Verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3, de acordo com a secção 5.6 deste documento.

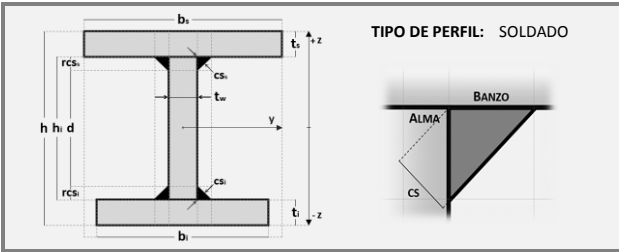
Anexo E.2

Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.

O ELEMENTO SUJEITO A FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA E CONSTITUIDO PELO PERFIL TRANSVERSAL PRS S275 (SECÇÃO DA CLASSE 3) VERIFICA TODAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA.

OK 97%

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				PROPRIEDADES			
PRS	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	E	v	η
f _y [MPa]	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	GPa	-	-
275	660	160	160	8	21	21	0	0	116,64	330	80	618	618	0	0	210	0,3	1,2



EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					
I _y	W _{y,sup}	W _{y,inf}	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
84358	2556,3	2556,3	2910,9	26,893	49,44

EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					
I _z	W _{z,sup}	W _{z,inf}	W _{pl,z}	i _z	A _{vy}
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
1436,2	179,53	179,53	278,69	3,509	67,2

E	
0,92	

I _T	
103,64	

l _w x 10 ⁻³	
1463,4	

CLASSE DE RESISTÊNCIA		
AÇO DA CLASSE	S275	
f _y	235	MPa
f _u	360	MPa

COEFICIENTES	
γ _{M0}	1,00
γ _{M1}	1,00
γ _{M2}	1,25

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO

N _{Ed}	74,24	kN	M _{Ed,y}	-393,30	kN	V _{Ed,z}	-70,14	kN.m	M _{Ed,z}	-1,04	kN	V _{Ed,y}	-0,07	kN.m
-----------------	-------	----	-------------------	---------	----	-------------------	--------	------	-------------------	-------	----	-------------------	-------	------

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO: A secção PRS sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 3. CLASSE 3

III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL AOS ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)

SECÇÃO BISSIMÉTRICA

RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES

Estado Limite Último	N _{Ed}	N _{Rd}	Utilização	Norma	Observações
Tração	74,24	3207,60	OK 0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)	
Compressão	-393,30	3207,60	OK 2%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)	
Esforço Transverso	-70,14	736,19	OK 10%	NPEN1993-1-1 (6.2.6)	com S _y 1455,44 cm ³
Momento Fletor	-393,30	702,98	OK 56%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)	
Esforço Transverso	-0,07	714,39	OK 0%	NPEN1993-1-1 (6.2.6)	com S _z 134,06 cm ³
Momento Fletor	-1,04	49,37	OK 2%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)	

AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA

NP EN 1993-1-1 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO EM Z-Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_y]

V_{Ed,z} (kN) 70,1 < 50% V_{pl,z,Rd} (kN) 785 ρ 0,00 f'_{y(Avz)} 275 f_y 275

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

Área resistente ao Esf. Transv. Vz	Área restante
A _{vz} 49,44	A _{rz} 67,2
I _{z,Av} 15735,3	I _{z,Ar} 68622,6
476,8	2079,5
476,8	2079,5

ESFORÇO TRANSVERSO EM Y-Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M_z]

V_{Ed,y} (kN) 0,07 < 50% V_{pl,y,Rd} (kN) 1067 ρ 0,00 f'_{y(Avy)} 275 f_y 275

Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.

Área resistente ao Esf. Transv. Vy	Área restante
A _{vy} 67,20	A _{ry} 49,4
I _{z,Av} 1433,6	I _{z,Ar} 2,6
179,2	0,3
179,2	0,3

INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO

[SECÇÕES TRANSVERSAIS DAS CLASSES 1, 2, 3 OU 4]

NP EN 1993-1-1 6.2.8

ELÁSTICO	M _{y,Rd}	V _{Ed,z}	Utilização	Equação	ELÁSTICO	M _{z,Rd}	V _{Ed,y}	Utilização	Equação
	702,98	70,14	OK 56%	M _{v,y,Rd} = $\frac{W_{y,Av} \cdot f_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$		49,37	0,07	OK 2%	M _{v,z,Rd} = $\frac{W_{z,Av} \cdot f_{yy} + W_{z,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	702,98	70,14	OK 56%			49,37	0,07	OK 2%	

INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO

[SECÇÕES TRANSVERSAIS MONOSSIMÉTRICAS DA CLASSE 3]

NP EN 1993-1-1 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed,y}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1,0$$

A	-0,52	<	1	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y
2%	-55,9%	0%	2,1%	0%
-52%				
C	0,60	<	1	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y
2%	55,9%	0%	2,1%	0%
60%				

B	-0,56	<	1	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y
2%	-55,9%	0%	-2,1%	0%
-56%				
D	0,56	<	1	OK
CONTRIBUIÇÃO				
N _{Ed}	M _{y,Ed}	V _z	M _{z,Ed}	V _y
2%	55,9%	0%	-2,1%	0%
56%				

IV. RESISTÊNCIA DO ELEMENTO A FENÓMENOS DE ENCURVADURA

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO]

N_{b,y,Rd} 2614,74 kN OK 3% L_{cr,y} 15 m λ_y 0,64 α_y 0,34 φ_y 0,78 χ_y 0,82

NP EN 1993-1-1 6.3.1.1(3)

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO]

N_{b,z,Rd} 2628,38 kN OK 3% L_{cr,z} 1,65 m λ_z 0,54 α_z 0,49 φ_z 0,73 χ_z 0,82

NP EN 1993-1-1 6.3.1.1(3)

MOMENTO CRÍTICO PARA A ENCURVADURA LATERAL M_{CR}:

VALOR DO MOMENTO CRÍTICO M_{CR} DEFINIDO MANUALMENTE PELO UTILIZADOR: M_{CR} 1258,79 kN.m

M_{b,Rd} 430,68 kN.m OK 91% M_{CR} 1258,79 kN.m M_{CR,E} 3618,94 kN.m λ_{LT} 0,75 α_{LT} 0,76 φ_{LT} 0,99 χ_{LT} 0,61

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO]

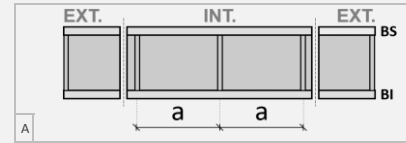
ALMA NÃO REFORÇADA:

h_w/t_w 77,25 > 72/η ε 55,465 → Devem existir reforços transversais pelo menos nos apoios!

ALMA COM REFORÇOS TRANSVERSAIS:

EXTREMIDADE Não INTERMÉDIOS Não ESPAÇAMENTO ENTRE REFORÇOS: a_w - m

h_w/t_w 77,25 < 31/η ε √k_τ - → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transv k_τ - k_{τ,SI} 0,00



VERIFICAÇÃO DA ALMA EM RELAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

CONTRIBUIÇÃO DA ALMA V_{bw,Rd} - kN com λ_w - σ_E 31,81 MPa λ_w -

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

CONTRIBUIÇÃO BANZOS V_{bf,Rd} - kN com M_{Nf,Rd} 548,88

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

V_{b,Rd} - kN

V. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO À ESTABILIDADE GLOBAL

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS N_{cr,y} 7770,74 kN N_{cr,z} 10934 kN N_{cr,T} 16284,5 kN FATORES u_y 1,00 u_z 1,00 w_y 1,14 w_z 1,50 η_{pl} 0,02 λ_{max} 0,64

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME:

VALORES DOS PARÂMETROS C_{my,0} e C_{mz,0} DEFINIDOS MANUALMENTE PELO UTILIZADOR: C_{my,0} 1,00 C_{mz,0} 1,00

λ₀ = √(W_{pl,y} f_y / M_{cr}^E) = 0,44 > 0,2 √C₁ √(1 - N_{Ed} / N_{cr,z}) (1 - N_{Ed} / N_{cr,TF}) = 0,23 ⇒ C_{my} 0,00 C_{mz} 1,00 C_{mLT} 0,00

FATORES a_{LT} 1,00 b_{LT} 0,00 c_{LT} 0,31 d_{LT} 0,05 e_{LT} 3,23 FATORES C_{yy} 1,00 C_{yz} 0,86 C_{zy} 0,99 C_{zz} 0,97

FATORES DE INTERAÇÃO k_{yy} 1,01 k_{yz} 1,01 k_{zy} 1,01 k_{zz} 1,01

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0 \text{ OK } 97\%$$

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} = 0,97 < 1,0 \text{ OK } 97\%$$

ANEXO I. NOTAÇÃO:

A	área da secção transversal (cm ²)
z _{cg}	coordenada em z da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
y _{cg}	coordenada em y da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
I _(i)	momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo (i) (cm ⁴)
W _{y,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
W _{y,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
W _{z,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo superior (cm ³)
W _{z,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo inferior (cm ³)
W _{pl,y}	módulo de flexão plástico da secção transversal (cm ³)
i _(i)	raio de giração da secção transversal relativo ao eixo (i) (cm)
A _{v,(i)}	área resistente aos esforço transverso V _(i) (cm ²)
I _T	constante de torção de St. Venant (cm ⁴)
I _w	constante de empenamento (cm ⁶)
E	módulo de elasticidade (GPa)
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico
η	coeficiente para calcular a área de corte
f _y	tensão de cedência (MPa)
f _u	tensão última (MPa)
γ _{M(i)}	coeficientes parciais de segurança γ _{M0} , γ _{M1} , γ _{M2}
ε	fator que depende de f _y
N _{Ed}	valor de cálculo do esforço normal atuante (kN)
M _{(i),Ed}	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo (i) (kN.m)
V _{(i),Ed}	valor de cálculo do esforço transverso atuante na direção (i) (kN)
N _{t,Rd}	valor de cálculo do esforço normal resistente de tração (kN)
N _{c,Rd}	valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão (kN)
M _{(i),Rd}	valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo (i) (kN.m)
V _{(i),Rd}	valor de cálculo do esforço transverso resistente na direção (i) (kN)
A _{v,z}	área resistente ao esforço transverso V _z (cm ²)
A _{r,z}	área restante relativamente à área A _{vz} (A-A _{vz}) (cm ²)
A _{v,y}	área resistente ao esforço transverso V _y (cm ²)
A _{r,y}	área restante relativamente à área A _{vy} (A-A _{vy}) (cm ²)

Página 2 de 26 de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos fletores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos

f_y (A_v...) tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transverso A_v para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transverso V₂ no cálculo

$\sigma_{y,z}$	momento fletor resistente $M_{V,y,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,z}$ (MPa)
$f_{y,v}(A_{v,y})$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal $A_{v,y}$ para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_y no cálculo do resistente $M_{v,z,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,v}$ (MPa)
$W_{el,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y , relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{el,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y , relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo superior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo inferior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y , relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y , relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo superior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo inferior da secção transversal
$M_{V,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra superior da secção transversal (kN.m)
$M_{V,y,Rd,inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra inferior da secção transversal (kN.m)
$M_{V,z,Rd, sup}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo superior (kN.m)
$M_{V,z,Rd, inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{v,z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo inferior (kN.m)
$M_{NV,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{z,Ed}$ (kN.m)
$M_{NV,z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{y,Ed}$ (kN.m)
$N_{b,(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura em relação ao eixo (i) de um elemento comprimido (kN)
$L_{cr,(i)}$	comprimento de encurvadura em relação ao eixo (i) (kN)
$\lambda_{(i)}$	esbelteza normalizada associada à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\alpha_{(i)}$	fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos associado à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\Phi_{(i)}$	valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{(i)}$
$\chi_{(i)}$	coeficiente de redução para o modo de encurvadura em relação ao eixo (i)
M_{cr}	momento crítico de encurvadura lateral (kN.m)
$M_{cr,E}$	momento crítico elástico de encurvadura lateral (kN.m)
$C_{(i)}$	coeficientes C_1 , C_2 e C_3 dependentes da forma do diagrama de momentos flectores e das condições de apoio nas extremidades do tramo de comprimento l a analisar
l	comprimento entre secções lateralmente contraentadas no banzo considerado (m)
k_z	fator de comprimento efetivo referente às restrições à rotação em torno do eixo z das secções de extremidade do tramo de comprimento l
k_w	fator de comprimento efetivo referente às restrições ao empenamento das secções de extremidade do tramo de comprimento l
z_g	coordenada em z do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal (m)
z_j	parâmetro que traduz o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y (m)
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral (kN.m)
λ_{LT}	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
α_{LT}	fator de imperfeição para a encurvadura lateral
Φ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
a_w	distância entre reforços transversais da alma (m)
$V_{b,w,Rd}$	valor de cálculo da contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
$V_{b,f,Rd}$	valor de cálculo da contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
χ_w	coeficiente de redução para a encurvadura por esforço transversal
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos (kN.m)
$M_{N,f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, reduzido pela presença de um esforço normal N_{Ed} (kN.m)
$V_{b,Rd}$	valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal
$N_{cr,y}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y (kN)
$N_{cr,z}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z (kN)
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por torção (kN)
C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
A_{eff}	área efetiva de uma secção transversal (cm ²)
$W_{y,eff,s}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y , relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
$W_{y,eff,i}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y , relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,DIR}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema esquerda da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,ESQ}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z , relativo à fibra extrema direita da secção transversal (cm ³)
e_{Nz}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo z (mm)
ΔM_y	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Nz} (kN.m)
e_{Ny}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo y (mm)
ΔM_z	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Ny} (kN.m)

Verificação aos ELU da Viga B₁

Verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3, de acordo com a secção 5.6 deste documento.

Anexo E.3

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.

Symbol	Values	Unit	Symbol description
c2lf2	3.47		Flange slenderness
KLF2	1		Flange class
cw	61.160	cm	Web height
tw	0.800	cm	Web thickness
cw/tw	76.45		Web slenderness
alfa	0.53		Relative extent of the compressed plastic zone
psi	-0.95		Stress or strain ratio
KLW	3		Web class
(hw/tw)/lim	55.46		limit slenderness of a web for shear
hw/tw	77.25		web slenderness for shear
KLSZ	Slender		Web class (shear)
KL	3		Section type

Parameters of buckling analysis:

About the y axis of cross-section			
Curve,y	b		Buckling curve
Lcr,y	14.885	m	Effective buckling length
Lamy	59.94		Slenderness ratio
Lam_y	0.69		Non-dimensional slenderness ratio for buckling
alfa,y	0.34		imperfection factor
fi,y	0.82		Coefficient for calculation of X
Xy	0.79		Reduction factor for buckling
Ny,b,Rd	2531.1150	kN	Design buckling resistance of comp. member

About the z axis of cross-section			
Curve,z	c		Buckling curve
Lcr,z	1.652	m	Effective buckling length
Lamz	46.19		Slenderness ratio
Lam_z	0.53		Non-dimensional slenderness ratio for buckling
alfa,z	0.49		imperfection factor
fi,z	0.72		Coefficient for calculation of X
Xz	0.82		Reduction factor for buckling
Nz,b,Rd	2646.0214	kN	Design buckling resistance of comp. member

Parameters of lateral-torsional buckling analysis:

General method [6.3.2.2]			
Lcr,upp	1.652	m	Lateral buckling length of upper flange
Lcr,low	1.652	m	Lateral buckling length of lower flange
C1	0.28		Factor for Mcr calculations
C2	1.56		Factor for Mcr calculations
C3	0.75		Factor for Mcr calculations
Iw	1224392.826	cm6	Warping constant
Zg	30.250	cm	Distance from the point where the load is applied to the critical moment for lateral-torsional buckling
Mcr	1262.9818	kN*m	Critical moment for lateral-torsional buckling
Lam_LT	0.75		Non-dimens. slenderness ratio for lat.-tors. buckling
Curve_LT	d		Lateral buckling curve
alfa_LT	0.76		Imperfection factor for lateral buckling curves
fi_LT	0.99		Coefficient for calculation of XLT

Symbol	Values	Unit	Symbol description
MEMBER: 51 ; COORDINATE: x = 1.00 L = 1.652 m			
Cross-section properties: PRS1			
Ax	116.640	cm2	Cross-section area
Ay	67.200	cm2	Shear area - y-axis
Az	59.328	cm2	Shear area - z-axis
x	101.074	cm4	Torsional constant
y	84357.895	cm4	Moment of inertia of a section about the y-axis
z	1436.237	cm4	Moment of inertia of a section about the z-axis
Wely,u	2556.300	cm3	Elastic section modulus about the y-axis - upper edge
Wely,l	2556.300	cm3	Elastic section modulus about the y-axis - lower edge
Welz	179.530	cm3	Elastic section modulus about the z-axis
h	66.000	cm	Height of cross-section
b	16.000	cm	Top flange width
b2	16.000	cm	Bottom flange width
f	2.100	cm	Top flange thickness
f2	2.100	cm	Bottom flange thickness
w	0.800	cm	Web thickness
Y	26.893	cm	Radius of gyration - y-axis
Z	3.509	cm	Radius of gyration - z-axis
Anb	1.00		Net area to gross area ratio
Eta	1.20		Factor for Av calculation

Material:

Name	S 275 (S 275)
f _y	275.0000 MPa
f _t	430.0000 MPa
σ ₀₂	1.00
σ ₀₁	1.00
σ ₀₂	1.25

Designations of additional codes:

EN112	EN 1991-1-2:2003 - Fire loads on a structure
EN312	EN 1993-1-2:2005 - Steel structures - fire design
EN313	EN 1993-1-3:2005 - Steel structures from cold-formed sections
EN315	EN 1993-1-5:2005 - Steel structures - plated elements
EC111	ECCS No111:2001 - Guidebook with recommendations for design
ENV311	ENV 1993-1-1:1992 - Steel structures - general code

Class of section

cf1	7.280	cm	upper flange width
ff1	2.100	cm	upper flange thickness
cf1/ff1	3.47		Flange slenderness
KLF	1		Flange class
cf2	7.280	cm	lower flange width
ff2	2.100	cm	lower flange thickness

Symbol	Values	Unit	Symbol description
SigMz2.x,Ed	5.8147	MPa	Normal stress in the left edge from Mz
Tau.y,Ed	-0.0106	MPa	Tangent stress about y axis
Tau.z,Ed	-14.1878	MPa	Tangent stress about z axis
Tau.ty,Ed	0.0376	MPa	shear stress due to torsional moment T1,Ed
Tau.tz,Ed	0.0143	MPa	shear stress due to torsional moment T1,Ed

Design forces:

Nc,Rd	3207.6001	kN	Design compression resistance
Nb,Rd	2531.1150	kN	Design buckling resistance of comp. member
Mb,Rd	431.2323	kN*m	Design buckling resistance moment

About the y axis of cross-section

My.pl,Rd	800.4942	kN*m	Design plastic resistance moment
My.el,Rd	702.9824	kN*m	Design elastic resistance moment
My.c,Rd	702.9824	kN*m	Design moment resistance
Vy.c,Rd	1066.9433	kN	Design plastic shear resistance
Vy.T,Rd	1066.8423	kN	resistance for shear considering torsion

About the z axis of cross-section

Mz.pl,Rd	76.6392	kN*m	Design plastic resistance moment
Mz.el,Rd	49.3706	kN*m	Design elastic resistance moment
Mz.c,Rd	49.3706	kN*m	Design moment resistance of a compressed section part
Vz.c,Rd	941.9585	kN	Design plastic shear resistance
Vz.T,Rd	941.9246	kN	resistance for shear considering torsion

Verification formulas:

UFS[N]My/Mz	0.60	$\frac{N_{Ed}M_{y,c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd}}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$
UFS[Sign]Miss	0.58	$\frac{M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd}}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$
UFS[Vy]	0.00	$\frac{V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd}}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$
UFS[Vz]	0.07	$\frac{V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd}}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$
UFS[VyT]	0.00	$\frac{\tau_{xy,Ed}/(\sqrt{3} \cdot gM0)}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$
UFS[VzT]	0.00	$\frac{\tau_{yz,Ed}/(\sqrt{3} \cdot gM0)}{\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{xy,Ed} + \tau_{yz,Ed})^2}}$

Global stability check of member:

UFB[Lambda]	0.29	$\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{crit}}$
UFB[My]	0.91	$\frac{M_{y,Ed}/M_{b,Rd}}{N_{Ed}/(X_{y,N,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(X_{z,N,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{z,Ed}/(X_{LT} \cdot M_{z,Rk}/gM1) + k_{yz}}$
UFB[N]My/Mz	0.98	$\frac{N_{Ed}/(X_{y,N,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(X_{LT} \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(X_{z,N,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{z,Ed}/(X_{LT} \cdot M_{z,Rk}/gM1) + k_{yz}}{1}$
RAT	0.98	Efficiency ratio

Section
MEMBER: 51
 Properties:
 Cross-section a
 Shear area - y-a

Symbol	Values	Unit	Symbol description
XLT	0.61		Reduction factor for lateral-torsional buckling

Parameters of global stability analysis of member

Method of interaction parameter calculations - Annex A

Ncr.y	6475.4230	kN	Euler buckling load in y direction
Ncr.z	10905.5464	kN	Euler buckling load in z direction
Ncr.T	16162.0225	kN	Critical force (lateral-torsional buckling)
My	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
Mz	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
ky	1.14		Coefficient related to ratio of section properties
wz	1.50		Coefficient related to ratio of section properties
Lam_0	0.46		Relative slenderness for lateral buckling (constant mom)
Cmy,0	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmz,0	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmy	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmz	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmy,0LT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmz,0LT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
CmLT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
aLT	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
aLT	0.00		Coefficient for calculation of Cyz
Cyy	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
aLT	0.33		Coefficient for calculation of Cyz
Cyz	0.85		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
dLT	0.06		Coefficient for calculation of Cyz
Czy	0.99		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
aLT	3.47		Coefficient for calculation of Czz
Czz	0.97		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
ky	1.01		Interaction parameter
kyz	1.01		Interaction parameter
kzy	1.01		Interaction parameter
kzz	1.01		Interaction parameter

Internal forces at characteristic points of cross section

N,Ed	74.2374	kN	axial force N,Ed
T1,Ed	0.0620	kN*m	torsional moment
My,Ed	-393.2982	kN*m	bending moment My,Ed
Mz,Ed	1.6439	kN*m	bending moment Mz,Ed
Vy,Ed	9.0709	kN	shear force Vy,Ed
Vz,Ed	370.1443	kN	shear force Vz,Ed

Stresses at characteristic points of cross-section:

Sig.x,Ed	166.0338	MPa	maximum normal stress in a section
SigN.x,Ed	6.3647	MPa	Normal stress caused by axial compression
SigMy.x,Ed	-153.8545	MPa	Normal stress in the upper edge from My
SigMz.x,Ed	153.8545	MPa	Normal stress in the bottom edge from My
SigMz.x,Ed	-5.8147	MPa	Normal stress in the right edge from Mz

Verificação aos ELU da Viga B₁

Verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3, de acordo com a secção 5.6 deste documento.

Anexo E.4

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU da viga B₁ do Pórtico 3.

Compression resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.4)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

η : **0.028** ✓

The worst case design force occurs at node N39, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

$N_{c,Rd}$: Worst case design compressive axial force.

$N_{c,Rd}$: **73.96** kN

The normal design compression force $N_{c,Ed}$ should be taken as:

$$N_{c,Rd} = A_{ef} \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: **2633.93** kN

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the compressed elements of a section.

Class : **4**

A_{ef} : Effective cross sectional area for class 4 sections.

A_{ef} : **95.78** cm²

f_{yd} : Steel design strength.

f_{yd} : **275.00** MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{Mo}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y : **275.00** MPa

γ_{Mo} : Partial safety factor of the material.

γ_{Mo} : **1.00**

Buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.3.1)

If the slenderness $\bar{\lambda} \leq 0.2$ or the ratio $N_{cr,Ed} / N_{cr} \leq 0.04$, the buckling effect can be ignored and only the resistance of the transverse section has to be checked.

$\bar{\lambda}$: Reduced slenderness.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}$: **0.58**

$N_{cr,Ed} / N_{cr}$: Axial force ratio.

$N_{cr,Ed} / N_{cr}$: **0.010**

Where:

A_{ef} : Effective cross sectional area for class 4 sections.

A_{ef} : **95.78** cm²

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y : **275.00** MPa

N_{cr} : Critical elastic buckling axial force, obtained from the smallest of the following values:

$N_{cr,y}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Y axis.

N_{cr} : **7770.74** kN

$N_{cr,z}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Z axis.

$N_{cr,z}$: **10933.95** kN

$N_{cr,t}$: Critical elastic buckling axial force due to torsion.

$N_{cr,t}$: **16378.29** kN

Y - Axis bending resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.5)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

η : **0.560** ✓

$$\eta = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

η : **0.651** ✓

For positive bending:

The worst case design force occurs at node N39, for load combination SW+1.5-Direcção180graus.

$M_{y,Ed}$: Worst case design bending moment.

$M_{y,Ed}$: **271.52** kN·m

For negative bending:

The worst case design force occurs at node N39, for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

$M_{z,Ed}$: Worst case design bending moment.

$M_{z,Ed}$: **393.41** kN·m

The design bending moment resistance $M_{y,Rd}$ is given by:

$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the flat elements of a section submitted to simple bending.

Class : **3**

$W_{pl,y}$: Elastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 3 sections.

$W_{pl,y}$: **2556.30** cm³

f_{yd} : Steel design strength.

f_{yd} : **275.00** MPa

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y : **275.00** MPa

γ_{Mo} : Partial safety factor of the material.

γ_{Mo} : **1.00**

Lateral buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.3.2)

The design bending moment resistance $M_{b,Rd}$ is given by:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

Where:

$W_{pl,y}$: Elastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 3 sections.

$W_{pl,y}$: **2556.30** cm³

f_{yd} : Steel design strength.

f_{yd} : **275.00** MPa

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Table 3.1)

f_y : **275.00** MPa

γ_{M1} : Partial safety factor of the material.

γ_{M1} : **1.00**

χ_{LT} : Reduction factor due to lateral buckling.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^{-2}}} \leq 1$$

χ_{LT} : **0.86**

Where:

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Φ_{LT} : **0.65**

α_{LT} : Elastic imperfection coefficient.

α_{LT} : **0.76**

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}_{LT}$: **0.39**

M_{cr} : Critical elastic lateral buckling moment.

M_{cr} : **4681.85** kN·m

The critical elastic lateral buckling moment 'M_{cr}' is established in the following way:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[\left(\frac{k_x}{k_y} \right)^2 \cdot \frac{I_w + \frac{L^2}{4} \cdot G \cdot I_T}{I_z} + (C_2 \cdot z_0 - C_3 \cdot z_1)^2 \right] - (C_2 \cdot z_0 - C_3 \cdot z_1)$$

Where:

I_z : Moment of inertia of the gross section, with respect to the Z-axis.

I_z : **1436.24** cm⁴

I_w : Uniform torsional moment of inertia.

I_w : **109.33** cm⁴

L : Section warping constant.

L : **14661.14.12** cm⁶

E : Modulus of Elasticity.

E : **210000** MPa

G : Elastic modulus of steel.

G : **81000** MPa

L_z^* : Effective buckling length of the top flange.

L_z^* : **1.650** m

L_z^* : Effective buckling length of the bottom flange.

L_z^* : **1.650** m

C_1 : Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

C_1 : **1.29**

C_2 : Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

C_2 : **1.00**

- C_s**: Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.
k_r: Effective length coefficient, which depends on the rotation restrictions at the ends of the bar.
k_w: Effective length coefficient, which depends on the warping restrictions at the ends of the bar.
z₀: Distance between the application point of the load and the shear centre, with respect to the Z-axis.

$$z_0 = z_y - z_x$$

Where:

- z_x**: Distance in the direction of the Z axis between the load application point and the geometric centre.
z_y: Distance in the direction of the Z-axis between the shear centre and the geometric centre.
z_i: Asymmetric parameter of the section, with respect to the Y-axis.

$$z_i = z_x - 0.5 \cdot \int (y^2 + z^2) \cdot (z/L_x) \cdot dA$$

Z - Axis bending resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.5)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

For positive bending:

The worst case design force occurs at node N39, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

$$M_{Ed}^+ : \text{Worst case design bending moment.}$$

For negative bending:

The worst case design force occurs at node N39, for load combination SW+1.5·Direcção09raus..

$$M_{Ed}^- : \text{Worst case design bending moment.}$$

The design bending moment resistance **M_{c,Rd}** is given by:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_{yd}$$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the flat elements of a section submitted to simple bending.

W_{pl,z}: Plastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 1 and 2 sections.

f_{yd}: Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

Resistance to shear in the Z direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$$

- C_s**: 1.00
k_r: 1.00
k_w: 1.00
z₀: 0.00 mm

- z_x**: 0.00 mm
z_y: 0.00 mm
z_i: 0.00 mm

$$\eta : 0.012$$

$$M_{Ed}^+ : 0.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Ed}^- : 0.85 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{c,Rd} : 76.64 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{Class} : 1$$

$$W_{pl,z} : 278.69 \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : 275.00 \text{ MPa}$$

$$f_y : 275.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} : 1.00$$

$$\eta : 0.089$$

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$$

The worst case design force occurs at node N39, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

V_{Ed}: Worst case design shear force.

The shear resistance **V_{c,Rd}** is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{ctd}}{\sqrt{3}}$$

Where:

- A_v**: Transverse shear area.
A_v = d · t_w

Where:

- d**: Height of the web.
t_w: Web thickness.
f_{ctd}: Steel design strength.
f_{ctd} = f_{ct} / γ_{MC0}

Where:

- f_y**: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)
γ_{MC0}: Partial safety factor of the material.

Shear buckling of the web: (Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2006, Article 5)
 No transverse stiffeners have been used, therefore the buckling resistance of the web does not need to be checked, as the following is not complied with:

$$d < \frac{72 \cdot \epsilon}{t_w \cdot \eta}$$

Where:

- λ_w**: Slenderness of the web.
 $\lambda_w = \frac{d}{t_w}$
λ_{max}: Maximum slenderness.
 $\lambda_{max} = \frac{72 \cdot \epsilon}{\eta}$

η: Coefficient which allows to consider the additional resistance in plastic regime because of hardening due to deformed material.

ε: Reduction factor.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Where:

- f_{ref}**: Reference elastic limit.
f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

The resisted shear force of the web due to shear buckling **V_{b,Rd}**, is given by:

$$V_{b,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_y \cdot d \cdot t_w}{\sqrt{3 \cdot \gamma_{M1}}} \leq \frac{\eta \cdot f_y \cdot d \cdot t_w}{\sqrt{3 \cdot \gamma_{M1}}}$$

Where:

χ_w: Contribution factor of the web to buckling resistance:
 $\chi_w \geq 0.83 / \eta \rightarrow \chi_w = 0.83 / \lambda_w$

Where:

η: Conversion factor.

$$\eta : 0.104$$

$$V_{Ed} : 70.19 \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} : 784.97 \text{ kN}$$

$$A_v : 49.44 \text{ cm}^2$$

$$d : 618.00 \text{ mm}$$

$$t_w : 8.00 \text{ mm}$$

$$f_{yd} : 275.00 \text{ MPa}$$

$$f_y : 275.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{MC0} : 1.00$$

$$77.25 < 55.46$$

$$\lambda_w : 77.25$$

$$\lambda_{max} : 55.46$$

$$\eta : 1.20$$

$$\epsilon : 0.92$$

$$f_{ref} : 235.00 \text{ MPa}$$

$$f_y : 275.00 \text{ MPa}$$

$$V_{b,Rd} : 673.61 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd,max} : 941.96 \text{ kN}$$

$$\chi_w : 0.86$$

$$\eta : 1.20$$

$\bar{\lambda}_{sw}$: Modified slenderness, when there are only transverse stiffeners at the supports.

$$\bar{\lambda}_{sw} = \frac{d/t_w}{86.4 \cdot \varepsilon}$$

ε : Reduction factor.

d : Height of the web.

t_w : Web thickness.

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M1} : Partial safety factor of the material.

$$\bar{\lambda}_{sw} : \underline{0.97}$$

$$\varepsilon : \underline{0.92}$$

$$d : \underline{618.00} \text{ mm}$$

$$t_w : \underline{8.00} \text{ mm}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.00}$$

Resistance to shear in the Y direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

The shear resistance $V_{c,Rd}$ is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{td}}{\sqrt{3}}$$

Where:

A_v : Transverse shear area.

$$A_v = A - d \cdot t_w$$

Where:

A : Area of the gross section.

d : Height of the web.

t_w : Web thickness.

f_{td} : Steel design strength.

$$f_{td} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0} : Partial safety factor of the material.

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} : \underline{1.00}$$

$$V_{c,Rd} \leq \underline{70.19} \text{ kN}$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$V_{c,Rd}$: Design resistant shear force.

$$V_{Ed} : \underline{70.19} \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{784.97} \text{ kN}$$

Combined bending moment Z and shear force Y resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.8)

It is not necessary to reduce the design bending resistance, as the worst case shear force V_{Ed} is not greater than 50% of the design shear resistance $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2} \quad \checkmark$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$V_{c,Rd}$: Design resistant shear force.

$$V_{Ed} : \underline{0.06} \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{1066.94} \text{ kN}$$

Combined bending and axial resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.9)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed} + M_{y,Ed} + M_{z,Ed}}{N_{pl,Rd} + M_{pl,Rd,y} + M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + K_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + K_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + K_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + K_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

The worst case design forces occur at node N39, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

Where:

$N_{c,Ed}$: Worst case design compressive axial force.

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Worst case bending moments, in accordance with the Y and Z axes, respectively.

Class: Section class, according to its deformation capacity and plastic resistance development of its flat elements, for axial load and simple bending.

$N_{pl,Rd}$: Compressive resistance of the gross section.

$M_{pl,Rd,y}$, $M_{pl,Rd,z}$: Bending resistance of the gross section in elastic conditions, with respect to the Y and Z, respectively.

Buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.3.3)

A : Area of the gross section.

$W_{pl,y}$, $W_{pl,z}$: Elastic resistant modules corresponding to the compressed fibre, about the Y and Z axes, respectively.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M1} : Partial safety factor of the material.

K_{yy} , K_{yz} , K_{zy} , K_{zz} : Interaction coefficients.

$$K_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{H_y}{1 - N_{Ed}/N_{cr,y}}$$

Produced by an educational version of CYPE

Combined bending, axial and shear resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.10)

It is not necessary to reduce the design bending and axial force resistance, as the buckling effect can be ignored due to shear. Additionally, the worst case design shear force V_{Ed} is less than or equal to 50% of the design shear resistance $V_{c,Rd}$.

The worst case design forces occur for load combination SW+1.5·Direcção180graus.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$64.57 \text{ kN} \leq 392.48 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Where:

$V_{Ed,z}$: Worst case design shear force.

$$V_{Ed,z} : 64.57 \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Design resistant shear force.

$$V_{c,Rd,z} : 784.96 \text{ kN}$$

Torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{T,Ed}}{M_{T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta < 0.001 \quad \checkmark$$

The worst case design force occurs at node N215, for load combination SW+1.5·Direcção180graus.

$M_{T,Rd}$: Worst case design torsional moment.

$$M_{T,Rd} : 0.00 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

The design torsional moment resistance $M_{T,Rd}$ is given by:

$$M_{T,Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot W_T \cdot f_{yd}$$

Where:

W_T : Torsion resistance module.

$$W_T : 51.17 \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} : 275.00 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y : Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

$$f_y : 275.00 \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Partial safety factor of the material.

$$\gamma_{M0} : 1.00$$

Produced by an educational version of CYPE

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$k_{yz} : 1.01$$

$$k_{xy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$k_{xy} : 1.01$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$k_{zz} : 1.01$$

$\mu_x, \mu_y, \mu_z, a_{LT}$: Auxiliary terms:

$$\mu_x = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$\mu_x : 1.00$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$\mu_z : 1.00$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_y}{I_x} \geq 0$$

$$a_{LT} : 1.00$$

Given that:

$$\bar{\lambda}_{y0} > 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$$

$$0.44 > 0.23$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + \left(1 - C_{m,y,0}\right) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}$$

$$C_{m,y} : 1.00$$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0}$$

$$C_{m,z} : 1.00$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}}$$

$$C_{m,LT} : 1.00$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{e1,y}}$$

$$\varepsilon_y : 24.27$$

$C_{m,y,0}, C_{m,z,0}$: Equivalent uniform bending moment factors.

$$C_{m,y,0} : 1.00$$

$$C_{m,z,0} : 1.00$$

$$C_1 : 1.29$$

C_1 : Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

χ_{cr}, χ_x : Buckling reduction coefficients, about the Y and Z axes, respectively.

$$\chi_{cr} : 1.00$$

$$\chi_x : 1.00$$

χ_{LT} : Lateral buckling reduction coefficient.

$\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$: Reduced slendernesses with respect to the Y and Z axes, respectively.

$$\bar{\lambda}_y : 0.86$$

$$\bar{\lambda}_z : 0.64$$

$$\bar{\lambda}_x : 0.54$$

$$\bar{\lambda}_{LT} : 0.39$$

$$\bar{\lambda}_0 : 0.44$$

$\bar{\lambda}_{LT}$: Reduced slenderness, with respect to lateral buckling, for a uniform bending moment.

$N_{cr,y}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Y axis.

$$N_{cr,y} : 7770.74 \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Critical elastic buckling axial force with respect to the Z axis.

$$N_{cr,z} : 10933.95 \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Critical elastic buckling axial force due to torsion.

$$N_{cr,T} : 16378.29 \text{ kN}$$

I_y : Moment of inertia of the gross section, with respect to the Y-axis.

$$I_y : 84357.89 \text{ cm}^4$$

I_x : Uniform torsional moment of inertia.

$$I_x : 109.33 \text{ cm}^4$$

Produced by an educational version of CYPE

Combined Z shear and torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.044} \checkmark$$

The worst case design forces occur at node N215, for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE.+0.9·Direcção90grausposiçãoextremo.

V_{Ed}: Worst case design shear force.

$$V_{Ed} : \underline{28.39} \text{ kN}$$

M_{T,Ed}: Worst case design torsional moment.

$$M_{T,Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

The reduced design resistant shear force **V_{pl,T,Rd}** is given by:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{1.25 \cdot f_{yd} / \sqrt{3}} \cdot V_{pl,Rd}}$$

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{645.24} \text{ kN}$$

Where:

V_{pl,Rd}: Design resistant shear force.

$$V_{pl,Rd} : \underline{645.25} \text{ kN}$$

τ_{T,Ed}: Tangential stresses due to torsion.

$$\tau_{T,Ed} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Where:

W_t: Torsion resistance module.

$$W_t : \underline{51.17} \text{ cm}^3$$

f_{yd}: Steel design strength.

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.00}$$

Combined Y shear and torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta < \underline{0.001} \checkmark$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE.+0.9·Direcção90grausposiçãoextremo.

V_{Ed}: Worst case design shear force.

$$V_{Ed} : \underline{0.04} \text{ kN}$$

M_{T,Ed}: Worst case design torsional moment.

$$M_{T,Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

The reduced design resistant shear force **V_{pl,T,Rd}** is given by:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{1.25 \cdot f_{yd} / \sqrt{3}} \cdot V_{pl,Rd}}$$

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{1066.94} \text{ kN}$$

Where:

V_{pl,Rd}: Design resistant shear force.

$$V_{pl,Rd} : \underline{1066.94} \text{ kN}$$

τ_{T,Ed}: Tangential stresses due to torsion.

$$\tau_{T,Ed} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Where:

W_t: Torsion resistance module.

$$W_t : \underline{52.06} \text{ cm}^3$$

f_{yd}: Steel design strength.

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.00}$$

Verificação aos ELU da Viga B₂

Verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4, de acordo com a secção 5.7 deste documento.

- F.1** Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.
- F.2** Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.
- F.3** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.
- F.4** Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.

Verificação aos ELU da Viga B₂

Verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4, de acordo com a secção 5.7 deste documento.

Anexo F.1

Interfaces da ferramenta *AciariUM* utilizada para verificação de segurança aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.

AcianUM INTERFACE I. SECÇÃO TRANSVERSAL E PROPRIEDADES DO MATERIAL MÓDULO DE CÁLCULO: ROBOT

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				e						
PE 330	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _w x 10 ⁻²	e
f _y [MPa]	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,61	165	80	307	271	0	0	11767	713,1	713,1	804,3	13,71	30,81	788	98,51	98,51	153,7	3,548	39,58	28,15	199,1	0,92

MÓDULO MANUAL DEFINIÇÃO MANUAL DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES			
h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i		
IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271	0,00	0,00

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER PROPRIEDADES DA SECÇÃO TRANSVERSAL A PARTIR DO ROBOT SA

ELEMENTO	SEÇÃO	TIPO DE PERFIL	DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
NO.	L	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i		
15	1,67	IPE 330	Perfil Laminado	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,6	165,0	80,0	307	271,0	0,00	0,00

TIPO DE PERFIL Laminado

CORDÕES DE SOLDADURA:
NÃO EXISTEM CORDÕES DE SOLDADURA.

CLASSE DE AÇO CONSTITUINTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL	AÇO DA CLASSE	S275	PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL	E	210	GPa	α	1,20E-06	/ K	Redefinir <small>NP EN 1993-1-1</small>	COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA	γ _{M0}	1,00	Redefinir <small>NP EN 1993-1-1</small>	
	f _y	275		MPa	G	80,77	GPa	G _m	7850			Kg/m ³	γ _{M1}		1,00
	f _u	430		MPa	v	0,3		η	1,20				γ _{M2}		1,25

João M. M. Eira
 Prof. Doutor Vitor
 Eng.º Miguel Pires

Universidade do Minho
 Escola de Engenharia

GRUPO CASAI

Figura F.1 – Interface I. Secção transversal e propriedades do material: Viga B₂ do Pórtico 4.

AcariUM INTERFACE II. CONDIÇÕES DE APOIO, TRAVAMENTO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL MÓDULO DE CÁLCULO: ROBOT

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z											
IPE	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	cs _s	cs _i	I _y	W _{pl,y0}	W _{pl,y1}	W _{pl,y2}	I _y	A _{cc}	I _z	W _{pl,z0}	W _{pl,z1}	W _{pl,z2}	I _z	A _{vy}	I _t	I _v × 10 ³	ε
f _y [MPa]	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	
330	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,61	165	80	307	271	0	0	11767	713,1	713,1	804,3	13,71	30,81	788	98,51	98,51	153,7	3,548	39,58	28,15	199,1	0,92

MÓDULO MANUAL INTRODUÇÃO MANUAL DO VALOR DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS ATUANTES NA SECÇÃO A VERIFICAR E DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS QUE CARACTERIZAM O SISTEMA ESTRUTURAL INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

MÓDULO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS RECEBER VALORES DIRETAMENTE DE UM FICHEIRO DO AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS ABERTO NESTE COMPUTADOR INFO ? OCULTAR / MOSTRAR


IDENTIFICAÇÃO DA SECÇÃO A VERIFICAR BARRA NO. 15 CASO CARGA NO. 10 COMB 2 POSIÇÃO SECÇÃO 1,0 x L = 1,65 m NOME SECÇÃO IPE330 L [EL.BARRA] 1,65 m

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 69,92 kN M_{Ed,y} -115,06 kN.m V_{Ed,z} -44,10 kN M_{Ed,z} 0,05 kN.m V_{Ed,y} 0,01 kN.m FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO COMPRIMENTO L 10,00 m COMPRIMENTOS DE ENCURVADURA L_{cr,y} 15,00 m L_{cr,z} 1,65 m COMPRIMENTOS ENTRE SECÇÕES CONTRAVENTADAS l_{sup} 1,65 m l_{inf} 1,65 m

MÓDULO AUTOMÁTICO MODELAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO E SOLICITAÇÃO DO ELEMENTO ESTRUTURAL PARA CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS PARÂMETROS CORRESPONDENTES PELA FERRAMENTA INFO ? OCULTAR / MOSTRAR

João M. M. Eira
 Prof. Doutor Valente
 Eng. Miguel Pires

 Universidade do Minho
 Escola de Engenharia


 GRUPO CASAIS

Figura F.2 – Interface II. Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural: Viga B₂ do Pórtico 4.

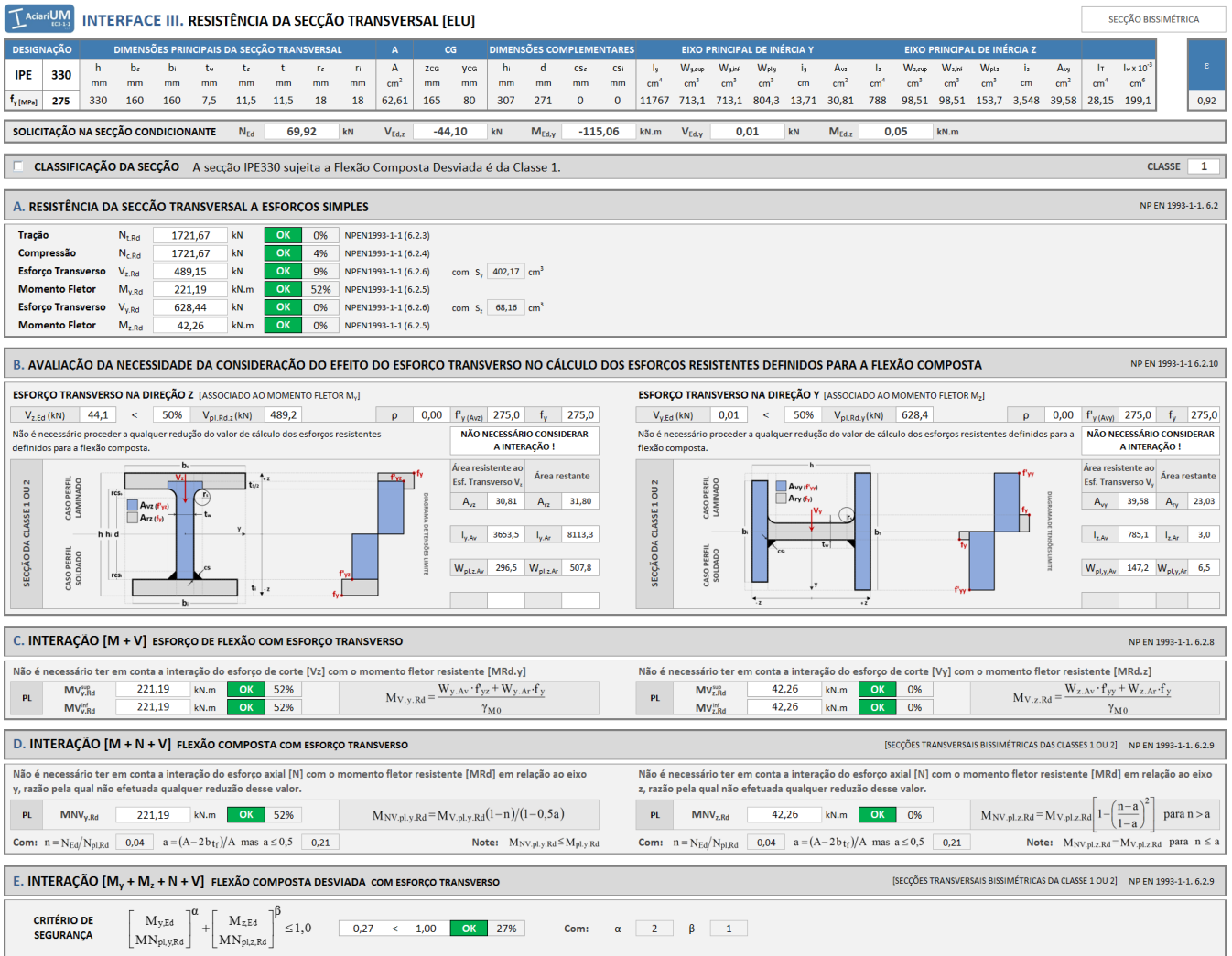


Figura F.3 – Interface III. Resistência da seção transversal (ELU): Viga B₂ do Pórtico 4.

AcariUM INTERFACE IV. FENÓMENOS DE ENCURVADURA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	OG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε							
YPE	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	Z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{st}	I _z	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{st}	I _z	A _{ve}	I _t	I _w × 10 ³	ε
330	330	160	160	8	12	12	18	18	62,61	165	80	307	271	0	0	11767	713,1	713,1	804,3	13,71	30,81	788	98,51	98,51	153,7	3,548	39,58	28,15	199,1	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE N_{Ed} 69,92 kN V_{Ed,z} -44,10 kN M_{Ed,y} -115,06 kN.m V_{Ed,y} 0,01 kN M_{Ed,z} 0,05 kN.m CLASSE 1

A. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,y,Rd} 849,07 kN OK 8,2% L_{cr,y} 15,00 λ_y 1,26 α_y 0,21 φ_y 1,41 χ_y 0,49

B. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N_{b,z,Rd} 1494,50 kN OK 4,7% L_{cr,z} 1,65 λ_z 0,54 α_z 0,34 φ_z 0,70 χ_z 0,87

C. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL [BAMBEAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.2

DETERMINAÇÃO DO VALOR DO MOMENTO CRÍTICO (M_{cr}) PARA A ENCURVADURA LATERAL - PROPOSTA DE CLARK AND HILL (1960) E GALÉA (1981):

CÁLCULO AUTOMÁTICO DO VALOR DE M_{cr} $M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_y l)^2} \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 I_w + (k_y l)^2 G I_T + (C_2 z_g - C_3 z_i)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_i) = 395,22 \text{ kN.m}$

DEFINIÇÃO MANUAL DO VALOR DE M_{cr}

VALORES PROPOSTOS M_{cr} 395,2 kN.m M_{cr} 1023 kN.m

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS C₁ 1,29 C₂ 1,56 C₃ 0,75

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO BANZO COMPRIMIDO: INFERIOR FATORES COMPRIMENTO EFETIVO k_y 1,00 k_w 1,00 COMPRIMENTO ENTRE SECÇÕES LATERALM. CONTRAVENTADAS I (m) 1,65

POSICIÓN DA CARGA NA SECÇÃO z_g 0,165 em metros

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO β 0,5 h_g 318,5 mm BANZO COMPRIMIDO: INFERIOR I_{cr} 392,5 cm⁴ BANZO TRACIONADO: SUPERIOR I_{tr} 392,5 cm⁴

DETERMINAÇÃO DO VALOR DE CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE À ENCURVADURA LATERAL: M_{b,y,Rd} 167,19 kN.m OK 69% M_{cr} 395,2 kN.m M_{cr} 1023 kN.m λ_{LT} 0,75 α_{LT} 0,34 φ_{LT} 0,87 χ_{LT} 0,76

D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO] NP EN 1993-1-1. Anexo A

ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (ELU) V_{pl,Rd} 489,15 kN OK NPEN1993-1-1 (6.2.6) com S 402,165 cm³

ALMA NÃO REFORÇADA h_w/t_w 40,93 < 72/η ε 55,46 Não há necessidade de existirem reforços transversais!

REFORÇOS TRANSVERSAIS EXTREMIDADE Não RÍGIDOS INTERMÉDIOS Não a_w (m) - L (m) 10,00 OTIMIZAR REFORÇOS TRANSVERSAIS

REFORÇOS LONGITUDINAIS Não Arredondamento a múltiplos de 5cm.

ALMA REFORÇADA h_w/t_w 40,93 < 31/η ε √k_t - Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transversal! kt - kt_z 0 a/h_i -

VERIFICAÇÃO DA CHAPA EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

V_{b,Rd} [kN] - = V_{b1,Rd} - + V_{b2,Rd} -

DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS

SECCÃO TOTAL	TRACIONADO	COMPRESSO	BANZO SUPERIOR	BANZO INFERIOR	b (mm)	t (mm)	c	ψ	κ _σ	λ _p	ρ	C _{eff} (mm)	b _{eff} (mm)
62,606					160	11,5	58,25	1,00	0,43	0,294	≤ 0,748	1,000	58,25
165					160	11,5	58,25	1,00	0,43	0,294	≤ 0,748	1,000	58,25

SECCÃO EFETIVA constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos. A_{eff} (cm²) 36,80 z_{cg} (mm) 165,00 M_{b,Rd} 155,61 M_{pl,Rd} 144,86 W_{eff} 565,86 b_y 160 t_y 11,5 c -

NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO

O método de cálculo do valor de V_{b,Rd} é válido se existirem reforços transversais pelo menos nos apoios.

RESTRICÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.

João M. M. Eim Prof. Isabel Valente Eng. Miguel Pires Universidade do Minho Escola de Engenharia CASAIS

Figura F.4 – Interface IV. Fenómenos de Encurvadura: Viga B₂ do Pórtico 4.

Académico INTERFACE V. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS EM FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				ε						
IPÉ	h	b _s	b _i	t _v	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{ca}	y _{ca}	h _i	d	c _s	c _i	I _y	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,y}	I _y	A _{ve}	I _z	W _{sup}	W _{inf}	W _{pl,z}	I _z	A _{vy}	I _t	I _w × 10 ⁻⁸	ε
f _y [MPa]	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	
330	330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,61	165	80	307	271	0	0	11767	713,1	713,1	804,3	13,71	30,81	788	98,51	98,51	153,7	3,548	39,58	28,15	199,1	0,92

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE		N _{Ed}	69,92	kN	V _{Ed,z}	-44,10	kN	M _{Ed,y}	-115,06	kN.m	V _{Ed,y}	0,01	kN	M _{Ed,z}	0,05	kN.m	CLASSE	1
-------------------------------------	--	-----------------	-------	----	-------------------	--------	----	-------------------	---------	------	-------------------	------	----	-------------------	------	------	--------	---

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO ALTERNATIVO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A																	NP EN 1993-1-1, Anexo A							
PARÂMETROS ENCURVADURA		l _{cr,y}	15,00	l _{cr,z}	1,65	L	10,00	λ _y	1,26	λ _z	0,54	λ _{1T}	0,748	χ _y	0,49	χ _z	0,87	χ _{1T}	0,76					
ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS		N _{cr,y}	1084	kN	N _{cr,z}	5999	kN	N _{cr,T}	8692	kN	FATORES		u _y	0,97	u _z	1,00	w _y	1,13	w _z	1,50	η _{pl}	0,04	λ _{max}	1,26

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE		M ^e _{CR} 1023 kN.m C1 1,29 λ ₀ 0,47 > 0,2√C _{1T} √(1 - N _{Ed} /N _{cr,z})(1 - N _{Ed} /N _{cr,T}) ⇒										C _{my}	1,00	<	C _{my,0}	1,00
<input type="checkbox"/> CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS VALORES DE C _{my,0} e C _{mz,0} <input checked="" type="checkbox"/> CÁLCULO MANUAL DOS VALORES DE C _{my,0} e C _{mz,0}		C _{mz}	1,00	<	C _{mz,0}	1,00										
		C _{m1T}	1,01													

FATORES		a _{1T}	1,00	b _{1T}	0,00	c _{1T}	0,29	d _{1T}	0,00	e _{1T}	2,98	FATORES		C _{yy}	0,99	C _{yz}	0,84	C _{zy}	0,95	C _{zz}	0,92
---------	--	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	---------	--	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

FATORES DE INTERAÇÃO		k _{yy}	1,05	k _{yz}	0,81	k _{zy}	0,59	k _{zz}	1,10
----------------------	--	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------	-----------------	------

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61		$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + K_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{1T} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + K_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}}$	=	0,81	<	1,0	OK	81%
CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.62		$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + K_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{1T} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + K_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}}$	=	0,45	<	1,0	OK	45%

Figura F.5 – Interface V. Análise de estabilidade global de elementos em flexão composta com compressão: Viga B₂ do Pórtico 4.

Verificação aos ELU da Viga B₂

Verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4, de acordo com a secção 5.7 deste documento.

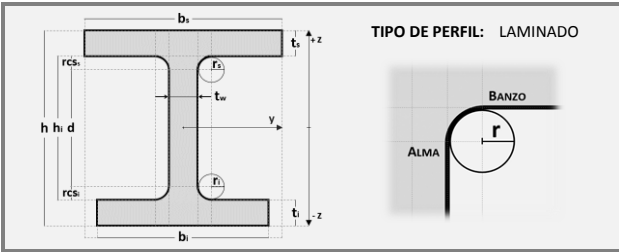
Anexo F.2

Relatório de cálculo exportado a partir da ferramenta *AciariUM* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.

O ELEMENTO SUJEITO A FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA E CONSTITUIDO PELO PERFIL TRANSVERSAL IPE 330 S275 (SECÇÃO DA CLASSE 1)
VERIFICA TODAS AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA.

OK 81%

DESIGNAÇÃO		DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL								A	CG		DIMENSÕES COMPLEMENTARES				PROPRIEDADES		
IPE	330	h	b _s	b _i	t _w	t _s	t _i	r _s	r _i	A	z _{CG}	y _{CG}	h _i	d	c _s	c _i	E	v	η
f _y [MPa]	275	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	GPa	-	-
		330	160	160	7,5	11,5	11,5	18	18	62,606	165	80	307	271	0	0	210	0,3	1,2



EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y						EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					
I _y	W _{y,sup}	W _{y,inf}	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{z,sup}	W _{z,inf}	W _{pl,z}	i _z	A _{vy}
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm ³	cm	cm ²
11767	713,14	713,14	804,33	13,709	30,809	788,05	98,506	98,506	153,68	3,5479	39,581

PROPRIEDADES	
E	v
GPa	-
210	0,3

CLASSE DE RESISTÊNCIA	
AÇO DA CLASSE	S275
f _y	235 MPa
f _u	360 MPa
COEFICIENTES	
γ _{M0}	1,00
γ _{M1}	1,00
γ _{M2}	1,25

SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO	N _{Ed}	69,92	kN	M _{Ed,y}	-115,06	kN	V _{Ed,z}	-44,10	kN.m	M _{Ed,z}	0,05	kN	V _{Ed,y}	0,01	kN.m
------------------------------	-----------------	-------	----	-------------------	---------	----	-------------------	--------	------	-------------------	------	----	-------------------	------	------

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção IPE 330 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. **CLASSE 1**

III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL AOS ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)

SECÇÃO BISSIMÉTRICA

RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES										NP EN 1993-1-1. 6.2
Tração	N _{t,Rd}	1721,67	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.3)				
Compressão	N _{c,Rd}	1721,67	kN	OK	4%	NPEN1993-1-1 (6.2.4)				
Esforço Transverso	V _{z,Rd}	489,15	kN	OK	9%	NPEN1993-1-1 (6.2.6)	com S _y	402,17	cm ³	
Momento Fletor	M _{y,Rd}	221,19	kN.m	OK	52%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)				
Esforço Transverso	V _{y,Rd}	628,44	kN	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.6)	com S _z	68,16	cm ³	
Momento Fletor	M _{z,Rd}	42,26	kN.m	OK	0%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)				

AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DO ESFORÇO TRANSVERSO NO CÁLCULO DOS ESFORÇOS RESISTENTES DEFINIDOS PARA A FLEXÃO COMPOSTA

NP EN 1993-1-1 6.2.10

ESFORÇO TRANSVERSO EM Z-Z [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _y]					ESFORÇO TRANSVERSO EM Y-Y [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR M _z]																
V _{Ed,z} (kN)	44,1	<	50% V _{pl,z,Rd} (kN)	489	ρ	0,00	f _{y(Avz)}	275	f _y	275	V _{Ed,y} (kN)	0,01	<	50% V _{pl,y,Rd} (kN)	628	ρ	0,00	f _{y(Avy)}	275	f _y	275
Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.										Não é necessário proceder a qualquer redução do valor de cálculo dos esforços resistentes definidos para a flexão composta.											
Área resistente ao Esf. Transv. Vz A _{vz} 30,8087 A _{rz} 31,7975 I _{z,Av} 3653,47 I _{z,Ar} 8113,34 W _{pl,vz} 296,517 W _{pl,sz} 507,813					Área resistente ao Esf. Transv. Vy A _{vy} 39,5812 A _{ry} 23,025 I _{z,Av} 785,067 I _{z,Ar} 2,97863 W _{pl,vy} 147,2 W _{pl,sy} 6,47838																

INTERAÇÃO [M + V] ESFORÇO DE FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS DAS CLASSES 1, 2, 3 OU 4] NP EN 1993-1-1. 6.2.8

Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V _z] com o momento fletor resistente [MR _{d,y}]					Não é necessário ter em conta a interação do esforço de corte [V _y] com o momento fletor resistente [MR _{d,z}]								
PLÁSTICO	M _{V,y,Rd} ^{sup}	221,19	kN.m	OK	52%	M _{V,y,Rd} = $\frac{W_{y,Av} \cdot f_{yz} + W_{y,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	PLÁSTICO	M _{V,z,Rd} ^{sup}	42,26	kN.m	OK	0%	M _{V,z,Rd} = $\frac{W_{z,Av} \cdot f_{yy} + W_{z,Ar} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
	M _{V,y,Rd} ^{inf}	221,19	kN.m	OK	52%			M _{V,z,Rd} ^{inf}	42,26	kN.m	OK	0%	

INTERAÇÃO [M + N + v] FLEXÃO COMPOSTA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DAS CLASSES 1 OU 2] NP EN 1993-1-1. 6.2.9

Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo y, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse valor.					Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MR _d] em relação ao eixo z, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse valor.									
PLÁSTICO	M _{NV,y,Rd}	221,19	kN.m	OK	52%	M _{NV,pl,y,Rd} = M_{V,pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5a)}}	PLÁSTICO	M _{NV,y,Rd}	42,26	kN.m	OK	0%	M _{NV,pl,z,Rd} = M_{V,pl,z,Rd} \cdot \left[1 - \frac{(n-a)^2}{(1-a)^2} \right]}	
Note: M _{NV,pl,y,Rd} ≤ M_{pl,y,Rd}}					Com: n = N _{Ed} /N _{pl,Rd} a = (A - 2b_{tf})/A mas a ≤ 0,5}					Note: M _{NV,pl,z,Rd} = M_{V,pl,z,Rd} para n ≤ a}				

INTERAÇÃO [M_y + M_z + N + v] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVERSO [SECCÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DA CLASSE 1 OU 2] NP EN 1993-1-1. 6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA	$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,pl,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,pl,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1,0$	0,27 < 1,00	OK	27%	Com: α = 2 β = 1
-----------------------	---	-------------	-----------	-----	---------------------

IV. RESISTÊNCIA DO ELEMENTO A FENÓMENOS DE ENCURVADURA

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

N _{b,y,Rd}	849,07	kN	OK	8%	L _{cr,y}	15	m	λ _y	1,26	α _y	0,21	φ _y	1,41	χ _y	0,49
---------------------	--------	----	-----------	----	-------------------	----	---	----------------	------	----------------	------	----------------	------	----------------	------

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z [VAREJAMENTO] NP EN 1993-1-1. 6.3.1.1(3)

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL [BAMBEAMENTO]

NP EN 1993-1-1. 6.3.2

MOMENTO CRÍTICO PARA A ENCURVADURA LATERAL M_{CR}:

VALOR DO MOMENTO CRÍTICO M_{CR} CALCULADO AUTOMÁTICAMENTE PELA FERRAMENTA:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\frac{k_z}{k_w} \right]^2 I_w + (k_z l)^2 G I_T + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right\}^{0,5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) = 395,22 \text{ kN.m} \quad M_{CR,E} = 1022,60 \text{ kN.m}$$

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS

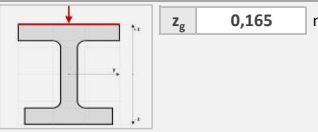


FATORES DE COMPRIM. EFETIVO

BANZO INFERIOR COMPRIMIDO

l	1,65 m
k _z	1,00
k _w	1,00

POSIÇÃO DA CARGA AO NÍVEL DA SECÇÃO



GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO

z₁ = 0,8 · (2 · β_f - 1) · h_g / 2,0 quando β_f > 0,5
 z₁ = 1,0 · (2 · β_f - 1) · h_g / 2,0 quando β_f > 0,5

β_f 0,5 h_g 318,5 mm z₁ 0 m

VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO [ENFUNAMENTO]

NP EN 1993-1-5 5

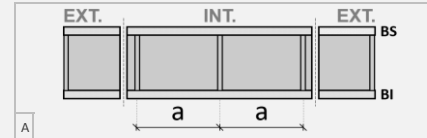
ALMA NÃO REFORÇADA:

h_w/t_w 40,933 < 72/η ε 55,465 → Não há necessidade de existirem reforços transversais!

ALMA COM REFORÇOS TRANSVERSAIS:

EXTREMIDADE Não INTERMÉDIOS Não ESPAÇAMENTO ENTRE REFORÇOS: a_w - m

h_w/t_w 40,933 < 31/η ε √k_τ - → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transv. kt - kt_{sl} 0,00



VERIFICAÇÃO DA ALMA EM RELAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO

CONTRIBUIÇÃO DA ALMA V_{b,w,Rd} - kN V_{bw,Rd} = $\frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$ com χ_w - σ_E 113,28 MPa λ_w -

CONTRIBUIÇÃO BANZOS V_{b,f,Rd} - kN V_{bf,Rd} = $\frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$ com M_{Nf,Rd} 144,86

V_{b,Rd} - kN OK

V. VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO À ESTABILIDADE GLOBAL

ENCURVADURA TENDO EM CONTA A INTERAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO E FLEXÃO MÉTODO 1 - NP EN 1993-1-1 ANEXO A

NP EN 1993-1-1. Anexo A

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME:

VALORES DOS PARÂMETROS C_{my,0} e C_{mz,0} DEFINIDOS MANUALMENTE PELO UTILIZADOR: C_{my,0} 1,00 C_{mz,0} 1,00

$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = 0,47 > 0,2 \sqrt{C_{1T}} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}} \right)} = 0,23 \Rightarrow C_{my} 0,00 C_{mz} 0,99 C_{mLT} 0,00$

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,81 < 1,0 \text{ OK } 81\%$$

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z
NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,45 < 1,0 \text{ OK } 45\%$$

ANEXO I. NOTAÇÃO:

A	área da secção transversal (cm ²)
z _{cg}	coordenada em z da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
y _{cg}	coordenada em y da posição do centro de gravidade da secção transversal (mm)
I _(i)	momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo (i) (cm ⁴)
W _{y,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
W _{y,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
W _{z,sup}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo superior (cm ³)
W _{z,inf}	módulo de flexão elástico em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou direita do banzo inferior (cm ³)
W _{pl,y}	módulo de flexão plástico da secção transversal (cm ³)
i _(i)	raio de giração da secção transversal relativo ao eixo (i) (cm)
A _{v,(i)}	área resistente aos esforço transverso V _(i) (cm ²)
I _T	constante de torção de St. Venant (cm ⁴)
I _w	constante de empenamento (cm ⁶)
E	módulo de elasticidade (GPa)
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico
η	coeficiente para calcular a área de corte
f _y	tensão de cedência (MPa)
f _u	tensão última (MPa)
γ _{M(i)}	coeficientes parciais de segurança γ _{M0} , γ _{M1} , γ _{M2}
N _{Ed}	valor de cálculo do esforço normal atuante (kN)

$M_{(i),Ed}$	valor de cálculo do momento fletor atuante, em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Ed}$	valor de cálculo do esforço transversal atuante na direção (i) (kN)
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de tração (kN)
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão (kN)
$M_{(i),Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo (i) (kN.m)
$V_{(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente na direção (i) (kN)
$A_{v,z}$	área resistente ao esforço transversal V_z (cm ²)
$A_{r,z}$	área restante relativamente à área A_{vz} ($A-A_{vz}$) (cm ²)
$A_{v,y}$	área resistente ao esforço transversal V_y (cm ²)
$A_{r,y}$	área restante relativamente à área A_{vy} ($A-A_{vy}$) (cm ²)
ρ	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos fletores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos
$f_{y(A_{v,z})}$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vz} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_z no cálculo momento fletor resistente $M_{V_y,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,z}$ (MPa)
$f_{y(A_{v,y})}$	tensão de cedência reduzida adotada na área resistente ao esforço transversal A_{vy} para tomar em consideração os efeitos da presença do esforço transversal V_y no cálculo do resistente $M_{V_z,Rd}$ - Abrevia-se em $f_{y,y}$ (MPa)
$W_{el,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{el,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo superior da secção transversal
$W_{el,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão elástico da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita do banzo inferior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal
$W_{eff,y,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{sup}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo superior da secção transversal
$W_{eff,z,A(i)}^{inf}$	módulo de flexão efetivo da área $A(i)$ em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda ou extrema direita (caso mais desfavorável) do banzo inferior da secção transversal
$M_{V_y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra superior da secção transversal (kN.m)
$M_{V_y,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{y,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_z , com relação à fibra inferior da secção transversal (kN.m)
$M_{V_z,Rd sup}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo superior (kN.m)
$M_{V_z,Rd inf}$	valor de cálculo do momento fletor resistente $M_{z,Rd}$ reduzido pela interação com o esforço transversal V_y , com relação à fibra esquerda ou direita da secção transversal (a mais desfavorável) do banzo inferior (kN.m)
$M_{NV_y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{z,Ed}$ (kN.m)
$M_{NV_z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$ reduzido pelos esforços normal N_{Ed} e transversal $V_{y,Ed}$ (kN.m)
$N_{b,(i),Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura em relação ao eixo (i) de um elemento comprimido (kN)
$L_{cr,(i)}$	comprimento de encurvadura em relação ao eixo (i) (kN)
$\lambda_{(i)}$	esbelteza normalizada associada à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\alpha_{(i)}$	fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos associado à encurvadura em relação ao eixo (i)
$\phi_{(i)}$	valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{(i)}$
$\chi_{(i)}$	coeficiente de redução para o modo de encurvadura em relação ao eixo (i)
M_{cr}	momento crítico de encurvadura lateral (kN.m)
$M_{cr,E}$	momento crítico elástico de encurvadura lateral (kN.m)
$C_{(i)}$	coeficientes C_1 , C_2 e C_3 dependentes da forma do diagrama de momentos fletores e das condições de apoio nas extremidades do tramo de comprimento l a analisar
l	comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo considerado (m)
k_z	fator de comprimento efetivo referente às restrições à rotação em torno do eixo z das secções de extremidade do tramo de comprimento l
k_w	fator de comprimento efetivo referente às restrições ao empenamento das secções de extremidade do tramo de comprimento l
z_g	coordenada em z do ponto de aplicação da carga em relação ao centro de corte da secção transversal (m)
z_j	parâmetro que traduz o grau de assimetria da secção transversal em relação ao eixo y (m)
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral (kN.m)
λ_{LT}	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
α_{LT}	fator de imperfeição para a encurvadura lateral
ϕ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
a_w	distância entre reforços transversais da alma (m)
$V_{b,w,Rd}$	valor de cálculo da contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
$V_{b,f,Rd}$	valor de cálculo da contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal (kN)
χ_w	coeficiente de redução para a encurvadura por esforço transversal
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos (kN.m)
$M_{N,f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal constituída apenas pelas áreas efetivas dos banzos, reduzido pela presença de um esforço normal N_{Ed} (kN.m)
$V_{b,Rd}$	valor de cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal
$N_{cr,y}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y (kN)
$N_{cr,z}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z (kN)
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por torção (kN)
C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
A_{eff}	área efetiva de uma secção transversal (cm ²)
$W_{y,eff,s}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra superior da secção transversal (cm ³)
$W_{y,eff,i}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo y, relativo à fibra inferior da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,DIR}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema esquerda da secção transversal (cm ³)
$W_{z,eff,ESQ}$	módulo de flexão efetivo em relação ao eixo z, relativo à fibra extrema direita da secção transversal (cm ³)
e_{Nz}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo z (mm)
ΔM_y	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Nz} (kN.m)
e_{Ny}	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetiva (A_{eff}) e bruta (A), segundo o eixo y (mm)
ΔM_z	valor de cálculo do momento adicional atuante devido ao afastamento e_{Ny} (kN.m)

Verificação aos ELU da Viga B₂

Verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4, de acordo com a secção 5.7 deste documento.

Anexo F.3

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *Robot Structural Analysis* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.

Symbol	Values	Unit	Symbol description
MEMBER: 15 ; COORDINATE: x = 1.00 L = 1.669 m			
Cross-section properties: IPE 330			
Ax	62.606	cm2	Cross-section area
Ay	42.281	cm2	Shear area - y-axis
Az	30.809	cm2	Shear area - z-axis
x	25.700	cm4	Torsional constant
y	11766.900	cm4	Moment of inertia of a section about the y-axis
z	788.143	cm4	Moment of inertia of a section about the z-axis
Wply	804.399	cm3	Plastic section modulus about the y (major) axis
Wplz	153.683	cm3	Plastic section modulus about the z (minor) axis
h	33.000	cm	Height of cross-section
b	16.000	cm	Width of cross-section
f	1.150	cm	Flange thickness
w	0.750	cm	Web thickness
y	13.710	cm	Radius of gyration - y-axis
z	3.548	cm	Radius of gyration - z-axis
Anb	1.00		Net area to gross area ratio
Eta	1.20		Factor for Av calculation
Material:			
Name	S 275 (S275)		
fy	275.0000	MPa	Design yield strength of material
fu	430.0000	MPa	Design ultimate stress - characteristic value
gM0	1.00		Partial safety factor
gM1	1.00		Partial safety factor
gM2	1.25		Partial safety factor
Designations of additional codes:			
EN112			EN 1991-1-2:2003 - Fire loads on a structure
EN312			EN 1993-1-2:2005 - Steel structures - fire design
EN313			EN 1993-1-3:2005 - Steel structures from cold-formed sections
EN315			EN 1993-1-5:2005 - Steel structures - plated elements
EC111			ECCS No11:2001 - Guidebook with recommendations for design
ENV311			ENV 1993-1-1:1992 - Steel structures - general code
Class of section			
cf	5.825	cm	flange width
f	1.150	cm	flange thickness
cf/f	5.07		Flange slenderness
KLF	1		Flange class
cw	27.100	cm	Web height
w	0.750	cm	Web thickness
cw/tw	36.13		Web slenderness
alfa	0.56		Relative extent of the compressed plastic zone
psi	-0.92		Stress or strain ratio

Symbol	Values	Unit	Symbol description
KLW	1		Web class
(hw/tw)/lim	55.46		limit slenderness of a web for shear
hw/tw	40.93		web slenderness for shear
KLsz	Plastic		Web class (shear)
KL	1		Section type
Parameters of buckling analysis:			
About the y axis of cross-section			
Curve,y	a		Buckling curve
Lcr,y	15.000	m	Effective buckling length
Lam,y	109.41		Slenderness ratio
Lam_y	1.26		Non-dimensional slend. ratio for buckling
alfa,y	0.21		imperfection factor
fi,y	1.41		Coefficient for calculation of X
Xy	0.49		Reduction factor for buckling
Ny,b,Rd	849,0770	kN	Design buckling resistance of comp. member
About the z axis of cross-section			
Curve,z	b		Buckling curve
Lcr,z	1.650	m	Effective buckling length
Lam,z	46.50		Slenderness ratio
Lam_z	0.54		Non-dimensional slend. ratio for buckling
alfa,z	0.34		imperfection factor
fi,z	0.70		Coefficient for calculation of X
Xz	0.87		Reduction factor for buckling
Nz,b,Rd	1494,5255	kN	Design buckling resistance of comp. member
Parameters of lateral-torsional buckling analysis:			
General method [6.3.2.2]			
Lcr,upp	1.650	m	Lateral buckling length of upper flange
Lcr,low	1.650	m	Lateral buckling length of lower flange
C1	1.28		Factor for Mcr calculations
C2	1.56		Factor for Mcr calculations
C3	0.75		Factor for Mcr calculations
w	199877,498	cm6	Warping constant
zg	16.500	cm	Distance from the point where the load is applied to the centroid
Mcr	392,3627	kN*m	Critical moment for lateral-torsional buckling
Lam_LT	0.75		Non-dimens. slend. ratio for lat.-tors. buckling
Curve,LT	b		Lateral buckling curve
alfa,LT	0.34		Imperfection factor for lateral buckling curves
fi,LT	0.88		Coefficient for calculation of XLT
XLT	0.75		Reduction factor for lateral-torsional buckling
Parameters of global stability analysis of member			
Method of interaction parameter calculations - Annex A			
Ncr,y	1083,9234	kN	Euler buckling load in y direction
Ncr,z	6000,0680	kN	Euler buckling load in z direction
Ncr,T	8622,8609	kN	Critical force (lateral-torsional buckling)

Symbol	Values	Unit	Symbol description
My	0.97		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
Mz	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
wz	1.13		Coefficient related to ratio of section properties
Lam_0	0.47		Relative slenderness for lateral buckling (constant ratio)
Cmy_0	0.94		Parameter related to bending moment distribution
Cmz_0	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmy	0.99		Parameter related to bending moment distribution
Cmz	1.00		Parameter related to bending moment distribution
Cmy_0LT	0.99		Parameter related to bending moment distribution
CmyLT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
CmLT	1.00		Parameter related to bending moment distribution
alphaLT	1.00		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaY	0.00		Coefficient for calculation of Cyy
Cyy	0.99		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	0.30		Coefficient for calculation of Cyz
Cyz	0.83		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	0.00		Coefficient for calculation of Czy
Czy	0.95		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
alphaLT	3.03		Coefficient for calculation of Czz
Czz	0.92		Coefficient for calculation of interaction coefficients kij
ky	1.03		Interaction parameter
kz	0.81		Interaction parameter
kz	0.58		Interaction parameter
kzz	1.10		Interaction parameter

Internal forces at characteristic points of cross section

N,Ed	69.9173	kN	axial force N,Ed
T,Ed	-0.0010	kN*m	torsional moment
My,Ed	-115.0599	kN*m	bending moment My,Ed
My,Ed,max	-115.0599	kN*m	Maximal moment
Mz,Ed	-0.0459	kN*m	bending moment Mz,Ed
Vy,Ed	0.0052	kN	shear force Vy,Ed
Vz,Ed	-44.0974	kN	shear force Vz,Ed
Mz,Ed,max	-0.0459	kN*m	Maximal moment

Stresses at characteristic points of cross-section:

Tau,ly,Ed	0.0436	MPa	shear stress due to torsional moment T,Ed
Tau,tz,Ed	0.0284	MPa	shear stress due to torsional moment T,Ed

Design forces:

Nc,Rd	1721.6705	kN	Design compression resistance
Nb,Rd	849.0770	kN	Design buckling resistance of comp. member
Mb,Rd	166.8415	kN*m	Design buckling resistance moment

About the y axis of cross-section

My,pl,Rd	221.2097	kN*m	Design plastic resistance moment
My,el,Rd	196.1150	kN*m	Design elastic resistance moment

Symbol	Values	Unit	Symbol description
My,c,Rd	221.2097	kN*m	Design moment resistance
MN,y,Rd	221.2097	kN*m	Reduced design plastic resistance moment
Vy,c,Rd	671.3042	kN	Design plastic shear resistance
Vy,T,Rd	671.2305	kN	Resistance for shear considering torsion
About the z axis of cross-section			
Mz,pl,Rd	42.2628	kN*m	Design plastic resistance moment
Mz,el,Rd	27.0924	kN*m	Design elastic resistance moment
Mz,c,Rd	42.2628	kN*m	Design moment resistance of a compressed section part
MN,z,Rd	42.2628	kN*m	Reduced design plastic resistance moment
Vz,c,Rd	489.1538	kN	Design plastic shear resistance
Vz,T,Rd	489.1188	kN	Resistance for shear considering torsion
Verification formulas:			
Section strength check:			
UFS[Nc]	0.04		$N,Ed/Nc,Rd$
UFS[NcMyMz]	0.27		$(My,Ed/MN,y,Rd)^2 + (Mz,Ed/MN,z,Rd)^2 + 1.00$
UFS[Vy]	0.00		$Vy,Ed/Vy,T,Rd$
UFS[Vz]	0.09		$Vz,Ed/Vz,T,Rd$
UFS[VyT]	0.00		$Tau,ly,Ed/(fy/(sqrt(3)*sigmaM0))$
UFS[VzT]	0.00		$Tau,tz,Ed/(fy/(sqrt(3)*sigmaM0))$
Global stability check of member:			
UFB[Lambda]	0.52		$Max(Lambda,y,Lambda,max ; Lambda,z,Lambda,max)$
UFB[My]	0.69		$My,Ed,max/Mb,Rd$
UFB[NMyMz]	0.80		$N,Ed/(X*My,Rk/gM1) + kyy*My,Ed,max/(XLT*My,Rk/gM1)$
UFB[NzMyMz]	0.45		$N,Ed/(X*Nz,Rk/gM1) + kzy*My,Ed,max/(XLT*My,Rk/gM1)$
Ratio:			
RAT	0.80		Efficiency ratio

Section	MEMBER: 15
Properties: IPE	
Properties: IPE	
Cross-section a	
Shear area - y-a	
Shear area - z-a	
Torsional const	
Moment of inertia	
Moment of inertia	
Plastic section	
Plastic section	
Height of cross-section	
Width of cross-section	
Flange thickness	
Web thickness	
Radius of gyration	

Verificação aos ELU da Viga B₂

Verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4, de acordo com a secção 5.7 deste documento.

Anexo F.4

Relatório de cálculo exportado a partir do programa *CYPE 3D* relativo à verificação aos ELU da viga B₂ do Pórtico 4.

N68/N231 (x: 0 m)

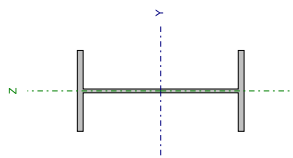
Section: IPE 330
Material: Steel (S275 (EN 1993-1-1))

Nodes		Mechanical characteristics				
Initial	Final	Length (m)	Area (cm ²)	I _x ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _x ⁽²⁾ (cm ⁴)	
N68	N231	1.650	62.60	11770.00	788.00	28.20

Notes:
(1) Inertia with respect to the indicated axis
(2) Uniform torsional moment of inertia

	Buckling		Lateral buckling	
	XY plane	XZ plane	Top fl.	Bot. fl.
β	1.00	9.09	1.00	1.00
L _k	1.650	15.000	1.650	1.650
C _m	1.000	1.000	1.000	1.000
C ₁	-	-	-	1.290

Notation:
β: Buckling coefficient
L_k: Buckling length (m)
C_m: Moment coefficient
C₁: Critical moment modification factor



Crushing of the web induced by the compressed flange (Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2006, Article 8)

The following criteria must be satisfied:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{c,ef}}}$$

Where:

- h_w**: Height of the web.
- t_w**: Web thickness.
- A_w**: Area of the web.
- A_{c,ef}**: Reduced area of the compressed flange.
- k**: Coefficient which depends on the class of the section.
- E**: Modulus of Elasticity.
- f_{yf}**: Steel elastic limit of the compressed flange.

Where:

$$f_{yf} = f_y$$

$$40.93 \leq 256.27 \quad \checkmark$$

Resistance to axial tension (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1: /NA 2010, Article 6.2.3)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.026} \quad \checkmark$$

The worst case design force occurs for load combination SW+1.5·Direção90grausposiçãoextremo.

N_{t,Ed}: Worst case design axial tensile force.

The design tensile resistance **N_{t,Rd}** is given by:

$$N_{t,Rd} = A \cdot f_{td}$$

Where:

A: Gross transverse section of the bar.

f_{td}: Steel design strength.

$$f_{td} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1: /NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

$$N_{t,Rd} : \underline{1721.50} \text{ kN}$$

$$A : \underline{62.60} \text{ cm}^2$$

$$f_{td} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

Compression resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1: /NA 2010, Article 6.2.4)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.042} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.083} \quad \checkmark$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE..

N_{c,Ed}: Worst case design compressive axial force.

The normal design compression force **N_{c,Rd}** should be taken as:

$$N_{c,Rd} = A_{ef} \cdot f_{yd}$$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the compressed elements of a section.

A_{ef}: Effective cross sectional area for class 4 sections.

f_{yd}: Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y: Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1: /NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0}: Partial safety factor of the material.

Buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1: /NA 2010, Article 6.3.1)

The design buckling resistance **N_{b,Rd}** of a compressed bar is given by:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A_{ef} \cdot f_{yd}$$

Where:

A_{ef}: Effective cross sectional area for class 4 sections.

f_{yd}: Steel design strength.

$$N_{b,Rd} : \underline{842.91} \text{ kN}$$

$$A_{ef} : \underline{60.78} \text{ cm}^2$$

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} : \underline{1.00}$$

$$Class : \underline{4}$$

$$A_{ef} : \underline{60.78} \text{ cm}^2$$

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} : \underline{1.00}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{842.91} \text{ kN}$$

$$A_{ef} : \underline{60.78} \text{ cm}^2$$

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

Z - Axis bending resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.5)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.014}$$

For positive bending:

The worst case design force occurs for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

M_{Ed}^* : Worst case design bending moment.

For negative bending:

The worst case design force occurs for load combination SW+1.5-Direcçãobgraus..

M_{Ed}^* : Worst case design bending moment.

The design bending moment resistance $M_{c,Rd}$ is given by:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_{yd}$$

Where:

Class: Section class, depending on its deformation capacity and development of plastic resistance of the flat elements of a section submitted to simple bending.

$W_{pl,z}$: Plastic strength modulus corresponding to the fibre with greatest tension, for class 1 and 2 sections.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{MO} : Partial safety factor of the material.

$$M_{Ed}^* : \underline{0.59} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Ed}^* : \underline{0.56} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{42.35} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{Class} : \underline{1}$$

$$W_{pl,z} : \underline{154.00} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{MO} : \underline{1.00}$$

Resistance to shear in the Z direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.111}$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

The shear resistance $V_{c,Rd}$ is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{td}}{\sqrt{5}}$$

Where:

A_v : Transverse shear area.

$$A_v = h \cdot t_w$$

Where:

h : Depth of the section.

t_w : Web thickness.

f_{td} : Steel design strength.

$$f_{td} = f_y / \gamma_{MO}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{MO} : Partial safety factor of the material.

Shear buckling of the web: (Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2006, Article 5)
Even though transverse stiffeners have not been provided, it is not necessary to check the buckling resistance of the web, as the following is verified:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

Where:

λ_w : Slenderness of the web.

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

λ_{max} : Maximum slenderness.

$$\lambda_{max} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

η : Coefficient which allows to consider the additional resistance in plastic regime because of hardening due to deformed material.

ε : Reduction factor.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Where:

f_{ref} : Reference elastic limit.

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

$$V_{Ed} : \underline{43.75} \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{392.96} \text{ kN}$$

$$A_v : \underline{24.75} \text{ cm}^2$$

$$h : \underline{330.00} \text{ mm}$$

$$t_w : \underline{7.50} \text{ mm}$$

$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{MO} : \underline{1.00}$$

$$40.93 < \underline{55.46}$$

$$\lambda_w : \underline{40.93}$$

$$\lambda_{max} : \underline{55.46}$$

$$\eta : \underline{1.20}$$

$$\varepsilon : \underline{0.92}$$

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

Resistance to shear in the Y direction (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.6)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

The worst case design force occurs for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

The shear resistance $V_{c,Rd}$ is given by:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

Where:

A_v : Transverse shear area.

$$A_v = A \cdot d \cdot t_w$$

Where:

A : Area of the gross section.

d : Height of the web.

t_w : Web thickness.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M0} : Partial safety factor of the material.

$$\eta < \mathbf{0.001}$$

$$V_{Ed} : \mathbf{0.06 \text{ kN}}$$

$$V_{c,Rd} : \mathbf{628.34 \text{ kN}}$$

$$A_v : \mathbf{39.58 \text{ cm}^2}$$

$$A : \mathbf{62.60 \text{ cm}^2}$$

$$d : \mathbf{307.00 \text{ mm}}$$

$$t_w : \mathbf{7.50 \text{ mm}}$$

$$f_{yd} : \mathbf{275.00 \text{ MPa}}$$

$$f_y : \mathbf{275.00 \text{ MPa}}$$

$$\gamma_{M0} : \mathbf{1.00}$$

$$V_{Ed} \leq \mathbf{196.48 \text{ kN}}$$

$$V_{Ed} : \mathbf{43.75 \text{ kN}}$$

$$V_{c,Rd} : \mathbf{392.96 \text{ kN}}$$

$$V_{Ed} \leq \mathbf{314.17 \text{ kN}}$$

$$V_{Ed} : \mathbf{0.06 \text{ kN}}$$

$$V_{c,Rd} : \mathbf{628.34 \text{ kN}}$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$V_{c,Rd}$: Design resistant shear force.

Combined bending and axial resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.2.9)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right] + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right] \leq 1$$

$$\eta : \mathbf{0.267}$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta : \mathbf{0.667}$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta : \mathbf{0.386}$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35-SW+1.5-SOBRE..

Where:

$N_{c,Ed}$: Compressive axial force to be withstood from the analysis.

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Worst case bending moments, in accordance with the Y and Z axes, respectively.

Class: Section class, according to its deformation capacity and plastic resistance development of its flat elements, for axial load and simple bending.

$M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$: Reduced design plastic resistant bending moments, about the Y and Z axes, respectively.

$$M_{y,Rd} = N_{c,Rd} \cdot (1 - \eta) / (1 - 0.5 \cdot \eta) \leq M_{pl,Rd}$$

$$n \leq a \rightarrow M_{N,Rd,z} = M_{pl,Rd}$$

$$\alpha = 2 ; \beta = 5 \cdot n \geq 1$$

Where:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$N_{pl,Rd}$: Compressive resistance of the gross section.

$M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$: Bending resistance of the gross section in plastic conditions, with respect to the Y and Z axes, respectively.

$$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A : Area of the gross section.

b : Flange width.

t_f : Thickness of the flange.

Buckling resistance: (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Article 6.3.3)

$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$

Where:

f_y : Yield strength. (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:/NA 2010, Table 3.1)

γ_{M1} : Partial safety factor of the material.

K_{yy} , K_{yz} , K_{zy} , K_{zz} : Interaction coefficients.

$$K_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{\alpha,LT} \cdot \frac{I_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,y}}$$

K_{yz} : $C_{m,z} \cdot \frac{I_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,z}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$

K_{zy} : $C_{m,y} \cdot \frac{I_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,y}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$

K_{zz} : $C_{m,z} \cdot \frac{I_y}{1 - N_{Ed} / N_{cr,z}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$

$N_{cr,y}$: Critical buckling load about the Y axis.

$N_{cr,z}$: Critical buckling load about the Z axis.

N_{Ed} : Design axial force.

I_y : Second moment of area about the Y axis.

I_z : Second moment of area about the Z axis.

W_y : Section modulus about the Y axis.

W_z : Section modulus about the Z axis.

$$N_{c,Ed} : \mathbf{69.90 \text{ kN}}$$

$$M_{y,Ed} : \mathbf{111.21 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$M_{z,Ed} : \mathbf{0.59 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

Class: $\mathbf{1}$

$$M_{y,Rd} : \mathbf{221.10 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$M_{z,Rd} : \mathbf{42.35 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$\alpha : \mathbf{2.000}$$

$$\beta : \mathbf{1.000}$$

$$n : \mathbf{0.041}$$

$$N_{pl,Rd} : \mathbf{1721.50 \text{ kN}}$$

$$M_{y,Rd} : \mathbf{221.10 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$M_{z,Rd} : \mathbf{42.35 \text{ kN}\cdot\text{m}}$$

$$a : \mathbf{0.41}$$

$$A : \mathbf{62.60 \text{ cm}^2}$$

$$b : \mathbf{16.00 \text{ cm}}$$

$$t_f : \mathbf{11.50 \text{ mm}}$$

$$A : \mathbf{62.60 \text{ cm}^2}$$

$$W_{pl,y} : \mathbf{804.00 \text{ cm}^3}$$

$$W_{pl,z} : \mathbf{154.00 \text{ cm}^3}$$

$$f_{yd} : \mathbf{275.00 \text{ MPa}}$$

$$f_y : \mathbf{275.00 \text{ MPa}}$$

$$\gamma_{M1} : \mathbf{1.00}$$

$$K_{yy} : \mathbf{1.05}$$

$$K_{yz} : \mathbf{0.78}$$

$$k_{xy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{H_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{xy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \frac{H_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

Auxiliary terms:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[2 - \frac{1.6}{W_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{W_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right] \cdot \eta_{pi} - b_{LT} \geq \frac{W_{pl,y}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{W_z^2} \right] \cdot \eta_{pi} - c_{LT} \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z} \cdot \frac{W_{pl,z}}{W_{pl,y}}}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{W_y^2} \right] \cdot \eta_{pi} - d_{LT} \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y} \cdot \frac{W_{pl,y}}{W_{pl,z}}}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[2 - \frac{1.6}{W_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{W_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right] \cdot \eta_{pi} \geq \frac{W_{pl,z}}{W_{pl,z}}$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_z}{I_y} \geq 0$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z} \cdot C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z} \cdot C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y} \cdot C_{mz} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z} \cdot C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$$

$$\eta_{pi} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

Given that:

$$\bar{\lambda}_0 > 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,t}} \right)}$$

$$C_{my} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\epsilon_y} \cdot a_{LT}}$$

$$C_{mz} = C_{m,z,0}$$

$$k_{xy} : 0.59$$

$$k_{xz} : 1.09$$

$$\mu_y : 0.97$$

$$\mu_z : 1.00$$

$$C_{yy} : 0.99$$

$$C_{yz} : 0.87$$

$$C_{zy} : 0.94$$

$$C_{zz} : 0.93$$

$$a_{LT} : 1.00$$

$$b_{LT} : 0.00$$

$$c_{LT} : 0.23$$

$$d_{LT} : 0.04$$

$$e_{LT} : 2.36$$

$$w_y : 1.13$$

$$w_z : 1.50$$

$$\eta_{pi} : 0.04$$

$$0.46 > 0.23$$

$$C_{my} : 1.00$$

$$C_{mz} : 1.00$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,t}} \right)}}$$

$$\epsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{pl,y}}$$

$$C_{m,y,0} : 1.00$$

$$C_{m,z,0} : 1.00$$

$$C_1 : 1.29$$

$$\chi_x : 0.49$$

$$\chi_x : 0.87$$

$$\chi_{LT} : 0.92$$

$$\bar{\lambda}_{max} : 1.26$$

$$\bar{\lambda}_y : 1.26$$

$$\bar{\lambda}_z : 0.54$$

$$\bar{\lambda}_{LT} : 0.41$$

$$\bar{\lambda}_0 : 0.46$$

$$W_{pl,y} : 713.33 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : 98.50 \text{ cm}^3$$

$$N_{cr,y} : 1084.21 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} : 5998.98 \text{ kN}$$

$$N_{cr,t} : 8690.58 \text{ kN}$$

$$I_y : 11770.00 \text{ cm}^4$$

$$I_z : 28.20 \text{ cm}^4$$

C_{m,yor} C_{m,z,0}: Equivalent uniform bending moment factors.

C₁: Factor which depends on the support conditions and bending moment envelope of the bar.

χ_x, χ_z: Buckling reduction coefficients, about the Y and Z axes, respectively.

χ_{LT}: Lateral buckling reduction coefficient.

λ̄_{max}: Maximum slenderness between λ̄_y and λ̄_z.

λ̄_y, λ̄_z: Reduced slendernesses with respect to the Y and Z axes, respectively.

λ̄_{LT}: Reduced slenderness.

λ̄₀: Reduced slenderness, with respect to lateral buckling, for a uniform bending moment.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Elastic resistant modules corresponding to the compressed fibre, about the Y and Z axes, respectively.

N_{cr,y}: Critical elastic buckling axial force with respect to the Y axis.

N_{cr,z}: Critical elastic buckling axial force with respect to the Z axis.

N_{cr,t}: Critical elastic buckling axial force due to torsion.

I_y: Moment of inertia of the gross section, with respect to the Y-axis.

I_z: Uniform torsional moment of inertia.

Combined bending, axial and shear resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1/NA 2010, Article 6.2.10)

It is not necessary to reduce the design bending and axial force resistance, as the buckling effect can be ignored due to shear. Additionally, the worst case design shear force **V_{Ed}** is less than or equal to 50% of the design shear resistance **V_{cr,Rd}**.

The worst case design forces occur for load combination SW+1.5·Direcção180graus.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{cr,Rd,z}}{2}$$

$$36.50 \text{ kN} \leq 196.45 \text{ kN}$$

Where:

V_{Ed,z}: Worst case design shear force.

V_{cr,Rd,z}: Design resistant shear force.

$$V_{Ed,z} : 36.50 \text{ kN}$$

$$V_{cr,Rd,z} : 392.91 \text{ kN}$$

Torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{M_{T,Ed}}{M_{T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.001}$$

The worst case design force occurs for load combination SW+1.5·DIREÇÃO180graus.

$M_{T,Ed}$: Worst case design torsional moment.

The design torsional moment resistance $M_{T,Rd}$ is given by:

$$M_{T,Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot W_T \cdot f_{yd}$$

Where:

W_T : Torsion resistance module.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{Mo}$$

Where:

f_y : Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{Mo} : Partial safety factor of the material.

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$
$$\gamma_{Mo} : \underline{1.00}$$

Combined Z shear and torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.052}$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE.+0.9·DIREÇÃO90grausposiçãoextremo.

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$M_{T,Ed}$: Worst case design torsional moment.

The reduced design resistant shear force $V_{pl,T,Rd}$ is given by:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{1.25 \cdot f_{yd} / \sqrt{3}} \cdot V_{pl,Rd}}$$

Where:

$V_{pl,Rd}$: Design resistant shear force.

$\tau_{T,Ed}$: Tangential stresses due to torsion.

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_T}$$

Where:

W_T : Torsion resistance module.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{Mo}$$

Where:

f_y : Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{Mo} : Partial safety factor of the material.

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{392.91} \text{ kN}$$
$$V_{pl,Rd} : \underline{392.96} \text{ kN}$$
$$\tau_{T,Ed} : \underline{0.05} \text{ MPa}$$

$$W_T : \underline{24.52} \text{ cm}^3$$
$$f_{yd} : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$
$$\gamma_{Mo} : \underline{1.00}$$

Combined Y shear and torsional resistance (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Article 6.2.7)

The following criteria must be satisfied:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta < \underline{0.001}$$

The worst case design forces occur for load combination 1.35·SW+1.5·SOBRE.+0.9·DIREÇÃO90grausposiçãoextremo.

V_{Ed} : Worst case design shear force.

$M_{T,Ed}$: Worst case design torsional moment.

The reduced design resistant shear force $V_{pl,T,Rd}$ is given by:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{1.25 \cdot f_{yd} / \sqrt{3}} \cdot V_{pl,Rd}}$$

Where:

$V_{pl,Rd}$: Design resistant shear force.

$\tau_{T,Ed}$: Tangential stresses due to torsion.

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_T}$$

Where:

W_T : Torsion resistance module.

f_{yd} : Steel design strength.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{Mo}$$

Where:

f_y : Yield strength, (Eurocode 3 NP EN 1993-1-1:NA 2010, Table 3.1)

γ_{Mo} : Partial safety factor of the material.