



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

João M. M. Eira<sup>a</sup>, Isabel B. Valente<sup>a</sup> e Miguel M. Pires<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

<sup>b</sup> *Diretor do Departamento Técnico e Engenharia, CASAIS – Engenharia e Construção, SA*

**Resumo.** A presente comunicação descreve o desenvolvimento de uma ferramenta informática vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1]. A ferramenta *AciariUM* é direcionada para a verificação e dimensionamento (ELU) de vigas-coluna em aço sujeitas a flexão composta desviada. 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 disponível para consulta e edição.

### 1. Introdução

No presente trabalho procurou-se desenvolver uma ferramenta informática vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1 [1]. O trabalho decorreu no âmbito de uma Tese de Mestrado Integrado, desenvolvida em ambiente empresarial, numa parceria entre a Universidade do Minho e a CASAIS - Engenharia e Construção, S.A. A ferramenta *AciariUM* foi desenvolvida como meio de análise aos estados limites últimos 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.

Numa primeira fase, realizou-se um estudo comparativo focado na avaliação da eficácia e versatilidade de programas de análise e dimensionamento estrutural existentes no mercado. 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 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. É apresentada em formato de ficheiro do Office Excel complementado com programação em Visual Basic (Fig. 1).

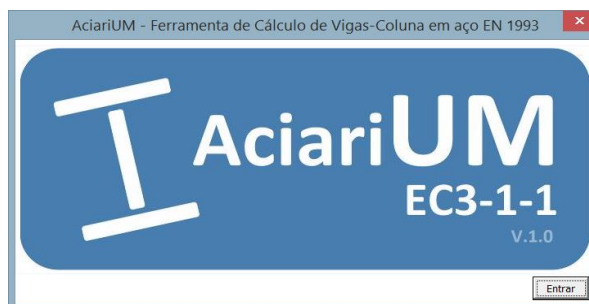


Fig. 1: Ferramenta *AciariUM*.

A validação da ferramenta *AciariUM* foi realizada em colaboração com a CASAIS – Engenharia e Construção, S.A. utilizando-a para verificação de segurança aos ELU de um edifício projetado e construído por esta entidade. Os resultados foram comparados com os devolvidos por programas comerciais de cálculo estrutural.

## 2. Ferramenta desenvolvida: princípios e opções de cálculo

A ferramenta *AciariUM* é direcionada para a verificação aos estados limites últimos (ELU) de vigas-coluna em aço sujeitas a flexão composta desviada. Estão abrangidas secções transversais em I e H monossimétricas e bissimétricas, perfis dos tipos laminado a quente e reconstituído soldado.

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.

A ferramenta de cálculo *AciariUM* tem na base dos seus algoritmos de cálculo a regulamentação apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Regulamentação na base do algoritmo de cálculo da ferramenta *AciariUM*.

Verificação/Cálculo	Referência
Classificação das secções transversais;	NP EN 1993-1-1 (5.5) [1]
Determinação de propriedades efetivas das secções da Classe 4.	NP EN 1993-1-5 (4) [2]
Resistência das secções transversais aos estados limites últimos;	NP EN 1993-1-1 (6.2) [1]
Resistência dos elementos à encurvadura (varejamento);	NP EN 1993-1-1 (6.3.1) [1]
Resistência dos elementos à encurvadura lateral (bambeamento);	NP EN 1993-1-1 (6.3.2) [1]
Resistência à encurvadura por esforço transversal (enfundamento);	NP EN 1993-1-5 (5) [2]
Verificação à estabilidade global: resistência à encurvadura de elementos solicitados a flexão composta com compressão;	NP EN 1993-1-1 (6.3.3) [1]

O cálculo do Momento Crítico para a encurvadura lateral,  $M_{cr}$ , é feito de acordo com a proposta de Clark e Hill (1960) e Galéa (1981) [3] – Eq. (1).

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z l)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{0.5} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} \quad (1)$$

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  $y$ . Os fatores  $k_z$  e  $k_w$  são fatores de comprimento efetivo dependentes das condições de apoio nas extremidades do tramo de comprimento  $l$ . Na maior parte as situações práticas estas restrições são apenas parciais, razão pela qual se recomenda conservativamente  $k_z = k_w = 1,0$  [4].

### 3. Estrutura da ferramenta de cálculo

A ferramenta *AciariUM* está dividida em diferentes interfaces/separadores que devem funcionar pela ordem em que estão dispostos (Fig. 2).

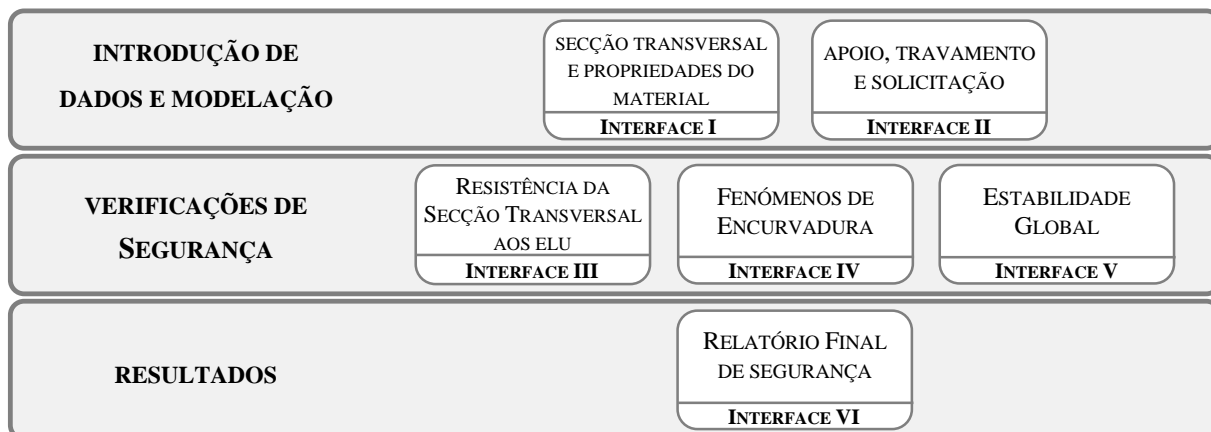


Fig. 2: Estrutura global da ferramenta de cálculo *AciariUM*.

#### 3.1 Interface I: Secção transversal e propriedades do material

Este espaço (Fig. 3) é destinado à definição dos seguintes parâmetros: geometria da secção transversal, através da qual a ferramenta *AciariUM* calcula automaticamente as correspondentes propriedades mecânicas; classe de resistência e propriedades do aço constituinte do elemento estrutural; coeficientes parciais de segurança  $\gamma_{Mi}$ .

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECCÃO TRANSVERSAL										A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z				E						
IPe A300	h	b <sub>s</sub>	b <sub>i</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>s</sub>	t <sub>i</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>i</sub>	r <sub>l</sub>	r <sub>l</sub>	A	z <sub>cg</sub>	y <sub>cg</sub>	h <sub>i</sub>	d	c <sub>s</sub>	c <sub>i</sub>	i <sub>y</sub>	W <sub>y1</sub>	W <sub>y2</sub>	W <sub>y3</sub>	i <sub>y</sub>	A <sub>w</sub>	i <sub>z</sub>	W <sub>z1</sub>	W <sub>z2</sub>	W <sub>z3</sub>	i <sub>z</sub>	A <sub>w</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>x</sub> 10 <sup>4</sup>	E
f <sub>t</sub> (MPa) 275	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		DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT										A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
SECCÃO	TIPO DE PERFIL	h	b <sub>s</sub>	b <sub>i</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>s</sub>	t <sub>i</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>i</sub>	r <sub>l</sub>	A	z <sub>cg</sub>	y <sub>cg</sub>	h <sub>i</sub>	d	c <sub>s</sub>	c <sub>i</sub>	
IPe300	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		DIMENSÕES PRINCIPAIS RECOLHIDAS DO AUTODESK ROBOT										A	CG	DIMENSÕES COMPLEMENTARES				
ELEMENTO	SECCÃO	TIPO DE PERFIL	h	b <sub>s</sub>	b <sub>i</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>s</sub>	t <sub>i</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>i</sub>	A	z <sub>cg</sub>	y <sub>cg</sub>	h <sub>i</sub>	d	c <sub>s</sub>	c <sub>i</sub>	
1	5,00	IPe 300	Perfil Laminado	300	150	150	7,1	10,7	10,7	15	15	53,8	150,0	75,0	278,6	248,6	0,00	0,00

CLASSE DE AÇO	CONSTITUINTE DO ELEMENTO ESTRUTURAL	PROPRIEDADES GERAIS DO MATERIAL	COEFICIENTES PARCIAIS DE SEGURANÇA
AÇO DA CLASSE	S275	E 210 GPa G 80,77 GPa v 0,3	γ <sub>M0</sub> 1,00 γ <sub>M1</sub> 1,00 γ <sub>M2</sub> 1,25

Fig. 3: Interface I: Secção transversal e propriedades do material.

Estão disponíveis três módulos de definição da geometria da secção transversal:

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

#### 3.2 Interface II: Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural

Este espaço (Fig. 4) tem como funções determinar ou identificar os esforços atuantes na secção a verificar:  $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed,y}$ ,  $M_{Ed,z}$ ,  $V_{Ed,z}$  e  $V_{Ed,y}$ ; e definir um conjunto de parâmetros que caracterizam o sistema estrutural:  $L$ ,  $L_{cr,y}$ ,  $L_{cr,z}$ ,  $l_{sup}$  e  $l_{inf}$ .

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			E									
IPE	h	b <sub>f</sub>	b <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>l</sub>	r <sub>f</sub>	r <sub>w</sub>	A	z <sub>ca</sub>	y <sub>ca</sub>	h <sub>i</sub>	d	c <sub>su</sub>	c <sub>si</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>ytop</sub>	W <sub>ybot</sub>	W <sub>pl,y</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>w</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>ztop</sub>	W <sub>zbot</sub>	W <sub>pl,z</sub>	I <sub>r</sub>	I <sub>x</sub> x 10 <sup>3</sup>	E		
275	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

Fig. 4: Interface II: Condições de apoio, travamento e solicitação do elemento estrutural.

### 3.2.1 Módulo Manual

Os valores dos parâmetros a quantificar são definidos diretamente pelo utilizador. Este módulo (Fig. 5) é indicado para o caso em que se pretende utilizar a ferramenta como meio de verificação dos resultados recolhidos a partir de software de análise estrutural, situação em que se conhecem à partida as características dos esforços de cálculo atuantes.

MÓDULO MANUAL															INFO		OCULTAR / MOSTRAR															
SOLICITAÇÃO NA SECÇÃO CONDICIONANTE															N <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed,z</sub>	M <sub>Ed,y</sub>	V <sub>Ed,y</sub>	M <sub>Ed,z</sub>													
															200,00	kN	6,27	kN	74,64	kN.m	5,00	kN.m	10,00	kN.m								
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO															L	L <sub>cr,y</sub>	L <sub>cr,z</sub>	I <sub>sup</sub>	I <sub>inf</sub>													
															5,00	m	2,50	m	0,50	x L	3,00	m	0,60	x L	1,00	m	0,20	x L	1,00	m	0,20	x L

Fig. 5: Interface II: Módulo Manual.

### 3.2.2 Módulo Automático

Este espaço (Fig. 6) possibilita a modelação completa das condições de apoio, travamento e solicitação de um elemento viga-coluna. A ferramenta calcula reações de apoio e diagramas de esforços e devolve os valores dos parâmetros a quantificar para a secção e tramo identificados. É indicado para pré-dimensionamento.

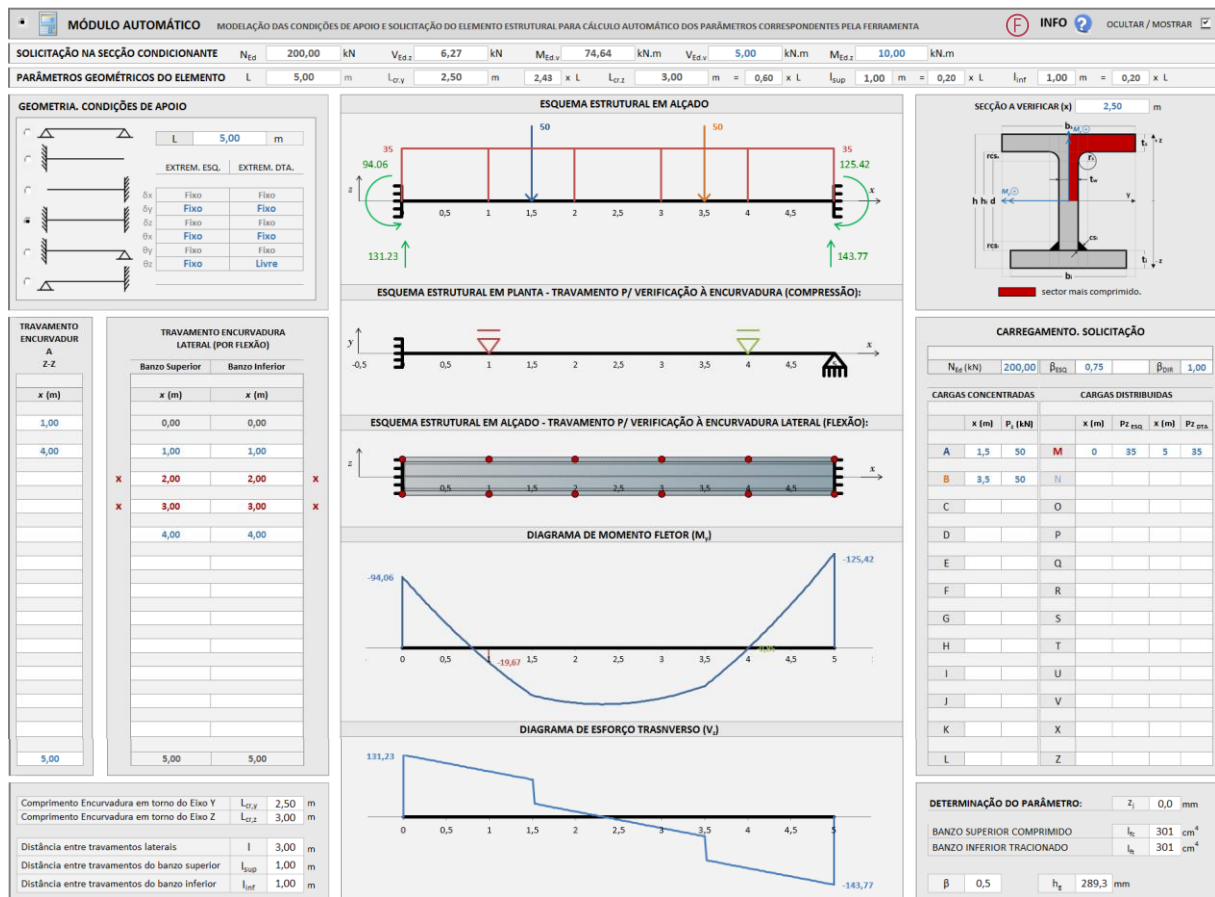


Fig. 6: Interface II: Módulo Automático.

### 3.2.3 Módulo Robot Structural Analysis ©

Os valores dos esforços atuantes na secção identificada são automaticamente recolhidos a partir de um ficheiro do Robot Structural Analysis aberto no computador (Fig.7).

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.	1	DL1	POSIÇÃO SECÇÃO	2,5 m	SECÇÃO	IPE 300	
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
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ELEMENTO		L	5,00 m	$L_{Cr,y}$	2,50 m	$\lambda$	0,50 x L	$L_{Cr,z}$	3,00 m	$\lambda$	0,60 x L
		$I_{sup}$	1,00 m	$\lambda$	0,20 x L	$I_{inf}$	1,00 m	$\lambda$	0,20 x L		

Fig. 7: Interface II ©: Módulo Robot Structural Analysis.

### 3.3 Interface III: Resistência da secção transversal aos ELU

Neste espaço (Fig. 8) é classificada a secção transversal e verificada a sua resistência em relação aos estados limites últimos (ELU).

**INTERFACE III. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL [ULS]**

SEÇÃO BISSIMÉTRICA

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										DIMENSÕES COMPLEMENTARES				EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					E							
IPE 300	h	b <sub>s</sub>	b <sub>i</sub>	t <sub>v</sub>	t <sub>s</sub>	t <sub>i</sub>	r <sub>s</sub>	n	A	z <sub>os</sub>	y <sub>os</sub>	z <sub>os</sub>	y <sub>os</sub>	h <sub>i</sub>	d	cs <sub>x</sub>	cs <sub>y</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	I <sub>y</sub>	A <sub>ve</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>pl,z</sub>	W <sub>pl,z</sub>	W <sub>pl,z</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>ve</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>x</sub> x 10 <sup>3</sup>	E
f <sub>t</sub> (MPa) 275	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	603,7	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

CLASSIFICAÇÃO DA SECÇÃO A secção IPE300 sujeita a Flexão Composta Desviada é da Classe 1. CLASSE 1

**A. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL A ESFORÇOS SIMPLES** NP EN 1993-1-1:6.2.3

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	$V_{c,Rd(0)}$	407,75 kN	OK	2%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com $S_y$ 314,18 cm <sup>3</sup>
Momento Fletor	$M_{c,Rd(0)}$	172,80 kN.m	OK	43%	NPEN1993-1-1 (6.2.5)
Esforço Transverso	$V_{c,Rd(s)}$	540,32 kN	OK	1%	NPEN1993-1-1 (6.2.6) com $S_y$ 56,51 cm <sup>3</sup>
Momento Fletor	$M_{c,Rd(s)}$	34,44 kN.m	OK	29%	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 EM Z-Z** [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR  $M_{Ed}$ ]

$V_{Ed,z}$  (kN) 6,271 < 50%  $V_{pl,Rd,z}$  (kN) 407,8  $\rho$  0,00  $f_{t,y}$  (MPa) 275,0  $f_{t,z}$  (MPa) 275,0

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

**ESFORÇO TRANSVERSO EM Y-Y** [ASSOCIADO AO MOMENTO FLETOR  $M_{Ed}$ ]

$V_{Ed,y}$  (kN) 5 < 50%  $V_{pl,Rd,y}$  (kN) 540,3  $\rho$  0,00  $f_{t,y}$  (MPa) 275,0  $f_{t,z}$  (MPa) 275,0

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

**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 [ $M_{Rd,y}$ ]

PL  $MV_{z,Rd}$  172,80 kN.m OK 43%  $MV_{z,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_{t,y} + W_{pl,z} \cdot f_{t,z}}{\gamma_{M0}}$

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

PL  $MV_{y,Rd}$  34,44 kN.m OK 29%  $MV_{y,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_{t,z} + W_{pl,y} \cdot f_{t,y}}{\gamma_{M0}}$

**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

Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MRd] em relação ao eixo y, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse valor.

PL  $MNV_{y,Rd}$  172,80 kN.m OK 43%  $MNV_{y,Rd} = MV_{y,Rd} \cdot (1-n) / (1-0,5n)$

Com:  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  0,14  $a = (A - 2bt_f) / A$  mas  $a \leq 0,5$  0,20 Note:  $MNV_{y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$

Não é necessário ter em conta a interação do esforço axial [N] com o momento fletor resistente [MRd] em relação ao eixo z, razão pela qual não efetuada qualquer redução desse valor.

PL  $MNV_{z,Rd}$  34,44 kN.m OK 29%  $MNV_{z,Rd} = MV_{z,Rd} \cdot \left[ 1 - \frac{(n-a)^2}{1-a} \right]$  para  $n > a$

Com:  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$  0,14  $a = (A - 2bt_f) / A$  mas  $a \leq 0,5$  0,20 Note:  $MNV_{z,Rd} = MV_{z,Rd}$  para  $n \leq a$

**E. INTERAÇÃO [M<sub>y</sub> + M<sub>z</sub> + N + V] FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA COM ESFORÇO TRANSVER** [SECÇÕES TRANSVERSAIS BISSIMÉTRICAS DA CLASSE 1 OU 2] NP EN 1993-1-1:6.2.9

CRITÉRIO DE SEGURANÇA  $\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1,0$  0,48 < 1,00 OK 48%

Com:  $\alpha$  2  $\beta$  1

Fig. 8: Interface III: Resistência da secção transversal a esforços combinados.

O aspeto do Interface III é variável. O conteúdo apresentado é gerido automaticamente em função da Classe da secção transversal.

A ferramenta gera relatórios de cálculo detalhados prontos para consulta relativos à classificação da secção transversal e à determinação das propriedades efetivas de secções da Classe 4.

### 3.4 Interface IV: Resistência do elemento à encurvadura

A resistência do elemento à encurvadura por esforço axial (varejamento) e por flexão (bambamento) é verificada de acordo com as Fig. 9 e 10.



**INTERFACE IV. FENÓMENOS DE ENCURVADURA**

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										DIMENSÕES COMPLEMENTARES										EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					E		
IPE 300	h	b <sub>f</sub>	b <sub>t</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>s</sub>	t <sub>i</sub>	r <sub>f</sub>	r <sub>i</sub>	r <sub>l</sub>	r <sub>l</sub>	A	z <sub>ca</sub>	y <sub>ca</sub>	z <sub>ca</sub>	d	c <sub>s</sub>	c <sub>si</sub>	c <sub>si</sub>	l <sub>y</sub>	W <sub>sup</sub>	W <sub>inf</sub>	W <sub>pl,y</sub>	I <sub>y</sub>	A <sub>ef</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>sup</sub>	W <sub>inf</sub>	W <sub>pl,z</sub>	I <sub>z</sub>	A <sub>ef</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>x</sub> × 10 <sup>3</sup>	E
f <sub>t</sub> (MPa) 275	300	150	150	7	11	11	15	15			53,81	150	75	278,6	248,6	0	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 <sub>Ed</sub>	200,00	kN	V <sub>Ed</sub>	6,27	kN	M <sub>Ed,y</sub>	74,64	kN.m	V <sub>Ed,z</sub>	5,00	kN	M <sub>Ed,z</sub>	10,00	kN.m	CLASSE	1
-------------------------------------	--	-----------------	--------	----	-----------------	------	----	-------------------	-------	------	-------------------	------	----	-------------------	-------	------	--------	---

Fig. 9: Interface IV (parte 1): Resistência do elemento à encurvadura (varejamento).

**C. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA LATERAL (BAMBEAMENTO - ENCURVADURA POR MOMENTO FLETOR)**

DETERMINAÇÃO DO VALOR DO MOMENTO CRÍTICO (M<sub>cr</sub>) PARA A ENCURVADURA LATERAL - PROPOSTA DE CLARK AND HILL (1960) E GALÁEA (1981):

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

VALORES PROPOSTOS: M<sub>cr</sub> 696 kN.m; M<sub>cr</sub> 1863 kN.m

DEFINIÇÃO MANUAL DO VALOR DE M<sub>cr</sub>: **696,02 kN.m**

COEFICIENTES DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS: C<sub>1</sub> 1,29; C<sub>2</sub> 1,56; C<sub>3</sub> 0,75

FORMA DO DIAGRAMA DE MOMENTOS:

FATORES DE COMPRIMENTO EFETIVO: k<sub>z</sub> 1,00; k<sub>w</sub> 1,00

COMPRIMENTO ENTRE SECÇÕES LATERAL/CONTRAVENTADAS: 1 (m)

POSICIÓN DA CARGA NA SECÇÃO: z<sub>g</sub> 0,150 em metros

GRAU DE ASSIMETRIA DA SECÇÃO: z<sub>i</sub> 0 m; β 0,5; h<sub>g</sub> 289,3 mm; Banzo comprimido: superior (I<sub>yc</sub> 300,9 cm²); Banzo tracionado: inferior (I<sub>yt</sub> 300,9 cm²)

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

M<sub>pl,y,Ed</sub> 159,8 kN.m (OK 47%); M<sub>cr</sub> 696 kN.m; M<sub>cr</sub> 1863 kN.m; λ<sub>LT</sub> 0,50; α<sub>LT</sub> 0,21; φ<sub>LT</sub> 0,66; χ<sub>LT</sub> 0,92

Fig. 10: Interface IV (parte 2): Resistência do elemento à encurvadura lateral (bambeamento).

O Botão abre a janela de definição dos coeficientes C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> que têm em conta a distribuição de momentos (Fig. 11a). O Botão abre a janela de definição da posição de aplicação da carga ao nível da secção transversal para definição do parâmetro z<sub>g</sub> (Fig. 11b).

**Definição dos valores dos coeficientes C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>**

Condições de apoio e carregamento	Diagrama de Momentos Flectores	Valor de k <sub>z</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
		1,0	1,000	1,000	1,000
		0,7	1,000	1,113	1,113
		0,5	1,000	1,144	1,144
		1,0	1,141	1,141	1,141
		0,7	1,270	1,565	1,565
		0,5	1,305	2,283	2,283
		1,0	1,333	0,992	0,992
		0,7	1,473	1,556	1,556
		0,5	1,514	2,271	2,271
		1,0	1,563	0,998	0,998
		0,7	1,739	1,531	1,531
		0,5	1,788	2,235	2,235
		1,0	1,879	0,939	0,939
		0,7	2,092	1,473	1,473
		0,5	2,150	2,150	2,150
		1,0	2,281	0,855	0,855
		0,7	2,538	1,340	1,340
		0,5	2,609	1,957	1,957
		1,0	2,704	0,676	0,676
		0,7	3,009	1,059	1,059
		0,5	3,093	1,546	1,546
		1,0	2,927	0,366	0,366
		0,7	3,009	0,875	0,875
		0,5	3,093	0,837	0,837
		1,0	2,752	0,000	0,000
		0,7	3,063	0,000	0,000
		0,5	3,149	0,000	0,000

**Posição de aplicação da carga ao nível da secção transversal**

z<sub>g</sub> 150 mm

Definir manualmente

Carga aplicada ao nível de:

Topo

Centro de Corte

Base

OK

a) Janela de definição dos coeficientes C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>. b) Janela de definição de z<sub>g</sub>.

Fig. 11: Janelas associadas aos botões e .

A resistência à encurvadura por esforço transversal é verificada de acordo com a Fig. 12. O botão aciona um processo de otimização que identifica a eventual necessidade de existência de reforços transversais e a distância máxima a que devem ser dispostos.

**D. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO (ENFUMENTO)**

ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE PLÁSTICO (E<sub>u</sub>) V<sub>pl,Rd</sub> 407,75 kN (OK) NPEN1993-1-1(6.2.6) com S 314,178 cm<sup>2</sup>

ALMA NÃO REFORÇADA h<sub>w</sub>/t<sub>w</sub> 39,24 < 72/η ε 55,46 → Não há necessidade de existirem reforços transversais!

REFORÇOS TRANSVERSAIS: EXTREMIDADE Sim; RÍGIDOS; INTERMÉDIOS Não; a (m) 5,00; L (m) 5,00

REFORÇOS LONGITUDINAIS: Não

ALMA REFORÇADA h<sub>w</sub>/t<sub>w</sub> 39,24 < 31/η ε √E<sub>s</sub> 55,25 → Não há necessidade de verificar a chapa em relação à resistência à encurvadura por esforço transversal!

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

V<sub>pl,Rd</sub> (kN) 378,1 = V<sub>pl,Rd1</sub> 376,87 + V<sub>pl,Rd2</sub> 1,2

DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO EFETIVA CONSTITUÍDA APENAS PELAS ÁREAS EFETIVAS DOS BANZOS

SEÇÃO TOTAL	SEÇÃO EFETIVA	M <sub>Ed</sub>	M <sub>pl,Rd</sub>	M <sub>Ed</sub> /M <sub>pl,Rd</sub>
A (cm <sup>2</sup> ) 53,812	A <sub>eff,cm2</sub> 32,10	123,19	123,19	95,28
I (cm <sup>4</sup> ) 150	I <sub>eff,cm4</sub> 150,00			
z <sub>g</sub> (mm) 171,14	z <sub>g,eff</sub> 6720			
σ <sub>t</sub> (MPa) 216,81	σ <sub>t,eff</sub> 447,97			
ψ <sub>tr,2%</sub> -0,566				
E <sub>s</sub> (MPa) 210.000				

NOTAS E CHAMADAS DE ATENÇÃO: RESTRICÇÕES DE VALIDADE: Reforços transversais rígidos. Inexistência de reforços longitudinais.

Fig. 12: Interface IV (parte 3): Resistência do elemento à encurvadura por esforço transversal.

### 3.5 Interface V: Verificação da estabilidade global

Neste espaço são verificados os elementos em flexão composta com compressão (Fig. 13).

**AcariUM** INTERFACE V. ESTABILIDADE GLOBAL

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES PRINCIPAIS DA SECÇÃO TRANSVERSAL										DIMENSÕES COMPLEMENTARES										EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Y					EIXO PRINCIPAL DE INÉRCIA Z					ε							
IPE 300	h	b <sub>f</sub>	b <sub>t</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	t <sub>r</sub>	r <sub>f</sub>	r <sub>t</sub>	A	z <sub>cg</sub>	y <sub>cg</sub>	h <sub>l</sub>	d	c <sub>s</sub>	c <sub>t</sub>	i <sub>y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	i <sub>y</sub>	A <sub>w</sub>	i <sub>z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	i <sub>y</sub>	A <sub>w</sub>	i <sub>z</sub>	W <sub>pl,y</sub>	W <sub>pl,z</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>el,z</sub>	i <sub>t</sub>	i <sub>w</sub> × 10 <sup>3</sup>	ε	
f <sub>y</sub> (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<sub>Ed</sub> 200,00 kN V<sub>Ed,y</sub> 6,27 kN M<sub>Ed,y</sub> 74,64 kN.m V<sub>Ed,z</sub> 5,00 kN M<sub>Ed,z</sub> 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<sub>cr,y</sub> 2,50 l<sub>cr,z</sub> 3,00 L 5,00 λ<sub>y</sub> 0,23 λ<sub>z</sub> 1,03 λ<sub>LT</sub> 0,498 χ<sub>y</sub> 0,99 χ<sub>z</sub> 0,58 χ<sub>LT</sub> 0,92

ESFORÇOS NORMAIS CRÍTICOS N<sub>cr,y</sub> 27710 kN N<sub>cr,z</sub> 1390 kN N<sub>cr,T</sub> 2718 kN FATORES u<sub>y</sub> 1,00 u<sub>z</sub> 0,93 w<sub>y</sub> 1,13 w<sub>z</sub> 1,50 η<sub>pl</sub> 0,14 λ<sub>max</sub> 1,03

COEFICIENTES DE MOMENTO UNIFORME EQUIVALENTE AUTO MÓDULO C<sub>my,0</sub> 1,00 C<sub>mz,0</sub> 1,00 C<sub>mt,0</sub> 1,13

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M<sub>Ed</sub> ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C<sub>my,0</sub> = 1 + (π<sup>2</sup> E I<sub>y</sub> / L<sup>2</sup> M<sub>Ed</sub>(x)) N<sub>Ed</sub> / N<sub>cr,y</sub>

DIAGRAMA DE MOMENTOS FLETORES M<sub>Ed</sub> ENTRE SECÇÕES LATERALMENTE CONTRAVENTADAS: C<sub>mz,0</sub> = 1 + 0,03 N<sub>Ed</sub> / N<sub>cr,z</sub>

FATORES a<sub>1,T</sub> 1,00 b<sub>1,T</sub> 0,01 c<sub>1,T</sub> 0,07 d<sub>1,T</sub> 0,07 e<sub>1,T</sub> 0,20 FATORES C<sub>ψ</sub> 0,98 C<sub>τ</sub> 0,97 C<sub>β</sub> 0,88 C<sub>α</sub> 0,97

FATORES DE INTERAÇÃO k<sub>yy</sub> 1,16 k<sub>yz</sub> 0,84 k<sub>zy</sub> 0,63 k<sub>zz</sub> 1,13

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Y NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.61  $\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,92 < 1,0$  OK 92%

CONDIÇÃO ASSOCIADA À ENCURVADURA EM TORNO DE Z NP EN 1993-1-1 6.3.3(4) EXP 6.62  $\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = 0,85 < 1,0$  OK 85%

Fig. 13: Interface V: Verificação da estabilidade global.

## 4. Validação da ferramenta desenvolvida

O Edifício 2 do Estaleiro de Moçambique, em Matola (Moçambique), foi dimensionado e construído pela CASAIS – Engenharia e Construção S.A. É estudado neste âmbito com o objetivo de validar os resultados fornecidos pela ferramenta *AcariUM* comparando-os com os devolvidos pelos programas de cálculo estrutural *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D* para o mesmo caso.

### 4.1 Apresentação do caso de estudo

A estrutura do edifício motivo de estudo é definida geometricamente de acordo com a Fig. 14.

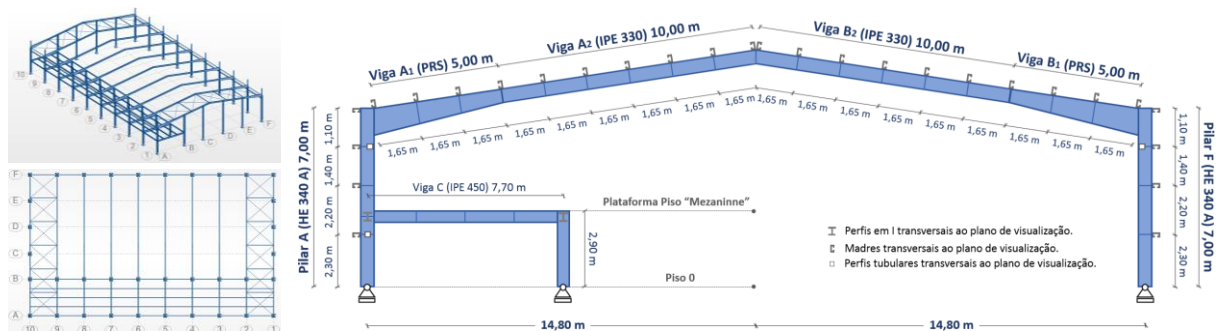


Fig. 14: Estrutura em aço do Edifício 2, Estaleiro de Moçambique – Matola (Moçambique).

### 4.2 Estratégias de modelação nos programas de cálculo estrutural

A simulação eficaz das condições reais de um sistema estrutural nos programas de cálculo estrutural implica, por vezes, a adoção de estratégias de modelação (Fig. 14).

No cálculo do momento crítico  $M_{cr}$  (Eq. 1) os programas referidos consideram  $l$  igual ao comprimento total 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). Definam  $k_z = L_{cr,z}^{Banzo} / L$ . O *Robot Structural Analysis* toma  $k_w = 1,0$ , o *CYPE 3D* considera  $k_w = k_z$ .

De uma forma geral a estratégia que se propõe, para que os programas determinem corretamente o valor de  $M_{cr}$ , é modelar cada elemento (viga ou pilar) como um conjunto de subelementos de comprimentos iguais às distâncias entre secções lateralmente contraventadas. Considera-se para o efeito o contraventamento do banzo comprimido pelo esforço de flexão.



Fig. 15: Estratégia de modelação.

### 4.3 Comparação entre resultados obtidos com a ferramenta *AciariUM* e com os programas *Robot Structural Analysis* e *CYPE 3D*

As Tabelas 2, 3 e 4 comparam os resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida com os devolvidos pelos programas comerciais de cálculo estrutural testados.

**Tabela 2:** Verificação aos ELU do Pilar A (HE 340 A – Perfil laminado a quente)

Secção	$N_{c,Rd}$	$M_{Rd,y}$	$V_{Rd,z}$	$M_{Rd,z}$	$V_{Rd,y}$	FCD <sup>(1)</sup>	$N_{b,Rd,y}$	$N_{b,Rd,z}$	$M_{b,Rd}$	$V_{b,Rd}$	Ver. <sup>(2)</sup>	Ver. <sup>(2)</sup>
Classe 1	kN	kN.m	kN	kN.m	kN		kN	kN	kN.m	kN	(6.61)	(6.62)
<i>AciariUM</i>	3671	509	714	208	1671	69%	3145	3197	498	-	96%	57%
<i>Robot SA</i>	3671	509	714	208	1753	69%	3143	3197	498	-	96%	57%
<i>CYPE 3D</i>	3671	509	498	208	1672	65%	3137	3197	498	-	92%	54%

**Tabela 3:** Verificação aos ELU da Viga B<sub>1</sub> (PRS – Perfil reconstituído soldado)

Secção	$N_{c,Rd}$	$M_{Rd,y}$	$V_{Rd,z}$	$M_{Rd,z}$	$V_{Rd,y}$	FCD <sup>(1)</sup>	$N_{b,Rd,y}$	$N_{b,Rd,z}$	$M_{b,Rd}$	$V_{b,Rd}$	Ver. <sup>(2)</sup>	Ver. <sup>(2)</sup>
Classe 3	kN	kN.m	kN	kN.m	kN		kN	kN	kN.m	kN	(6.61)	(6.62)
<i>AciariUM</i>	3208	703	785	49	1067	60%	2615	2627	431	684	97%	97%
<i>Robot SA</i>	3208	703	942	49	1067	60%	2531	2646	431	-	97%	98%
<i>CYPE 3D</i>	3208	703	785	49	1067	60%	-	-	604	678	70%	70%

**Tabela 4:** Verificação aos ELU da Viga B<sub>2</sub> (IPE 330 – Perfil laminado a quente)

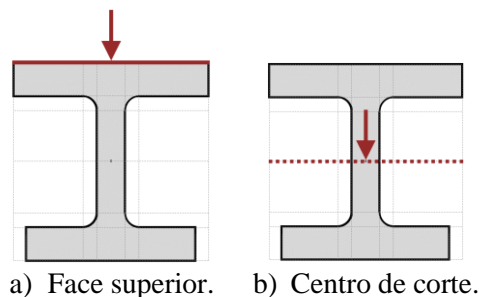
Secção	$N_{c,Rd}$	$M_{Rd,y}$	$V_{Rd,z}$	$M_{Rd,z}$	$V_{Rd,y}$	FCD <sup>(1)</sup>	$N_{b,Rd,y}$	$N_{b,Rd,z}$	$M_{b,Rd}$	$V_{b,Rd}$	Ver. <sup>(2)</sup>	Ver. <sup>(2)</sup>
Classe 1	kN	kN.m	kN	kN.m	kN		kN	kN	kN.m	kN	(6.61)	(6.62)
<i>AciariUM</i>	1722	221	489	42	625	27%	849	1495	167	-	80%	45%
<i>Robot SA</i>	1722	221	489	42	671	27%	849	1495	167	-	79%	45%
<i>CYPE 3D</i>	1722	221	393	42	628	27%	843	1495	204	-	67%	39%

(1) Verificação á flexão composta desviada, secção 6.2.9 da NP EN 1993-1-1 [1]; (2) Verificação da estabilidade global, expressões 6.61 e 6.62 da NP EN 1993-1-1 [1].



Os resultados extraídos da ferramenta *AciariUM* consideram para efeitos de cálculo os esforços determinados pelo *Robot Structural Analysis* que apresentam diferenças inferiores a 3% relativamente aos determinados pelo *CYPE 3D*. Estão à partida justificadas ligeiras diferenças nos resultados fornecidos pelo *CYPE 3D* relativamente às outras abordagens (Tabelas 2, 3 e 4).

O *CYPE 3D* não permite considerar a carga aplicada ao nível da face superior da secção transversal (Fig. 16a), permite apenas prevê-la posicionada ao nível do centro de corte da mesma secção (Fig. 16b). Para os casos em que é a face superior a posição de aplicação da carga, ao não ter em conta o efeito desfavorável causado pela referida excentricidade, o *CYPE 3D* afasta-se dos resultados fornecidos pelas restantes abordagens pelo lado da insegurança.



a) Face superior. b) Centro de corte.  
**Fig. 16:** Posição de aplicação da carga.

A consideração de diferentes áreas resistentes aos esforços transversos ( $A_v$ ) pelas abordagens conduz a diferenças nos resultados relativos à resistência aos esforços transversos.

## 5. Considerações finais

Como conclusão são listadas as seguintes considerações finais principais:

1. Justifica-se a importância de dispor de ferramentas de utilização simples, como a *AciariUM*, que permitam validar de forma sistemática os principais parâmetros devolvidos pelos programas de análise estrutural. A ligação da ferramenta com o *Robot Structural Analysis* permite rápida comunicação de dados entre os dois tornando o processo rápido e simples.
2. A ferramenta *AciariUM* aproxima o processo de cálculo, no que diz respeito ao controlo que o utilizador tem sobre esse processo e sobre os resultados, do cálculo manual. Todo o algoritmo de cálculo relativo a cada parâmetro está disponível para consulta.
3. A ferramenta *AciariUM* é editável por qualquer utilizador e tem portanto grande margem para progressão. Algumas propostas estão apresentadas para continuação deste projeto [5].
4. A utilização de programas de cálculo estrutural implica conhecer as particularidades do software para adequar estratégias de modelação em função das suas características.
5. O trabalho desenvolvido para validação da ferramenta *AciariUM* atesta a sua eficiência.

## Notação

$L$	Comprimento total do elemento viga-coluna
$L_{cr}$	Comprimento de encurvadura em torno do eixo considerado
$L_{cr,z}^{Banzo}$	Comprimento de encurvadura lateral do banzo considerado.
$l$	Comprimento entre secções lateralmente contraventadas
$l_{sup}$	Comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo superior
$l_{inf}$	Comprimento entre secções lateralmente contraventadas no banzo inferior
$k_z$	Fator de comprimento efetivo referente a rotações das secções extremas em torno do eixo de menor inércia $z$
$k_w$	Fator de comprimento efetivo referente às restrições ao empenamento das secções extremas.
$z_g$	Distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte da secção

$z_j$	Parâmetro que reflete o grau de assimetria da secção transversal
$I_z$	Momento de Inércia em relação ao eixo z
$I_w$	Constante de empenamento
$I_T$	Constante de torção de St.Venant
$E$	Módulo de elasticidade ( $E = 210$ GPa)
$G$	Módulo de distorção
$M_{cr}$	Momento crítico para a encurvadura lateral
$N_{c,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão
$M_{Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo considerado
$V_{Rd}$	Valor de cálculo do esforço transversal resistente na direção considerada
$N_{b,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura em torno do eixo considerado
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral
$V_{b,Rd}$	Valor de cálculo do esforço transversal resistente à encurvadura por esforço transversal

## Agradecimentos

É dirigido um especial agradecimento: à CASAIS – Engenharia e Construção, S.A. e à Universidade do Minho por acolherem este projeto; aos suportes dos programas *CYPE 3D* e *Robot Structural Analysis* pela disponibilidade com que interagiram com os autores deste projeto sempre que a sua intervenção foi solicitada.

## Referências

- [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] NP EN 1993-1-5. 2012, Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço, Parte 1-5: Elementos estruturais constituídos por placas. CT 115 (LNEC).
- [3] SILVA, L. A. P. S., SIMÕES, R. e GERVÁSIO, H., Design of Steel Structures, ECCS, Ernst Sohn, 2010.
- [4] SILVA, L. A. P. S. e GERVÁSIO, H., Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados, CMM, 2007.
- [5] EIRA, J.M.M., Desenvolvimento de ferramenta vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 1993-1-1. Guimarães, Outubro 2015.
- [6] ENV 1993-1-1 (Annex F). 1992, Eurocode 3 – Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Afnor.
- [7] VALENTE, M.I.B, Apontamentos Teóricos e Práticos de Estruturas Metálicas, Universidade do Minho, 2014.
- [8] BEG, Darko, KUHLMANN, Ulrike, DAVAINÉ, Laurence e BRAUN, Benjamin, Design of Plated Structures, ECCS, Ernst Sohn, 2010.
- [9] 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.
- [10] SCHILEICH, J.B., MATHIEU, J. e CONAN, Y., Design Handbook for Braced or Non-Sway Steel Buildings According to Eurocode 3, ECCS, 2000.