



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Estruturas

PROJETO DE PASSARELA COMPOSTA DE PERFIS TUBULARES EM AÇO

Rafael Brand Ruas

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Co-orientador: Augusto Claudio Paiva e Silva

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

PROJETO DE PASSARELA COMPOSTA DE PERFIS TUBULARES EM AÇO

Rafael Brand Ruas

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Eduardo de Miranda Batista (Orientador)

Prof. Associado,D.Sc., EP/UFRJ

Ricardo Valeriano Alves

Prof. Associado,D.Sc., EP/UFRJ

Alexandre Landesmann

Prof. Associado,D.Sc., FAU/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

AGOSTO de 2013

Ruas, Rafael Brand

Projeto de Passarela Composta de Perfis Tubulares em Aço /
Rafael Brand Ruas. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica,
2013.

II, 112p.: il.; 29,7cm

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Co-orientador: Augusto Claudio Paiva e Silva

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de
Engenharia Civil, 2013,

Referências Bibliográficas: p.109

1. Estrutura de Aço. 2. Perfis Tubulares de Aço. 3. Estrutura de
Passarela. 4. Levitação Magnética. 5. MagLev.

I. Batista, Eduardo de Miranda. II. Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III.
Título

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Civil

Projeto de Passarela Composta de Perfis Tubulares em Aço

Rafael Brand Ruas

Agosto/2013

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Co-orientador: Augusto Claudio Paiva e Silva

Curso: Engenharia Civil

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento de uma passarela composta de perfis tubulares em aço. O estudo compreende a determinação dos esforços solicitantes, o dimensionamento dos elementos, bem como a verificação das ligações. A análise da estrutura e o dimensionamento dos componentes estruturais foram desenvolvidos com base nas prescrições do Projeto de Norma Brasileira ABNT/CB-02 PN 02:125.03-004, *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*.

Palavras-chave: Estrutura de Aço, Perfis Tubulares de Aço, Estrutura de Passarela, Levitação Magnética, MagLev.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

Design of a Foot Bridge Steel Structure Applying Tubular Members

Rafael Brand Ruas

August/2013

Advisor:

Eduardo de Miranda Batista

Augusto Claudio Paiva e Silva

Course: Civil Engineering

The present study is addressed to the design of a foot bridge steel structure applying tubular members and includes structural analysis and safety check of members and connections. Analysis and design of the tubular members follow the prescriptions of the new Brazilian code ABNT/CB-02 PN 02:125.03-004, *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*.

Keywords: Steel Structure, Steel Tubular Members, Foot Bridge Structure, Magnetic Levitation, MagLev.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	2
3. MATERIAIS	7
4. MODELO ESTRUTURAL	8
4.1. Geometria	8
4.1.1. Colunas	8
4.1.2. Banzo Superior	8
4.1.3. Estaqueamento	9
4.1.4. Vigas Treliçadas	10
4.1.5. Tabuleiro	13
4.2. Imagens do Modelo	14
4.3. Restrições dos apoios	15
4.4. Materiais	15
4.5. Propriedades Geométricas dos Elementos de Barra	16
4.6. Ações e carregamentos	19
4.6.1. Ação permanente de peso próprio da estrutura metálica	19
4.6.2. Ação de sobrecarga permanente na estrutura metálica	20
4.6.3. Ação variável: veículo Maglev	20
4.6.4. Ação variável de temperatura	22
4.6.5. Ação variável devido ao vento	22
4.6.6. Lista de Carregamentos	24
4.7. Combinações	24

4.8.	Resultados da análise da estrutura	25
5.	DIMENSIONAMENTO	36
5.1.	Banzo Inferior – 360 x 210 x 8,8 VMB300	38
5.2.	Banzo Superior – 141,3 x 10,0 VMB300	46
5.3.	Diagonais – 101,6 x 6,4 VMB350	50
5.4.	Transversinas – 150 x 150 x 6,4 VMB350	54
5.5.	Travessas – 400x200x16,0 VMB350 + 200x150x12,5 VMB350 (deitado)	62
5.6.	Colunas – 355,6 x 25,0 VMB350	67
5.7.	Laje	76
5.8.	Resumo verificações	76
6.	LIGAÇÕES	77
6.1.	Ligação Diagonal – Banzo Inferior	78
6.2.	Ligação Diagonal – Banzo Superior	91
6.3.	Soldas das Ligações Diagonais – Banzos	96
6.4.	Ligações flangeadas da Treliça	98
7.	ANÁLISE DO BANZO SUPERIOR	105
8.	CONCLUSÃO	106
	REFERÊNCIAS	109
	ANEXO A. Sondagens.	110
	ANEXO B. Efeito P-Delta - Método de Cálculo.	111

1. INTRODUÇÃO

O presente Projeto Final de Curso (PFC) se refere a uma passarela em aço para suporte do veículo de levitação magnética Maglev, desenvolvido na COPPE/UFRJ. O Projeto Final foi desenvolvido pelo aluno com base em dados e informações colhidos no projeto estrutural elaborado pela Tecton Engenharia, onde o aluno esteve como estagiário de Engenharia Civil, tendo participado do referido trabalho. O presente PFC é um documento acadêmico e não se propõem a apresentar a verificação do projeto estrutural que deverá ser executado no Campus da Cidade Universitária da UFRJ.

A UFRJ está desenvolvendo a tecnologia Maglev Cobra [1]. O MagLev Cobra é uma proposta de veículo urbano de levitação magnética que utiliza supercondutores e o campo magnético produzido por ímãs para obter a levitação. A tração é obtida através de um motor linear. Conforme indicado pelos idealizadores do sistema Maglev, a proposta destaca-se por ser:

- Ecologicamente correta, com menor poluição (movido pela energia elétrica, predominantemente no Brasil de origem hidráulica, sem nenhuma emissão de gases poluentes) e menor consumo energético;
- Economicamente correta, pois apresenta menor custo de implantação (1/3 do necessário para um metrô) e manutenção;
- Tecnicamente correta, tendo em vista que a levitação magnética supercondutora é mais vantajosa que o método eletromagnético e eletrodinâmico;
- Politicamente correta, uma vez que está calcada em tecnologia nacional com oportunidades para crescimento industrial e científico;
- Socialmente correta, já que facilitará a mobilidade nas grandes cidades.

A FAPERJ e o BNDES apoiaram o projeto, investindo nas pesquisas que estão em processo de viabilização de um protótipo funcional em escala real. Este protótipo em escala real operará em uma linha de testes com 160,7m de extensão em uma área já indicada pela prefeitura da Cidade Universitária, ligando os dois Centros de Tecnologia.

A UFRJ numa parceria com a Vallourec & Mannesmann do Brasil VMB [2] obteve os tubos de aço que irão compor a passarela. Dentre as vantagens de se utilizar estruturas com perfis tubulares podemos citar:

- Resistem de maneira econômica a esforços combinados de compressão e torção;
- Propiciam soluções leves devido a sua elevada resistência e baixo peso próprio, conforme pode ser consultado no Projeto Final de Curso do DES de autoria de Rafaela Pillar [3];
- Os tubos podem ser preenchidos com concreto e utilizados como pilares mistos, ganhando resistência adicional a esforços de compressão e flexão e melhor proteção contra fogo;
- Possuem menor área de superfície externa se comparadas às seções abertas, o que conduz à redução de custos como pintura, proteção contra fogo, facilitando os serviços de manutenção e minimizando seus valores.

2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A geometria da estrutura foi desenvolvida a partir de informações de referência que se encontram no projeto original de arquitetura, conforme ilustrado nas figuras 2.1 e 2.2.

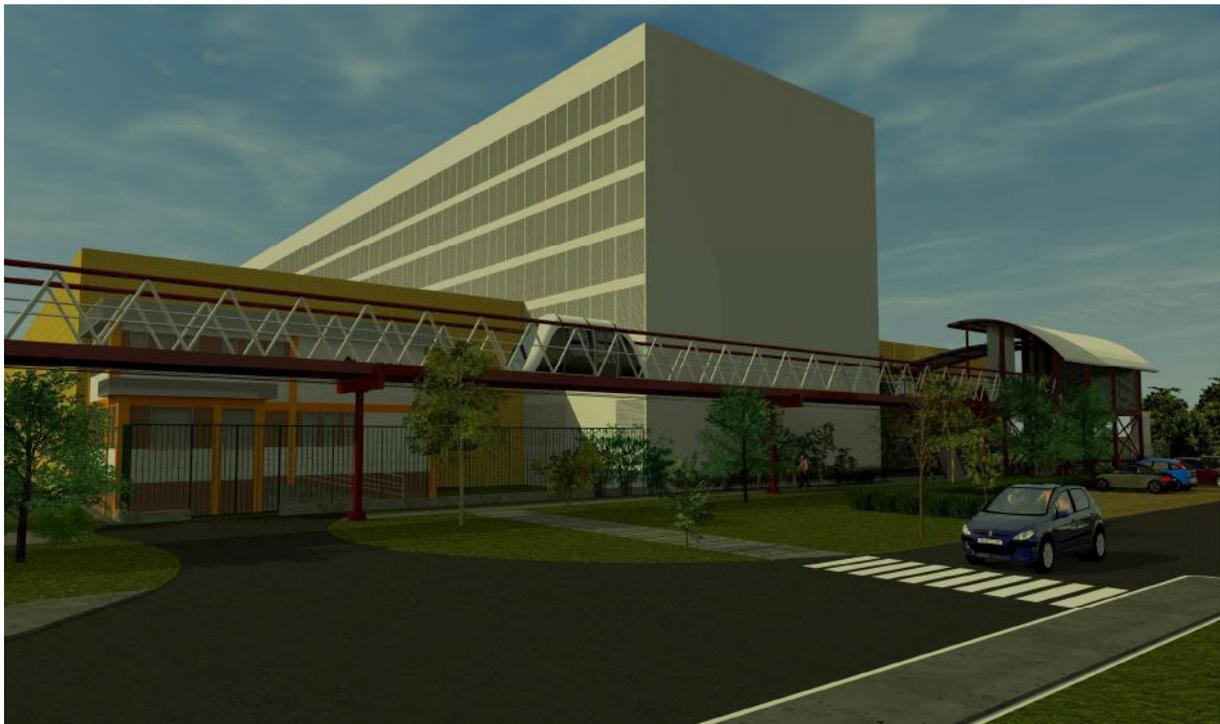


Figura 2.1 – Perspectiva da passarela e estação

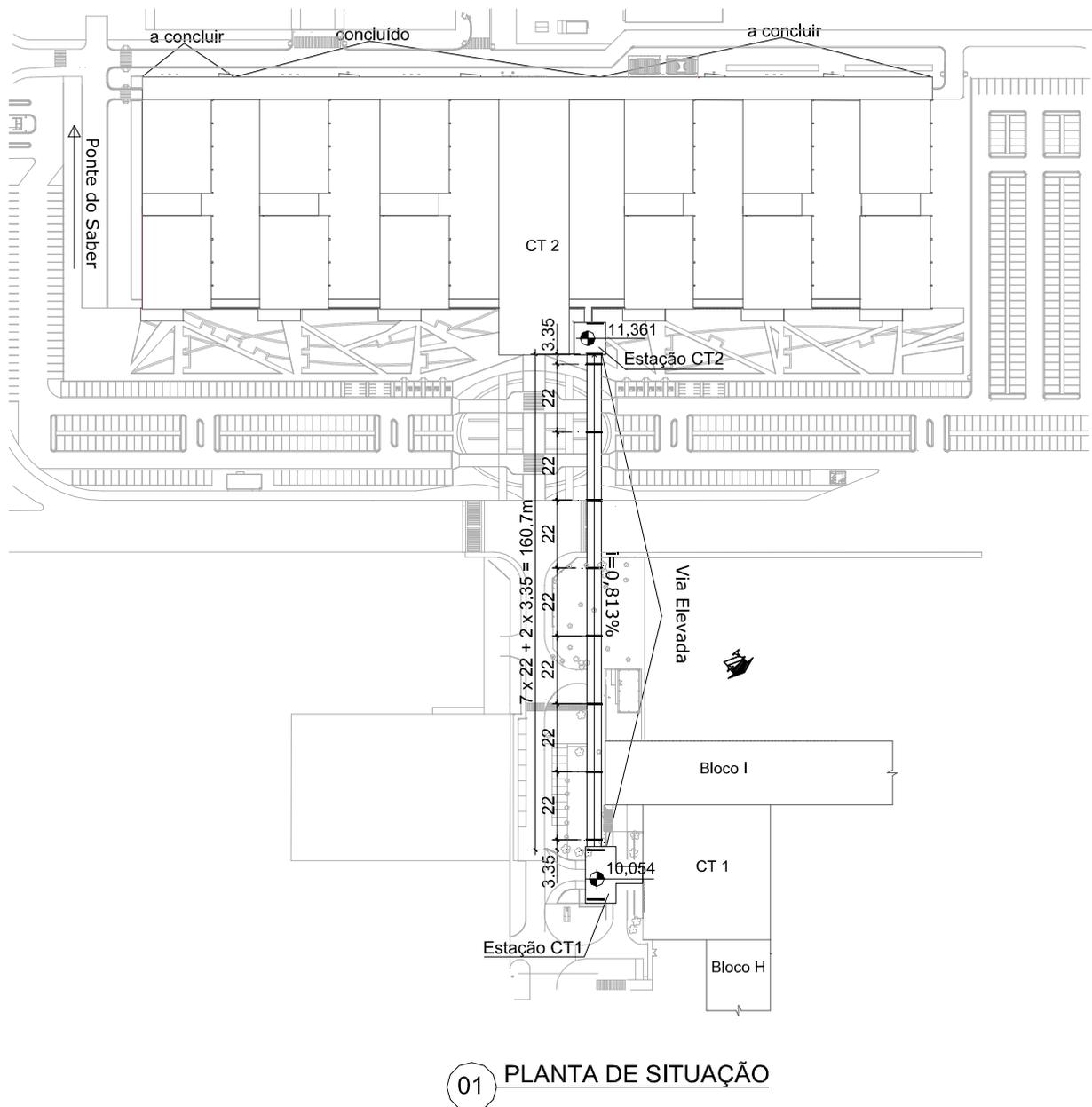


Figura 2.2 – Planta de situação da passarela e estações

A estrutura é composta por:

- Sete vãos internos de 22,0m e dois balanços nas extremidades de 3,35m, totalizando 160,7m;
- Treliças laterais superiores, contínuas em todos os vãos, e unidas nos banzos inferiores por meio de transversinas;
- Laje com forma metálica nervurada (tipo steel deck), apoiada e fixada nas transversinas por meio de conectores pino com cabeça, não havendo ligação dessa laje com a estrutura das treliças;

- Travessas em balanço nas quais se apoiam as treliças;
- Pilares em tubo de aço preenchidos com concreto;
- Fundação profunda em estacas de aço;
- A estrutura da passarela tem juntas nas extremidades em relação às estruturas das estações.
- A estabilidade lateral das treliças é conferida pela ligação rígida das diagonais das treliças com as transversinas formando um pórtico invertido (fig.2.3 e fig.2.6).

As figuras 2.3 a 2.6 apresentam a geometria da passarela (dimensões em mm):

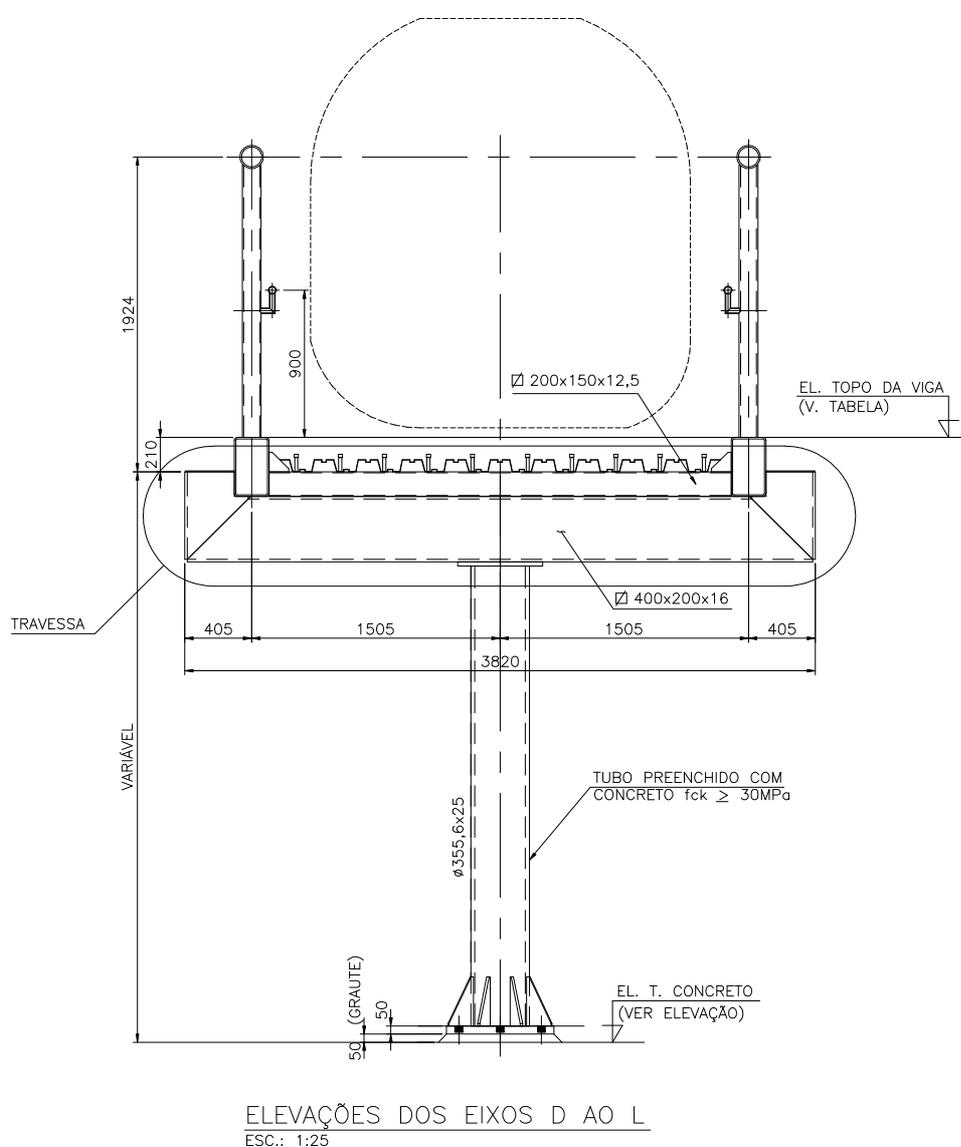


Figura 2.3 – Elevação transversal na região da coluna e travessa

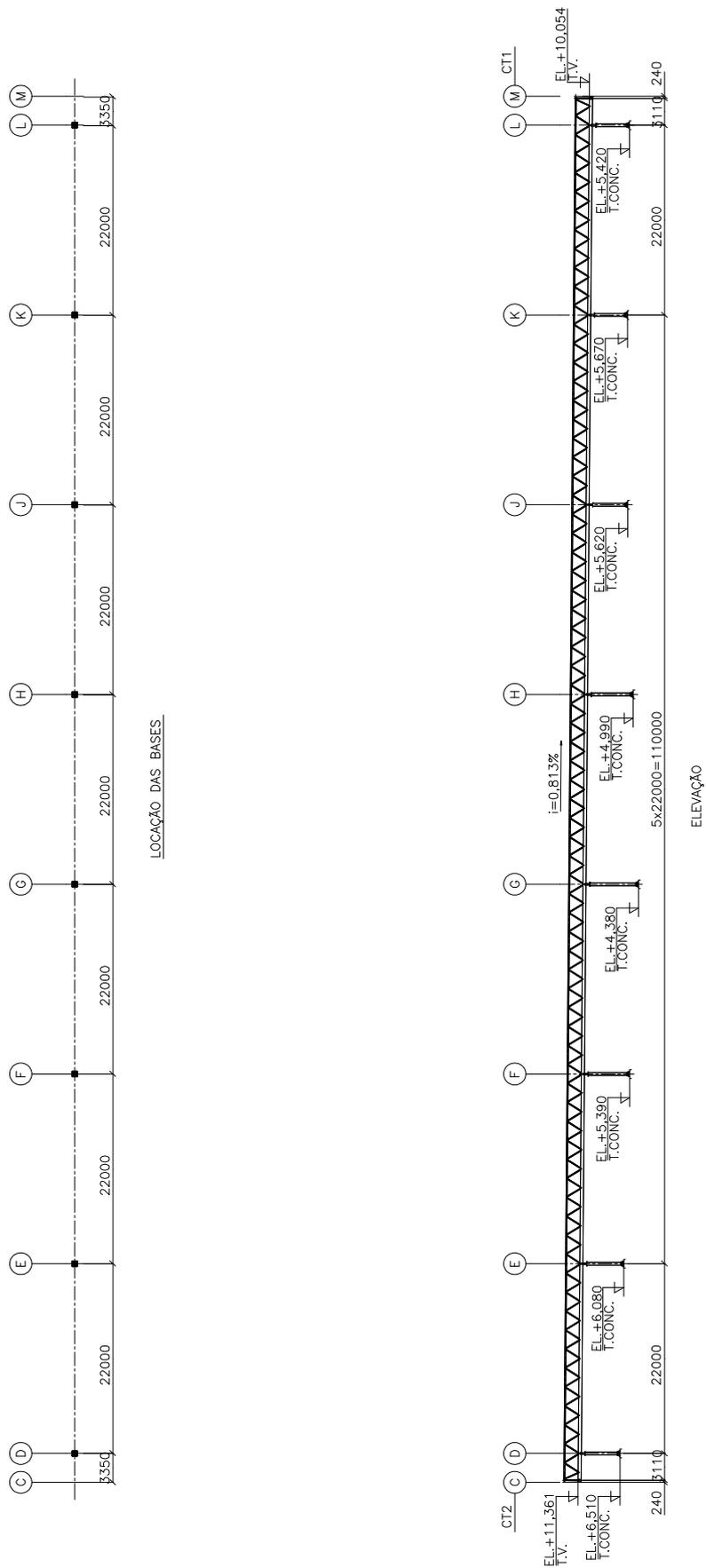


Figura 2.4 – Plano das bases e elevação lateral

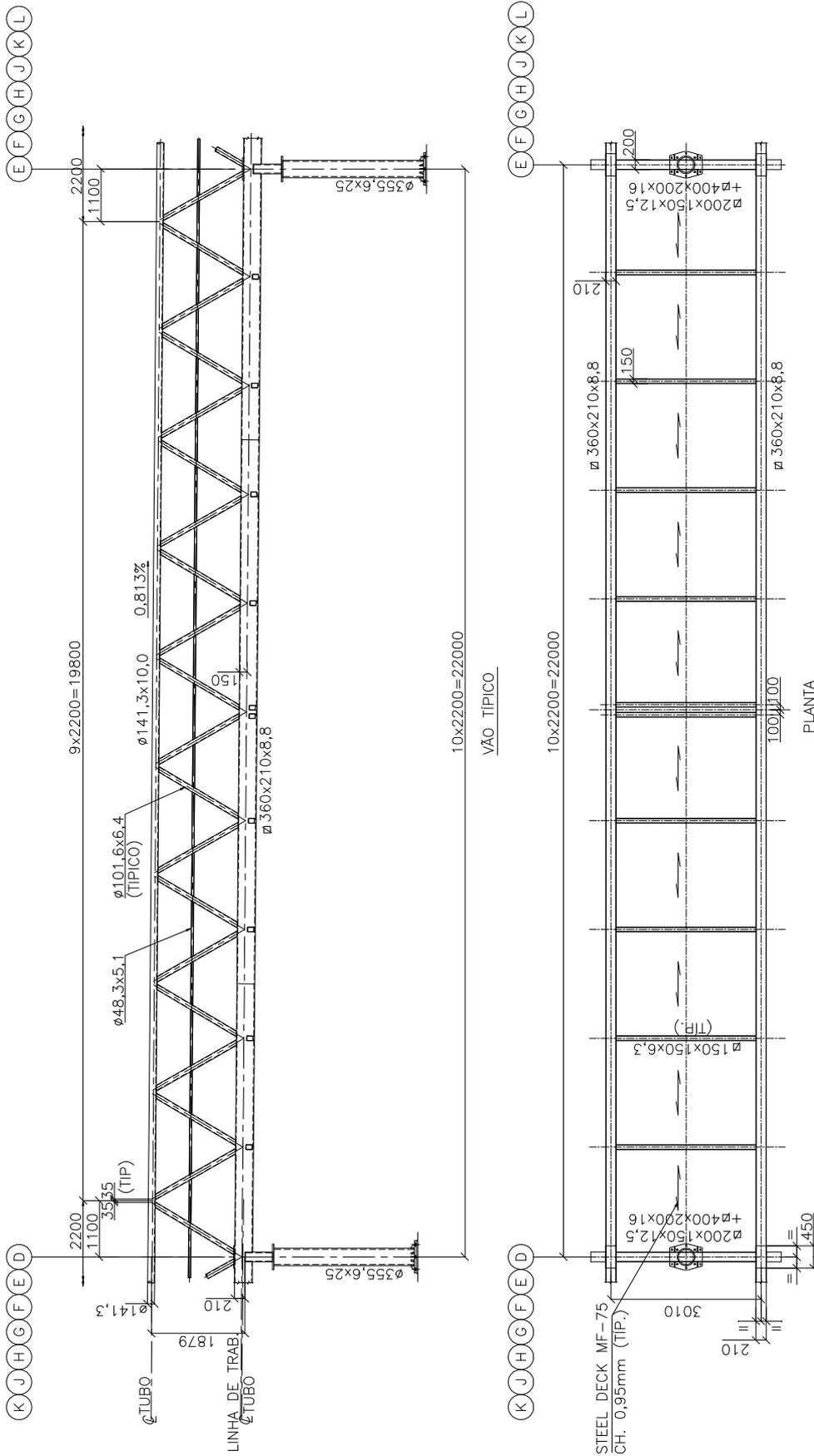


Figura 2.5 – Elevação lateral e planta do vão típico

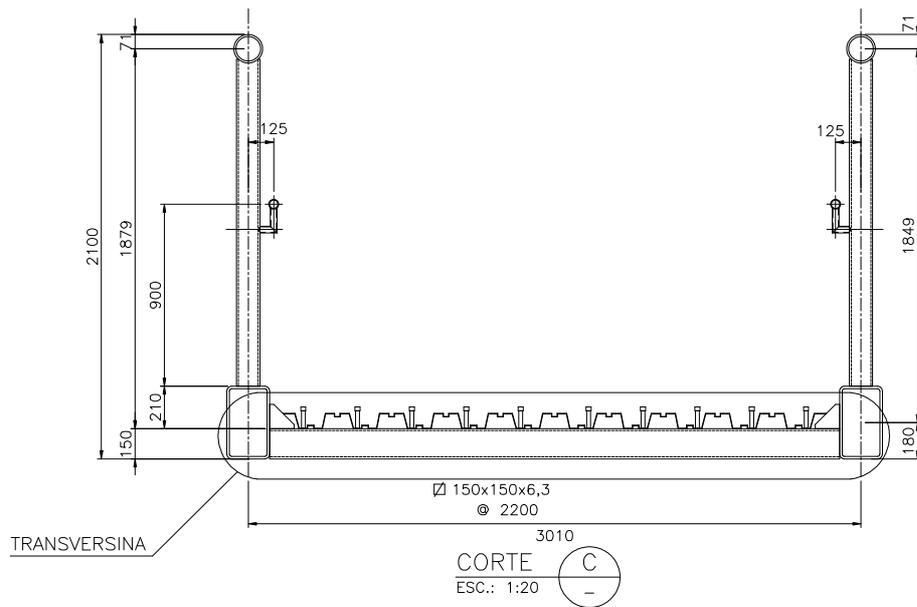


Figura 2.6 – Seção transversal no vão mostrando a transversina

3. MATERIAIS

a) Perfis Tubulares:

Aço VMB250 ($f_y = 250$ MPa; $f_u = 400$ MPa)

Aço VMB300 ($f_y = 300$ MPa; $f_u = 415$ MPa)

Aço VMB350 ($f_y = 350$ MPa; $f_u = 485$ MPa)

b) Chapas:

Aço ASTM A572 Gr.50 ($f_y = 345$ MPa; $f_u = 450$ MPa)

c) Soldas:

Eletrodo E70 ($f_w = 485$ MPa)

d) Concreto:

Concreto C30 ($f_{ck} = 30$ MPa)

e) Estacas:

Aço ASTM A572 Gr.50 ($f_y = 345$ MPa; $f_u = 450$ MPa)

Onde:

f_y : resistência ao escoamento do aço;

f_u : resistência à ruptura do aço;

f_w : resistência à ruptura da solda;

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão.

4. MODELO ESTRUTURAL

Na análise estrutural foi utilizado o programa STRAP V2011 [4]. Os perfis da estrutura foram modelados como barras espaciais e a laje como malha do tipo placa com elementos finitos retangulares. O material utilizado é elástico linear.

4.1. Geometria

A seguir algumas considerações a respeito da geometria da estrutura metálica, adotada para a análise com auxílio do modelo computacional.

4.1.1. Colunas

De acordo com a NBR8800/2008 [5] item 4.9.7.1.1, para a determinação dos esforços solicitantes nos estados limites últimos, os efeitos das imperfeições geométricas iniciais do pilar foram levados em conta na análise por meio da consideração de um desaprumo desse pilar na direção transversal da passarela de valor igual a $H/333$. Sendo H a sua altura.

$$H = 5,657\text{m (comprimento da maior coluna)}$$

$$\Delta = H / 333 = 5,657 / 333 = 0,017\text{m (desaprumo)}$$

Foram adotados perfis tubulares 355,6 x 25,0 VMB350 para as colunas, conforme indicado no seu dimensionamento.

4.1.2. Banzo Superior

O banzo superior da viga treliçada tem papel fundamental na estabilidade lateral, devido ao fato do sistema estrutural (respeitando o projeto de arquitetura original) se apresentar sem contenção lateral. Essa concepção resultou do fato das treliças se apresentarem com altura inferior ao gabarito de trânsito do veículo Maglev, portanto sem possibilidade de adotar contraventamento horizontal ligando os banzos superiores das duas treliças.

A deformada foi estudada a partir da análise linear da estrutura, com um carregamento aplicado referente à passarela de pedestres ($5,0 \text{ kN/m}^2$) ao longo da passarela e em vãos alternados, onde observou-se que no meio do vão o banzo superior se desloca horizontalmente para dentro da estrutura, resultando em uma flecha de 1,18mm. Na região dos apoios constatamos um pequeno deslocamento horizontal para fora. Ocorre uma inversão de

momentos fletores no pórtico invertido e a corda superior fica com o aspecto de uma senóide desenvolvida no plano horizontal.

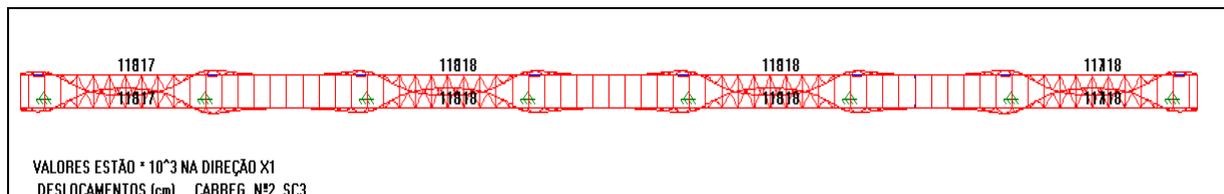


Figura 4.1 – Detalhe da deformada da corda superior

Para a determinação dos esforços solicitantes, e de forma que se obtenha uma imperfeição inicial ao levar em conta os efeitos de segunda ordem, foram adotadas imperfeições geométricas iniciais nas cordas superiores das treliças. Seus valores foram considerados de acordo com a NBR8800/2008 [5] item 4.9.7.1.1, dirigido a estruturas classificadas com pequena ou média deslocabilidade. Foi feita uma associação do banzo superior (bi-rotulado) com uma coluna (engastada) de acordo com a figura 4.2.

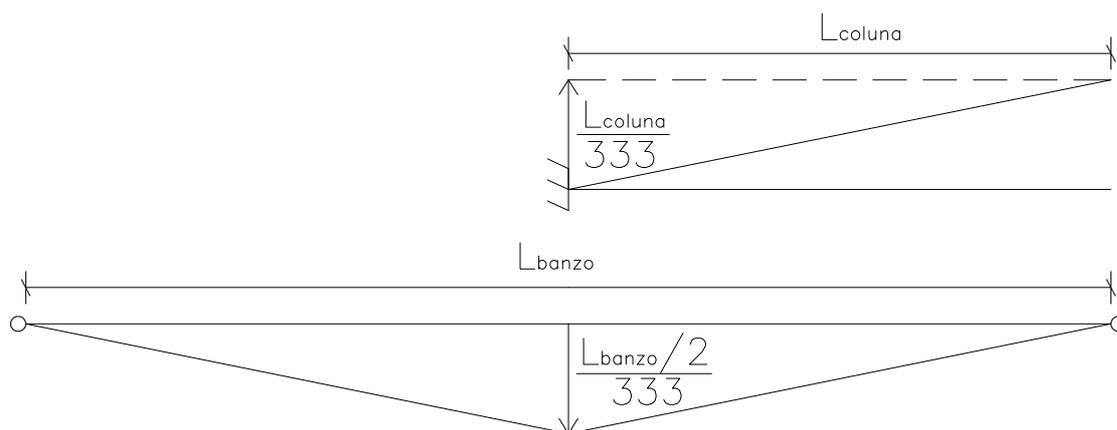


Figura 4.2 – Esquema da associação banzo superior - coluna

Foi adotado um deslocamento horizontal relativo do nó do meio do vão dessa corda, em todos os vãos, assemelhando-se a deformada da figura 4.1. Esse deslocamento foi de $(L/2)/333$ para dentro da passarela, sendo L o comprimento da corda no vão.

$$\Delta = (L/2) / 333 = (22,0\text{m}/2) / 333 = 11,0\text{m} / 333 = 0,033\text{m (imperfeição)}$$

4.1.3. Estaqueamento

As fundações serão compostas de blocos de 3 estacas metálicas. As estacas foram modeladas adotando a hipótese de que o topo da estaca esteja solidário ao bloco (estaca rotulada na extremidade superior) e engastada na extremidade inferior a uma profundidade de

acordo com seu comprimento de engastamento fictício no solo. Analisando as sondagens verificou-se que o solo predominante é areia fofa submersa, onde a camada de aterro foi considerada como o mesmo material. A sondagem SP-04, que é representativa do solo, encontra-se no anexo A. O valor de n_h (coeficiente de reação lateral do solo) foi retirado das tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Compacidade das areias em função do SPT [6]

Resistência à penetração (número N _{spt})	Compacidade da areia
0 a 4	muito fofa
5 a 8	fofa
9 a 18	compacidade média
18 a 40	compacta
acima de 40	muito compacta

Tabela 4.2 – Valores típicos de n_h [7]

Tipo de solo	Seca (kN/m ³)	Subm. (kN/m ³)
Areia fofa	2600	1500
Areia méd. compacta	8000	5000
Areia compacta	20000	12500
Areia muito fofa sob carregamento rep.	-	400
Silte muito fofo, org.	-	100 a 300
Argila muito mole cargas estáticas	-	550
Argila muito mole cargas dinâmicas	-	300

O comprimento de engastamento fictício foi calculado de acordo com o método de Davisson e Robinson [7]. Foram adotados perfis laminados a quente (HP 250 x 62,0) padrão Gerdau [8]. Segue seu valor obtido a partir do programa Mathcad [9].

$$E_t = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do material da estaca})$$

$$I_t = 8728\text{cm}^4 \quad (\text{momento de inércia da estaca desconsiderando o desconto de 1mm da superfície devido à corrosão – catálogo Gerdau [8]})$$

$$n_h = 1500 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (\text{coeficiente de reação lateral para estacas imersas em solos arenosos})$$

$$L_s = 1.8 \cdot \sqrt[5]{\frac{E_t \cdot I_t}{n_h}} = 2.941 \text{ m} \quad (\text{comprimento de engastamento fictício segundo o método de Davisson e Robinson [7]})$$

4.1.4. Vigas Treliçadas

Estudos de pré-dimensionamento das vigas treliçadas conduziram à adoção de:

- A razão entre o comprimento L_i , medido entre os nós, e a altura da seção transversal das barras h_i , no plano da treliça, é superior a 6 (PN tubos [10] item 4.2) $\rightarrow L_1/h_1 = L_2/h_2 = 2177\text{mm}/101,6\text{mm} = 21,4 > 6$

- A espessura nominal da parede dos perfis tubulares é superior a 2,5mm (PN tubos [10] item 6.1.2.h).

b) Os momentos fletores resultantes de excentricidade nos nós foram considerados no dimensionamento das ligações do banzo superior e desprezados no dimensionamento das ligações do banzo inferior, de acordo com os seguintes limites de excentricidade (PN tubos [10] item 4.6):

- $-0,55 d_0 \leq e \leq 0,25 d_0$, para tubos circulares \rightarrow banzo superior: $e = +59,8\text{mm} > 0,25 \times 141,3\text{mm} = +35,3\text{mm}$

- $-0,55 h_0 \leq e \leq 0,25 h_0$, para tubos retangulares \rightarrow banzo inferior: $-0,55 \times 360\text{mm} = -198\text{mm} < e = -30\text{mm} < +0,25 \times 360\text{mm} = +90\text{mm}$

onde:

e : excentricidade

d_0 : diâmetro do banzo

h_0 : altura da seção transversal do banzo no plano da treliça

c) Os momentos fletores resultantes das excentricidades nos nós do banzo superior foram considerados no dimensionamento. Os momentos fletores resultantes das excentricidades nos nós do banzo inferior foram desprezados por não terem valores significativos. Essas excentricidades foram consideradas diretamente na análise, utilizando-se o modelo de diagonais chegando em barras muito rígidas engastadas nos banzos, representado na figura 4.4.

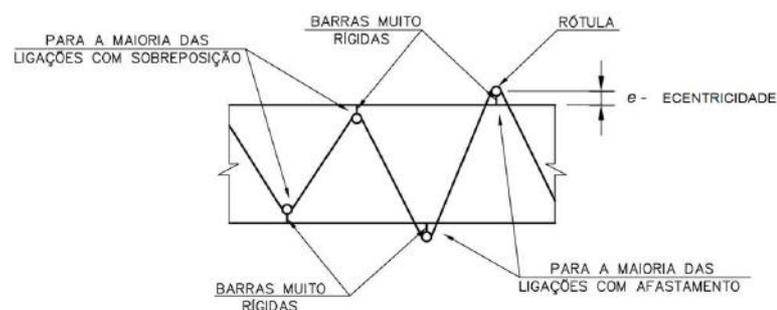


Figura 4.4 – Modelo de análise recomendado (PN tubos [10] item 4.5)

4.1.5. Tabuleiro

Para a consideração das excentricidades no plano do tabuleiro foram adotados offsets nos nós das barras das transversinas e nós da malha da laje.

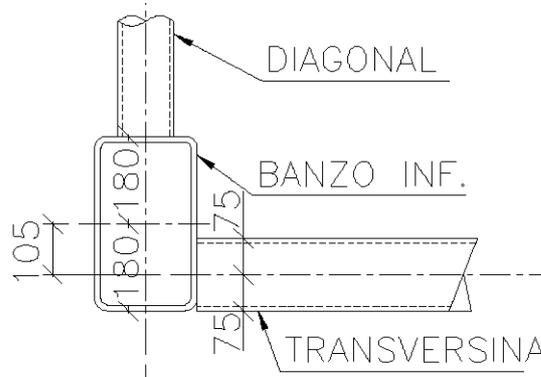


Figura 4.5 – Excentricidade entre o CG da transversina e o CG do banzo inferior

Tabela 4.3 – Propriedades da seção transversal da laje

RESUMO DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES	
H =	160,0 mm
Yi =	93,5 mm
Ys =	66,5 mm
Legenda:	
H = altura total da seção transversal	
Yi = distância do CG à fibra inferior	
Ys = distância do CG à fibra superior	

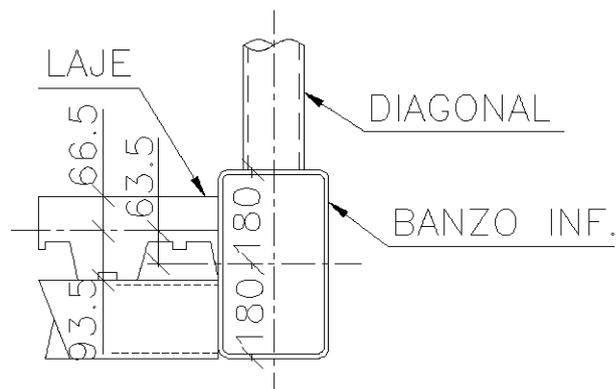


Figura 4.6 – Excentricidade entre o CG da laje e o CG do banzo inferior

Logo:

- Offset dos nós da transversina (OF1): -0,105m;
- Offset dos nós da laje: +0,064m.

Figura 4.8 – Detalhe do plano do tabuleiro com numeração das propriedades

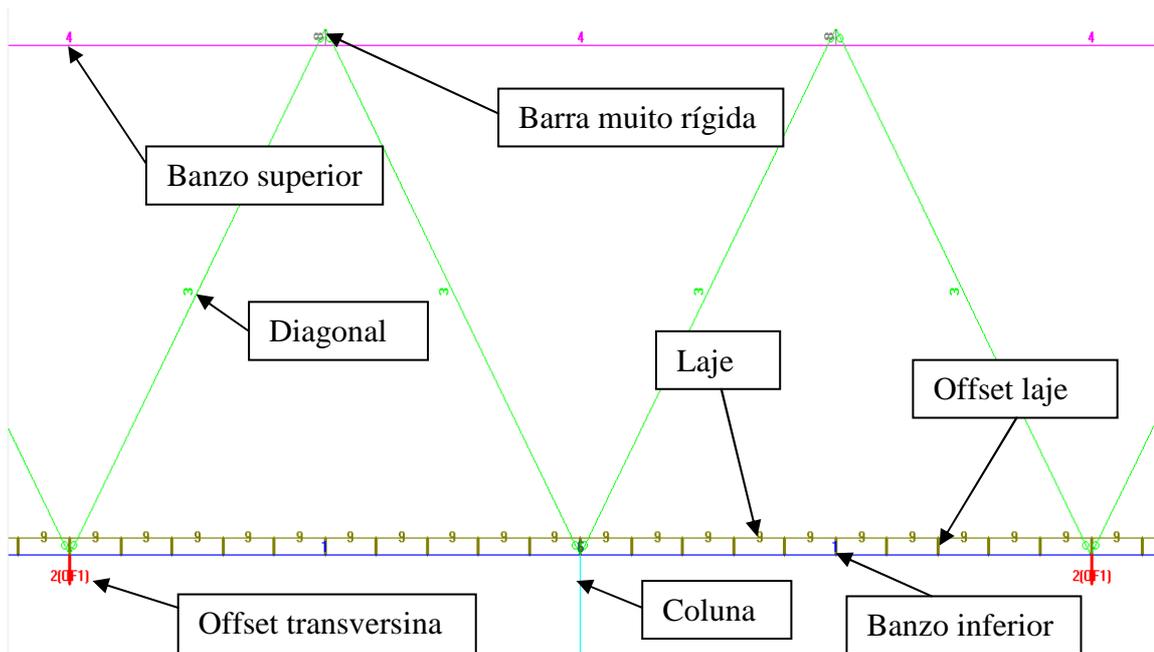


Figura 4.9 – Detalhe da vista lateral com numeração das propriedades

4.3. Restrições dos apoios

Todos os graus de liberdade dos nós dos apoios foram restringidos, condição adotada de acordo com o método do comprimento de engastamento fictício de Davisson e Robinson [7].

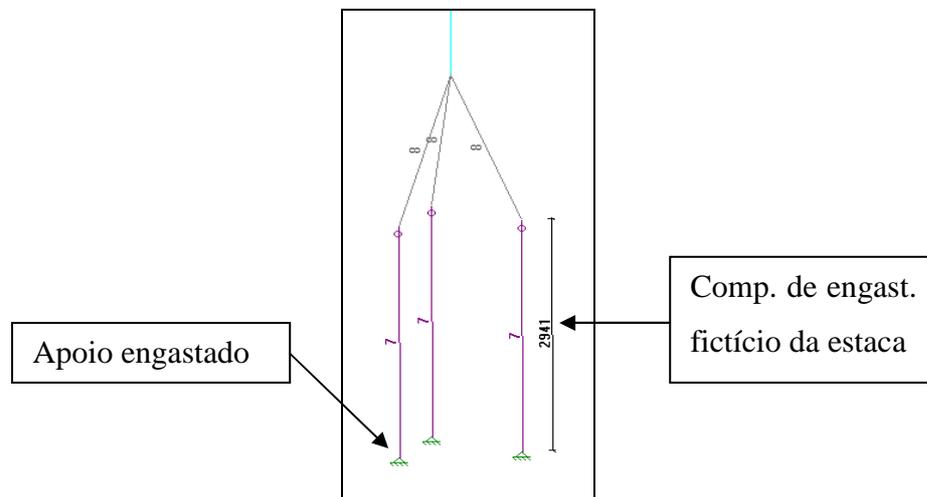


Figura 4.10 – Detalhe dos apoios

4.4. Materiais

De acordo com a NBR8880/2008 [5] item 4.9.7.1.2, para a determinação dos esforços solicitantes nos estados limites último, foi criado o material .8ST. Seu módulo de elasticidade

é igual ao módulo de elasticidade do aço multiplicado por 0,8 ($E_{.8ST} = 0,8 E_{aço}$). Esse material leva em conta na análise, reduzindo-se a rigidez à flexão e rigidez axial das barras para 80% dos valores originais, os efeitos das imperfeições iniciais de material. Essa consideração se dirige a edificações classificadas como de média deslocabilidade na NBR8800/2008 [5]. No caso presente a classificação da deslocabilidade da passarela não foi aferida.

O material FICT foi criado sem densidade, sendo utilizado nas barras muito rígidas que consideram as excentricidades da treliça no modelo estrutural. Esse material também é utilizado para representar o bloco de coroamento das estacas. Seu módulo de elasticidade é igual a dez vezes o módulo de elasticidade do aço ($E_{fict} = 10 E_{aço}$).

A tabela 4.4 é saída do programa STRAP V2011 [4].

Tabela 4.4 – Tabela de materiais

TABELA DE MATERIAIS (unidades – kN; metro; °C)						
N.º	Nome	Módulo de Elasticidade	Coefic. Poisson	Peso Específico	Dilatação Térmica	Módulo Transv.(G)
1	STEEL	0.2000E+09	0.300	0.7850E+02	0.00001200	0.7700E+08
2	.8ST	0.1600E+09	0.300	0.7850E+02	0.00001200	0.6160E+08
3	FICT	0.200E+10	0.300	0.0000E+00	0.00001200	0.7700E+09
4	C30	0.2607E+08	0.200	0.2500E+02	0.00001000	0.1086E+08

4.5. Propriedades Geométricas dos Elementos de Barra

As dimensões das seções transversais dos elementos foram inseridas no programa e suas propriedades geométricas calculadas por este. Essas propriedades calculadas diferem das fornecidas pelo catálogo da V&M [11] devido à desconsideração da curvatura do canto do perfil por parte do programa.

Os elementos foram classificados da seguinte forma:

a) Banzo inferior (propriedade 1):

Seção tubular retangular. Tubo 360 x 210 x 8,8 da V&M;

b) Transversinas (propriedade 2):

Seção tubular quadrada. Tubo 150 x 150 x 6,3 da V&M.

c) Diagonais (propriedade 3):

Seção tubular circular. Tubo 101,6 x 6,4 da V&M.

d) Banzo superior (propriedade 4):

Seção tubular circular. Tubo 141,3 x 10,0 da V&M.

e) Colunas (propriedade 5):

Seção mista em tubo de aço preenchido com concreto. Tubo 355,6 x 25,0 da V&M.

f) Travessas (propriedade 6):

Seção tubular retangular. Representa dois tubos sobrepostos. Tubo 400x200x16,0 + Tubo 200x150x12,5 (deitado), ambos da V&M.

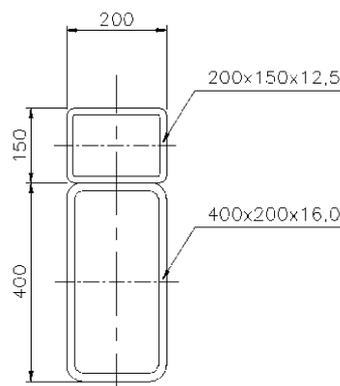


Figura 4.11 – Seção transversal da travessa

g) Estacas (propriedade 7):

Seção I, correspondente ao perfil HP 250 x 62,0 da Gerdau, descontado 1,0mm de sua superfície. Desconto devido à corrosão, de acordo com o catálogo de estacas metálicas da Gerdau [8].

h) Barras muito rígidas (propriedade 8):

Seção circular cheia, de elevada inércia. Essas barras servem para solidarizar os nós extremos das diagonais com os banzos, conforme o modelo recomendado no PN tubos [10] (fig. 4.4).

i) Laje mista (propriedade 9):

Laje com forma metálica. Forma MF-75 [12]. Espessura total da laje de 160mm. Para lajes nervuradas em uma direção, a rigidez na direção perpendicular às nervuras é a

rigidez da laje de espessura T_h e na direção longitudinal é a rigidez da seção T. O material utilizado é isotrópico.

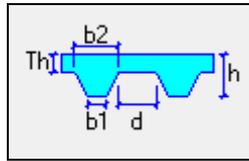


Figura 4.12 – Seção transversal da laje

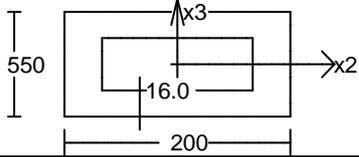
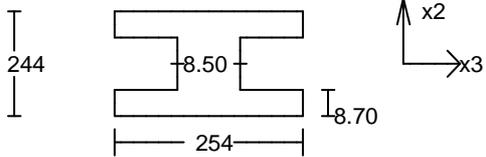
Os perfis utilizados e suas propriedades podem ser encontrados no catálogo da V&M [11].

As tabelas 4.5 e 4.6 são saídas do programa STRAP V2011 [4] e contém as dimensões e propriedades calculadas pelo mesmo.

Tabela 4.5 – Tabela de propriedades

TABELA DE PROPRIEDADES (unidades - mm.)			
PROPRIEDADE N. 1 – BANZO INFERIOR			
A=0.9722E+04	I2=0.1729E+09	I3=0.7461E+08	J=0.1591E+09
Material = 2 - .8ST	Perímetro=1140.0		
PROPRIEDADE N. 2 - TRANSVERSINA			
A=0.3621E+04	I2=0.1249E+08	I3=0.1249E+08	J=0.1869E+08
Material = 2 - .8ST	Perímetro=600.00		
PROPRIEDADE N. 3 - DIAGONAL			
A=0.1914E+04	I2=0.2178E+07	I3=0.2178E+07	J=0.4357E+07
Material = 2 - .8ST	Perímetro=319.18		
	Tubo , Diâmetro= 101.600	Espessura= 6.400	
PROPRIEDADE N. 4 – BANZO SUPERIOR			
A=0.4125E+04	I2=0.8941E+07	I3=0.8941E+07	J=0.1788E+08
Material = 2 - .8ST	Perímetro=443.90		
	Tubo , Diâmetro= 141.300	Espessura= 10.000	
PROPRIEDADE N. 5 - COLUNA			
A=0.3792E+05	I2=0.4265E+09	I3=0.4265E+09	J=0.7671E+09
Material = 2 - .8ST	Perímetro=1117.1		
	Preenchido, Material= 4 - C30		
	Tubo , Diâmetro= 355.600	Espessura= 25.000	

Tabela 4.6 – Tabela de propriedades

TABELA DE PROPRIEDADES (unidades - mm.)					
PROPRIEDADE N. 6 - TRAVESSA $A=0.2298E+05$ $I_2=0.8270E+09$ $I_3=0.1620E+09$ $J=0.4303E+09$ Material = 2 - .8ST Perímetro=1500.0 					
PROPRIEDADE N. 7 - ESTACA $A=0.6346E+04$ $I_2=0.2377E+08$ $I_3=0.6944E+08$ $J=0.1594E+06$ Material = 1 - STEEL Perímetro=1487.0 					
PROPRIEDADE N.8 – BARRA DE LIGAÇÃO DIAGONAL-BANZO / BLOCO COROAMENTO $A=0.1963E+06$ $I_2=0.3068E+10$ $I_3=0.3068E+10$ $J=0.6136E+10$ Material = 3 - FICT Perímetro=1570.7 Circ., Diâmetro= 500.000					
PROPRIEDADE N. 9 – LAJE MISTA $Th = 85.00$ $h=160.00$ $d=119.00$ $b_1=119.00$ $b_2=155.00$ Material = 4 - C30					

4.6. Ações e carregamentos

Para o dimensionamento da estrutura foram consideradas as ações detalhadas nos subitens a seguir. As tabelas 4.7 a 4.11 são saídas do programa STRAP V2011 [4].

4.6.1. Ação permanente de peso próprio da estrutura metálica

O peso próprio é aplicado automaticamente pelo programa com base no peso específico dos materiais e na área da seção transversal dos elementos.

Tabela 4.7 – Somatório da carga de peso próprio da estrutura metálica

Carga n.º 1: PP (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0.
FX2=0.
FX3=-721.

4.6.2. Ação de sobrecarga permanente na estrutura metálica

Para consideração da carga permanente, foi assumido carga uniformemente distribuída de $4,85 \text{ kN/m}^2$. Esse carregamento leva em conta:

a) Peso da laje steel deck, de acordo com o catálogo da Metform [12] (altura da fôrma de aço de 75mm, espessura total da laje de 160mm): $3,02 \text{ kN/m}^2$;

b) Peso da argamassa de cimento e areia para acabamento (espessura de 50mm): $0,05 \text{ m} \times 22 \text{ kN/m}^3 = 1,10 \text{ kN/m}^2$;

c) Peso dos trilhos de imã para o veículo Maglev (2 trilhos, cada trilho com peso linear de $0,5 \text{ kN/m}$, distribuídos pela largura da passarela de 3,01m): $2 \times 0,5 \text{ kN/m} / 3,01 \text{ m} = 0,33 \text{ kN/m}^2$;

d) Peso do secundário do motor linear do veículo Maglev (peso linear de $1,20 \text{ kN/m}$, distribuído pela largura da passarela de 3,01m): $1,2 \text{ kN/m} / 3,01 \text{ m} = 0,40 \text{ kN/m}^2$.

Essa carga foi aplicada no modelo como uma carga uniformemente distribuída em toda a área da malha de elementos finitos. Foi considerado o peso do bloco de coroamento como carga concentrada de $67,8 \text{ kN}$ aplicada sobre a fundação.

Tabela 4.8 – Somatório da sobrecarga permanente atuando na estrutura metálica

Carga n.º 2: CP (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0.
FX2=0.
FX3=-2888.

4.6.3. Ação variável: veículo Maglev

O uso da passarela deve considerar duas situações distintas:

- Passagem do veículo Maglev;
- Uso como passarela de pedestres.

O projeto estrutural deve considerar a situação mais desfavorável.

Segundo informado pelos responsáveis pelo projeto Maglev [1], o veículo carregado pesa 10 kN/m . Está é uma carga móvel e o comprimento do veículo é fixado em 6 metros. Essa sobrecarga atuando na largura da passarela pode ser convertida em $10 \text{ kN/m} / 3,01 \text{ m} = 3,3 \text{ kN/m}^2$ (ao longo de 6m).

Segundo a NBR 7188/1982 [13], para passarelas de pedestre, a carga móvel deve ser tomada como uniformemente distribuída de 5,0 kN/m². Comparando esse carregamento com o referente ao veículo Maglev, equivalente a 3,3kN/m² apenas em 6m de comprimento, conclui-se que a estrutura deveria ser dimensionada para a carga de multidão de 5,0kN/m². Essa sobrecarga foi aplicada no modelo como uma carga uniformemente distribuída na área da malha de elementos finitos.

A força horizontal longitudinal devido à frenagem ou aceleração do veículo, por ser de baixo valor, não foi considerada no dimensionamento. Seu valor foi tomado igual a 30% da carga do veículo. Essa força é de 0,3 x 10,0 kN/m x 6 m= 18,0 kN. A laje distribui essa força, sendo transferida de forma uniforme para toda a estrutura.

Foram definidas 3 situações de carregamento variável igual a 5,0kN/m², a saber:

- SC1: ação variável ao longo de toda a passarela;
- SC2: ação variável em vãos alternados (aplicado entre os eixos: D - E, F - G, H - J, K - L);
- SC3: ação variável apenas na metade sul do tabuleiro.

Situações adotadas de modo a considerar as máximas solicitações nas treliças, colunas e fundações.

Tabela 4.9 – Somatório da sobrecarga variável atuando na estrutura metálica

Carga n.º 3: SC1 (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0. FX2=0. FX3=-2418.
Carga n.º 4: SC2 (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0. FX2=0. FX3=-1324.
Carga n.º 5: SC3 (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0. FX2=0. FX3=-1209.

4.6.4. Ação variável de temperatura

Considerando que a estrutura está exposta às oscilações climáticas, foi assumida uma variação de temperatura uniforme de $\pm 15^\circ\text{C}$ nos elementos da via elevada.

Tabela 4.10 – Somatório da ação de temperatura atuando na estrutura metálica

Carga n.º 6: TEMP+15 (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0.
FX2=0.
FX3=0.
Carga n.º 7: TEMP-15 (unidades – kN)
SOMATÓRIO DE CARGAS
FX1=0.
FX2=0.
FX3=0.

4.6.5. Ação variável devido ao vento

Foi considerado no modelo o vento atuando perpendicularmente à passarela (VENTO+X1) e longitudinalmente à passarela (VENTO+X2). Segundo a NBR 6123/1980 [14] para essas ações de vento foram considerados os seguintes parâmetros:

$V_0 = 35 \text{ m/s}$ (velocidade básica do vento - RJ)

$S_1 = 1,0$ (superfície plana)

$S_2 = 0,93$ (categoria II / classe C / Z = 8,0 m)

$S_3 = 1,0$ (edificação com alto fator de ocupação)

$V_k = 32,55 \text{ m/s}$ (velocidade característica do vento)

$q = 0,613 V_k^2 = 0,65 \text{ kN/m}^2$ (pressão dinâmica)

Para o vento atuando perpendicularmente à passarela foi assumida uma área de obstrução igual à altura da treliça. Foi considerada a hipótese de haver um painel (placa) fixado à treliça, sendo assim mais desfavorável que a pressão de vento sobre a estrutura e o veículo Maglev. O coeficiente de força é igual a 2,0, adotado de acordo com a NBR 6123/1980 [14] item 8.1. Essa força de arrasto foi aplicada diretamente sobre os banzos da treliça, como carga linearmente distribuída.

$$f = C_f \cdot q \cdot h = 2,0 \times 0,65 \text{ kN/m}^2 \times 2,10 \text{ m} = 2,73 \text{ kN/m (2 banzos); } 1,36 \text{ kN/m (1 banzo)}$$

Onde:

f: força do vento

C_f : coeficiente de força

q: pressão dinâmica do vento

h: altura da treliça

Para o vento atuando longitudinalmente à passarela, foi assumido para a área de obstrução do vento a largura das barras prismáticas (NBR 6123/1980 [14] item 7). Foi considerado que o vento incide sobre todos os elementos da treliça ao longo da estrutura, sendo assim mais desfavorável que a pressão de vento sobre o veículo Maglev. Essa força foi aplicada diretamente sobre as colunas e diagonais da treliça, como carga linearmente distribuída.

Segue seu valor obtido a partir do programa Mathcad [9].

vento colunas

$$d = 355.6 \text{ mm} \quad (\text{largura da barra prismática})$$

$$l = 5.657 \text{ m} \quad (\text{comprimento da barra prismática})$$

$$\frac{l}{d} = 15.908$$

$$R = 70000 \cdot V_k \cdot d = 8.102 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (\text{regime de fluxo})$$

$$K = 0.86 \quad (\text{fator de redução})$$

$$C = 0.6 \quad (\text{coeficiente de arrasto})$$

$$f = C \cdot q \cdot K \cdot d = 0.119 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{força de arrasto})$$

vento diagonais

$$d = 101.6 \text{ mm}$$

$$l = 2.177 \text{ m}$$

$$\frac{l}{d} = 21.427$$

$$R = 70000 \cdot V_k \cdot d = 2.315 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$K = 0.75$$

$$C = 1.2$$

$$f = C \cdot q \cdot K \cdot d = 0.059 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tabela 4.11 – Somatório da ação do vento atuando na estrutura metálica

Carga n.º 8: VENTO+X1 (unidades – kN)	
SOMATÓRIO DE CARGAS	
FX1=445.	
FX2=0.	
FX3=0.	
Carga n.º 9: VENTO +X2 (unidades – kN)	
SOMATÓRIO DE CARGAS	
FX1=0.	
FX2=43.	
FX3=0.	

4.6.6. Lista de Carregamentos

Tabela 4.12 – Lista de carregamentos

Nº	NOME	
1	PP	Estrutura metálica
2	CP	Laje + Contrapiso + Trilhos + Motor Linear
3	SC1	Multidão todos os vãos
4	SC2	Multidão vãos alternados
5	SC3	Multidão ½ passarela
6	TEMP+15	Temperatura +15°C
7	TEMP-15	Temperatura -15°C
8	VENTO+X1	Vento transversal
9	VENTO+X2	Vento longitudinal

4.7. Combinações

Foram criadas combinações no ELU, conforme prescrito pela NBR 8800/2008 [5].

Tabela 4.13 – Lista de combinações

Nº	NOME
1	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC1
2	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC2
3	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC3
4	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC1 + 0,84 V+X1 + 0,72 TEMP+15
5	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC1 + 0,84 V+X1 + 0,72 TEMP-15
6	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC1 + 0,84 V+X2 + 0,72 TEMP+15
7	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC1 + 0,84 V+X2 + 0,72 TEMP-15
8	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC2 + 0,84 V+X1 + 0,72 TEMP+15
9	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC2 + 0,84 V+X1 + 0,72 TEMP-15
10	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC2 + 0,84 V+X2 + 0,72 TEMP+15
11	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC2 + 0,84 V+X2 + 0,72 TEMP-15
12	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC3 + 0,84 V+X1 + 0,72 TEMP+15
13	1,25 PP + 1,35 CP + 1,5 SC3 + 0,84 V+X2 + 0,72 TEMP+15
14	1,25 PP + 1,35 CP + 1,4 V+X1
15	1,25 PP + 1,35 CP + 1,4 V+X1 + 0,9 SC1
16	1,25 PP + 1,35 CP + 1,4 V+X1 + 0,9 SC3
17	PP + CP + 1,4 V+X1
18	PP + CP + 1,5 SC3
19	PP + CP + 1,4 V+X1 + 0,9 SC3
20	PP + CP + 1,5 SC3 + 0,84 V+X1

4.8. Resultados da análise da estrutura

De modo a prevenir os efeitos importantes dos deslocamentos da estrutura na distribuição dos esforços internos, a análise foi realizada no modo não-linear, disponível no programa computacional STRAP [4], de forma incremental e com base na geometria deformada da estrutura. Os efeitos globais de 2ª ordem (P- Δ) decorrentes dos deslocamentos dos nós da estrutura são calculados pelo programa, conforme descrito no tópico de “Ajuda” do programa e encontra-se no Anexo B. Levando em conta esse método de cálculo para a análise não-linear e que as barras do modelo não incluem nós intermediários, os efeitos locais de 2ª ordem (P- δ) decorrentes da deformação de flexão inicial dos eixos das barras são considerados por meio do coeficiente B1. Esse coeficiente faz parte do método da

amplificação dos esforços solicitantes (NBR8800/2008 [5] anexo D) e foi aplicado diretamente no dimensionamento das barras, aparecendo nas rotinas do tópico seguinte. A seguir, imagens dos diagramas das máximas solicitações na estrutura obtidas a partir de envoltórias de combinações (unidades: kN; kNm).

Para força axial:

- Valores negativos (azul) → tração;
- Valores positivos (preto) → compressão.

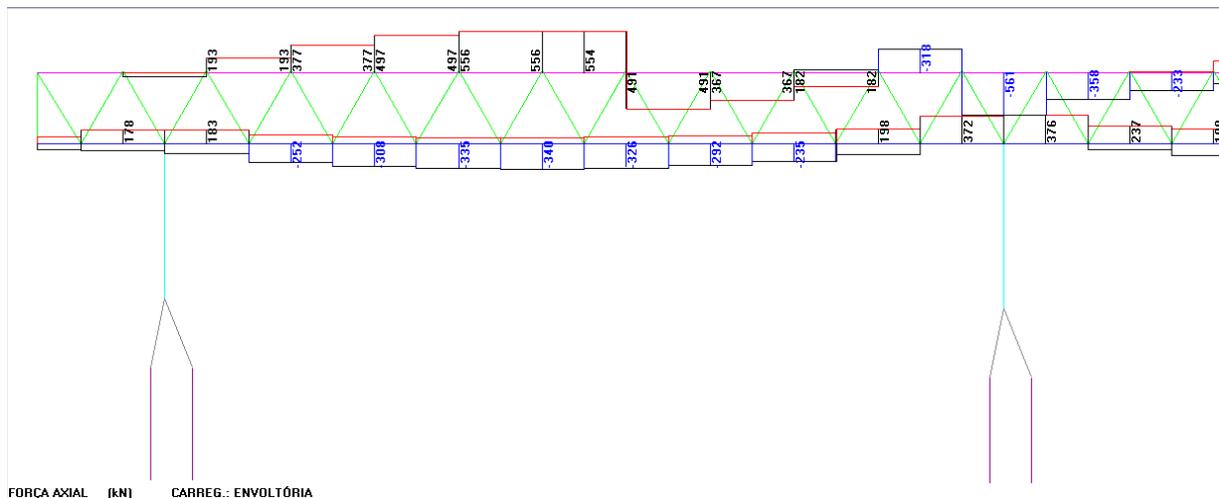


Figura 4.13 – Envoltória de força axial (N_{sa}) - banzos

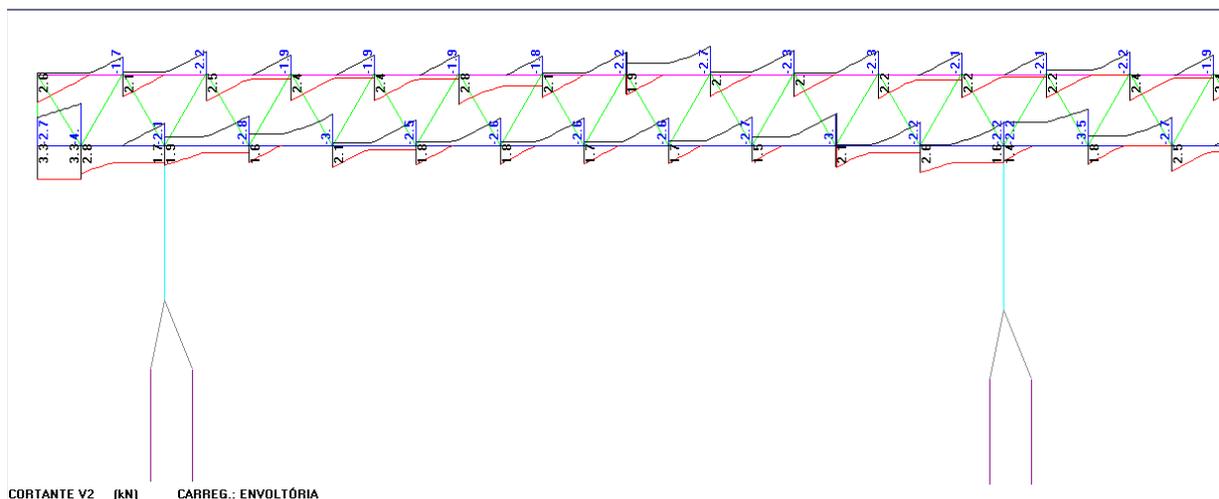


Figura 4.14 – Envoltória de esforço cortante perpendicular ao plano da treliça (V_{sd_y}) - banzos

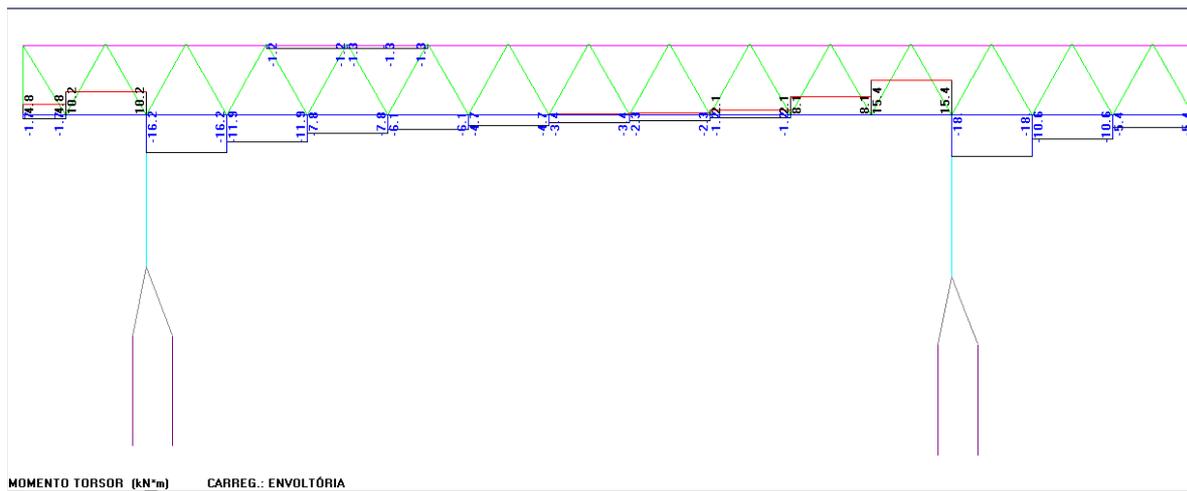


Figura 4.18 – Envoltória de momento torsor (Tsa) - banzos

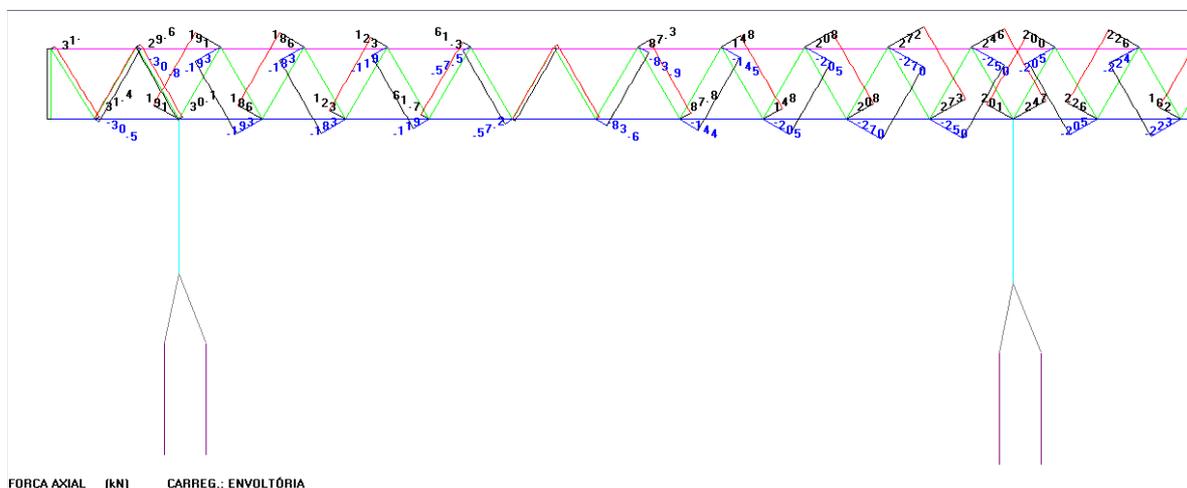


Figura 4.19 – Envoltória de força axial (Nsa) - diagonais

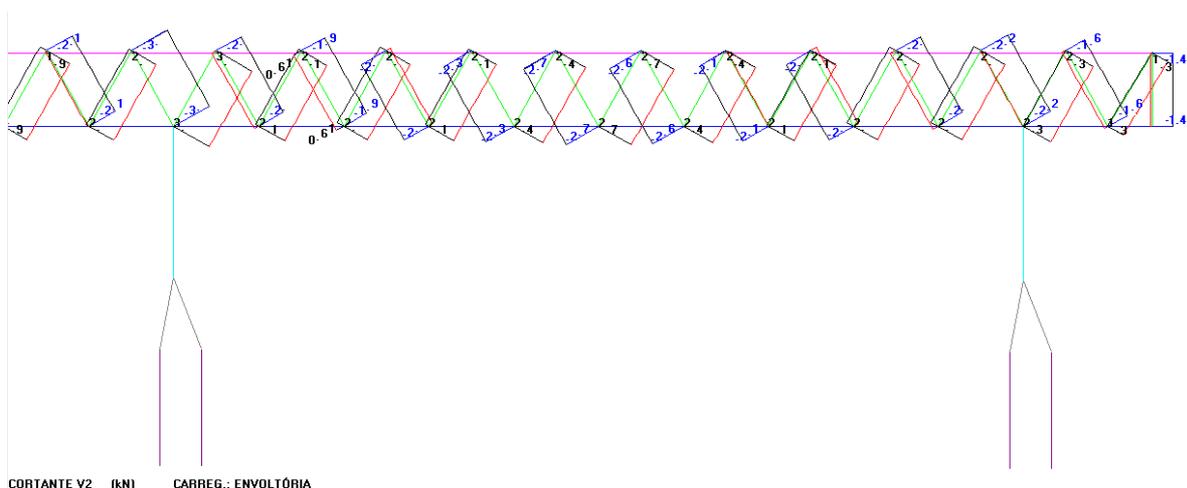


Figura 4.20 – Envoltória de esforço cortante perpendicular ao plano da treliça (Vsdy) - diagonais

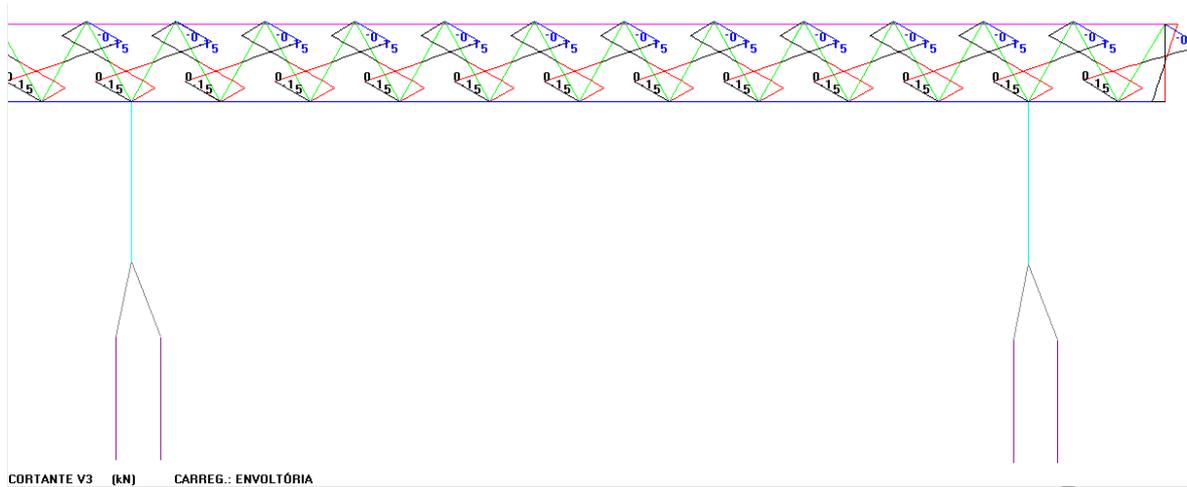


Figura 4.21 – Envoltória de esforço cortante no plano da treliça (V_{sd_x}) - diagonais

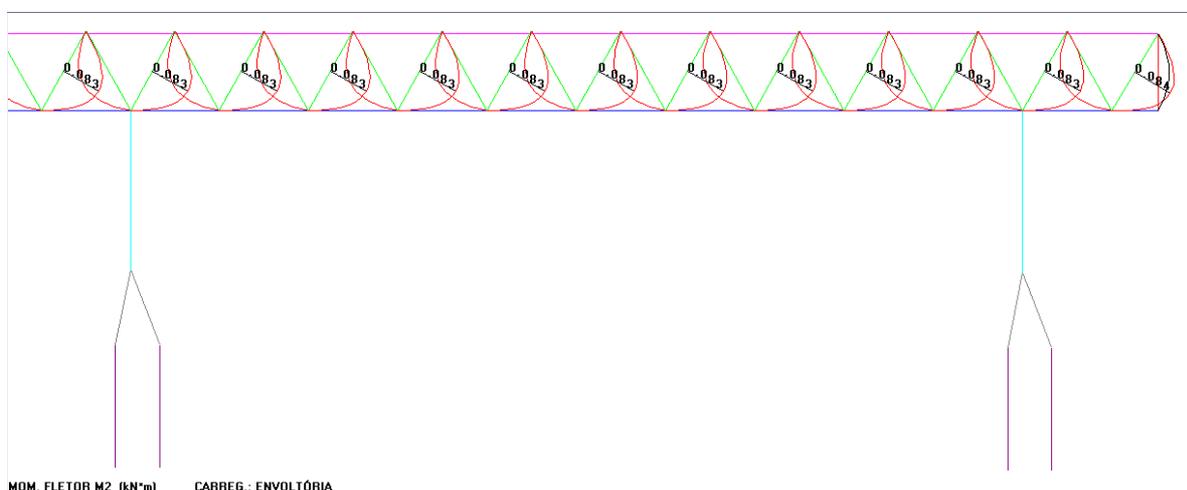


Figura 4.22 – Envoltória de momento fletor no plano da treliça (M_{sd_x}) - diagonais

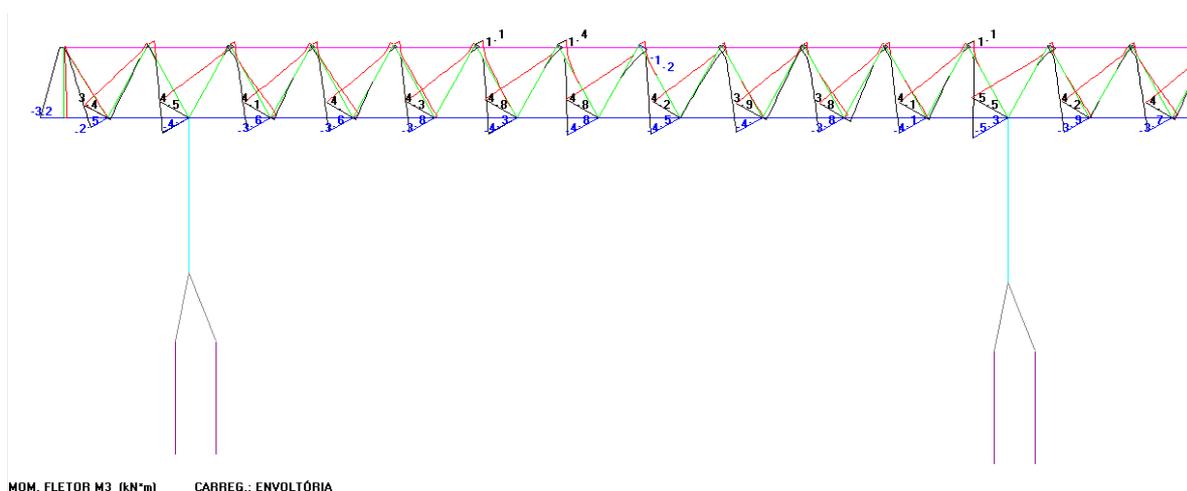


Figura 4.23 – Envoltória de momento fletor perpendicular ao plano da treliça (M_{sd_y}) - diagonais

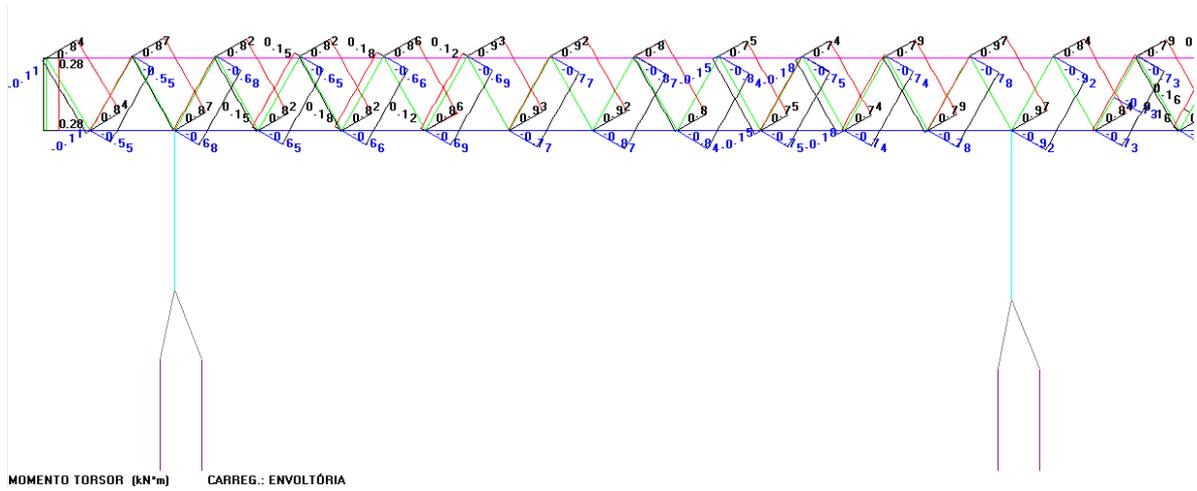


Figura 4.24 – Envoltória de momento torsor (T_{sa}) - diagonais

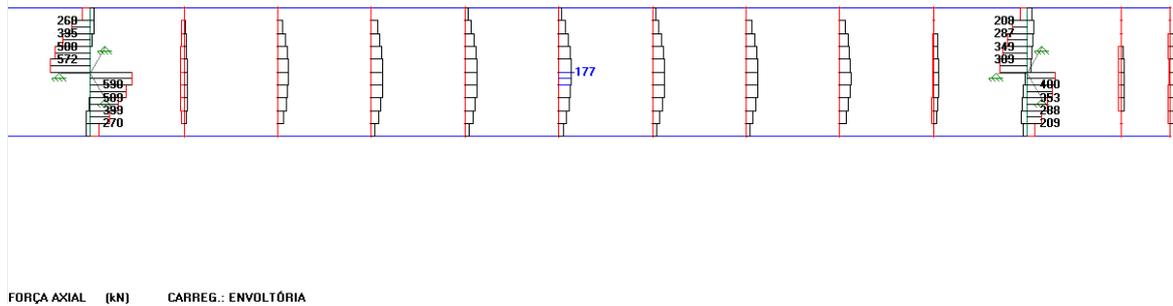


Figura 4.25 – Envoltória de força axial (N_{sa}) – travessas e transversinas

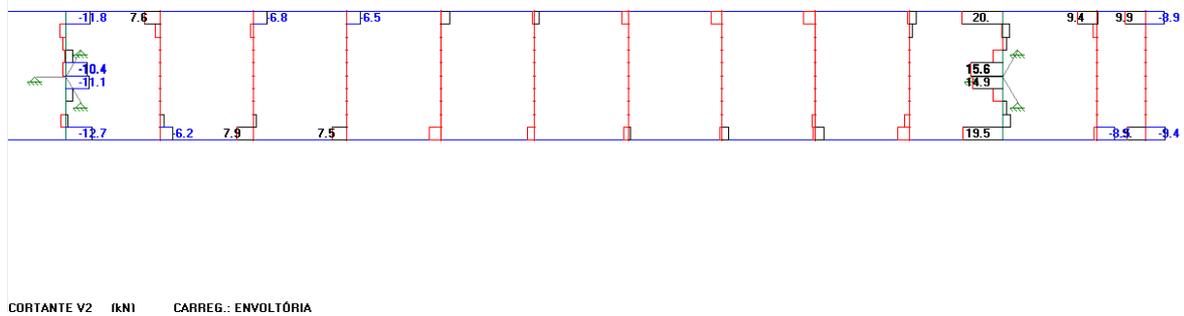


Figura 4.26 – Envoltória de esforço cortante no plano do tabuleiro (V_{sdy}) – travessas e transversinas

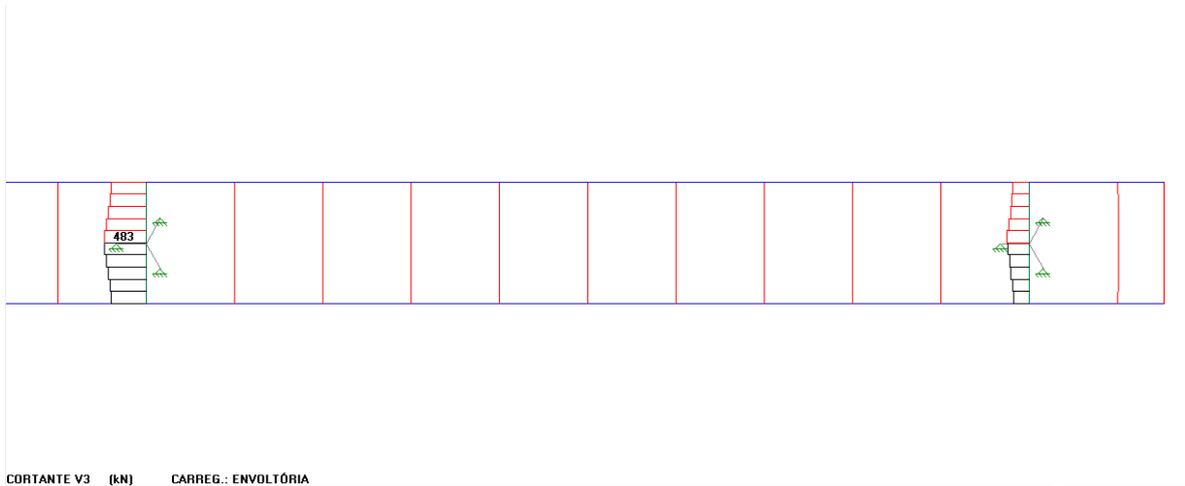


Figura 4.27 – Envoltória de esforço cortante perpendicular ao plano do tabuleiro (V_{sd_x}) – travessas

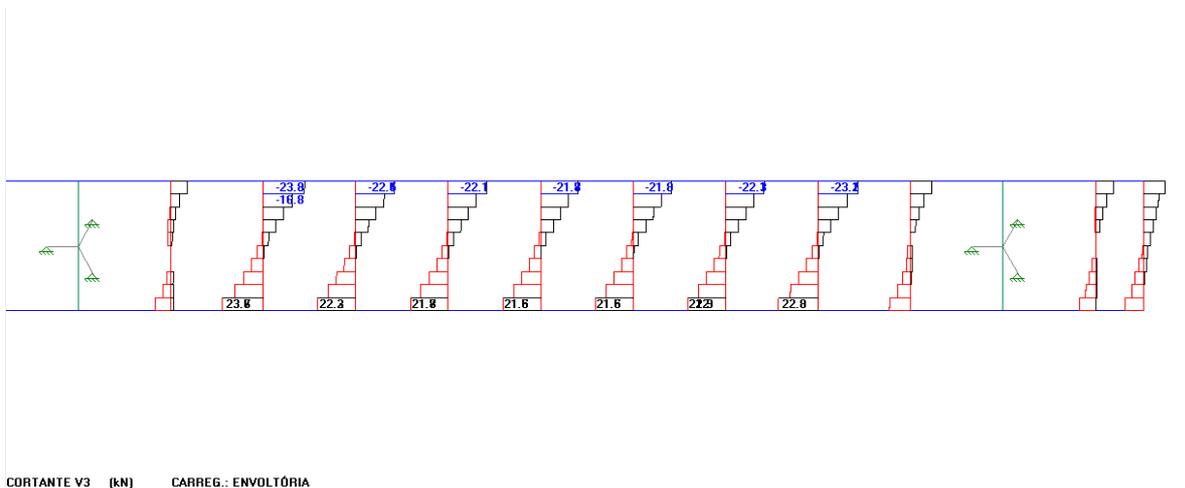


Figura 4.28 – Envoltória de esforço cortante perpendicular ao plano do tabuleiro (V_{sd_x}) – transversinas

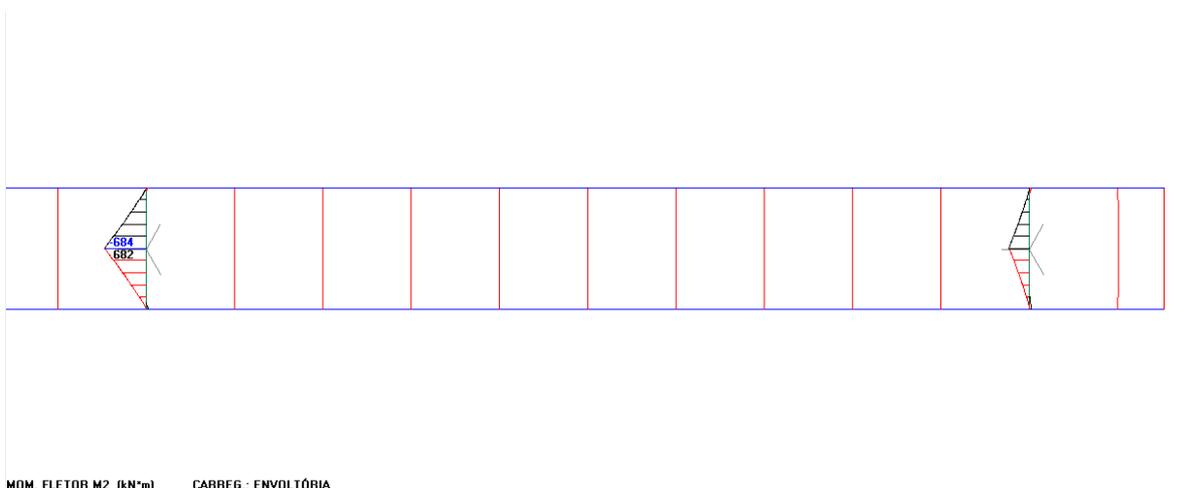


Figura 4.29 – Envoltória de momento fletor perpendicular ao plano do tabuleiro (M_{sd_x}) – travessas

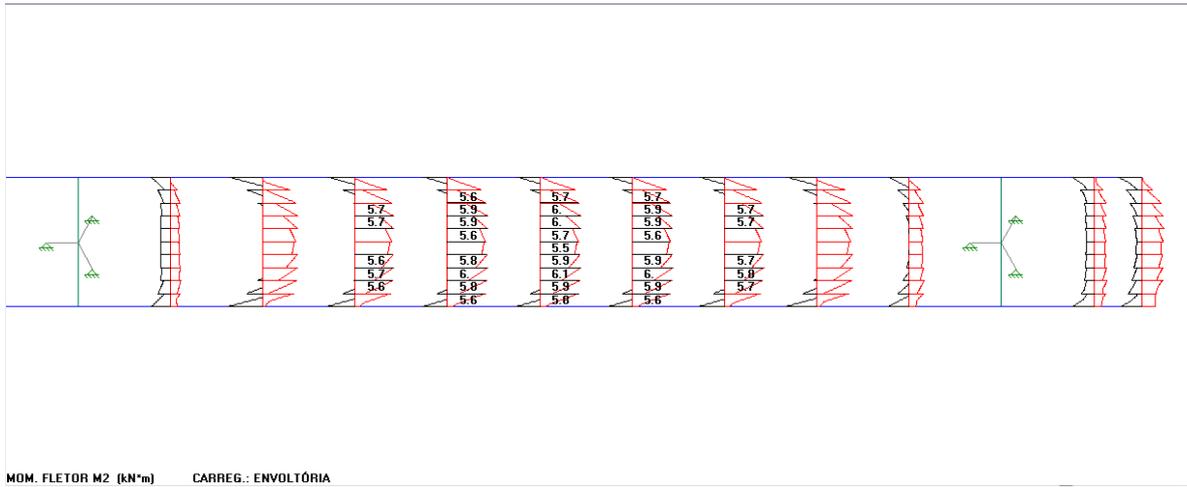


Figura 4.30 – Envoltória de momento fletor perpendicular ao plano do tabuleiro (M_{sdx}) – transversinas

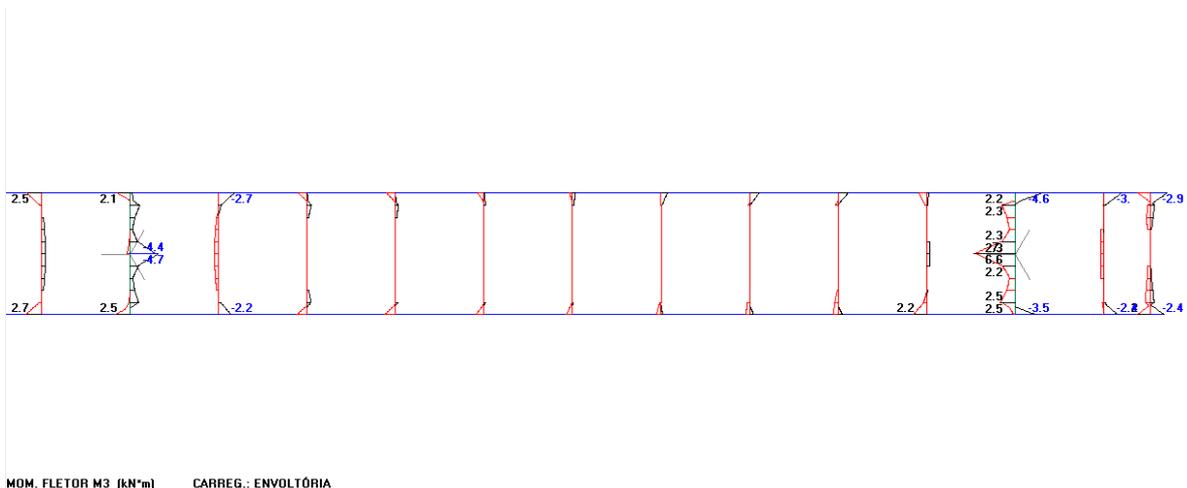


Figura 4.31 – Envoltória de momento fletor no plano do tabuleiro (M_{sdy}) – travessas e transversinas

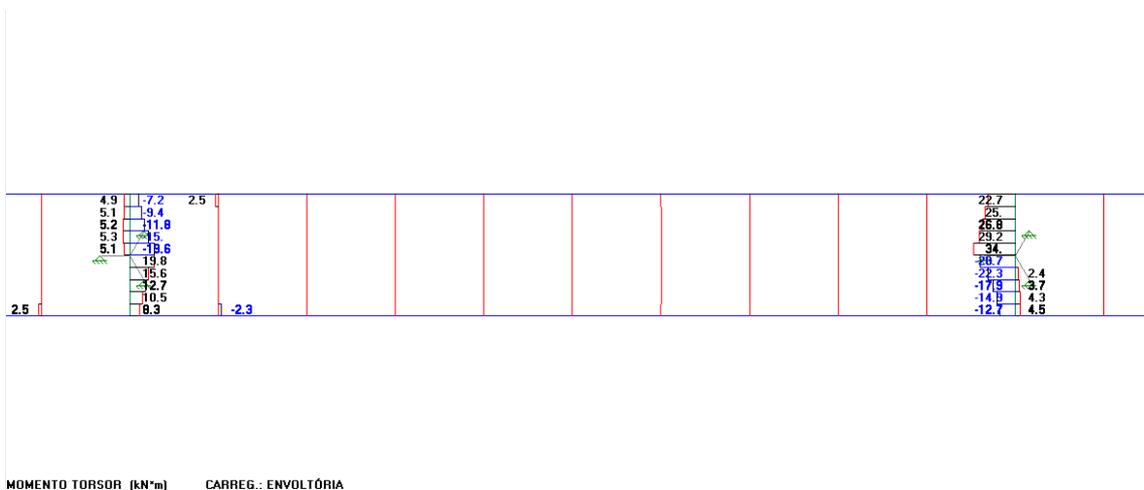


Figura 4.32 – Envoltória de momento torsor (T_{sdx}) – travessas e transversinas

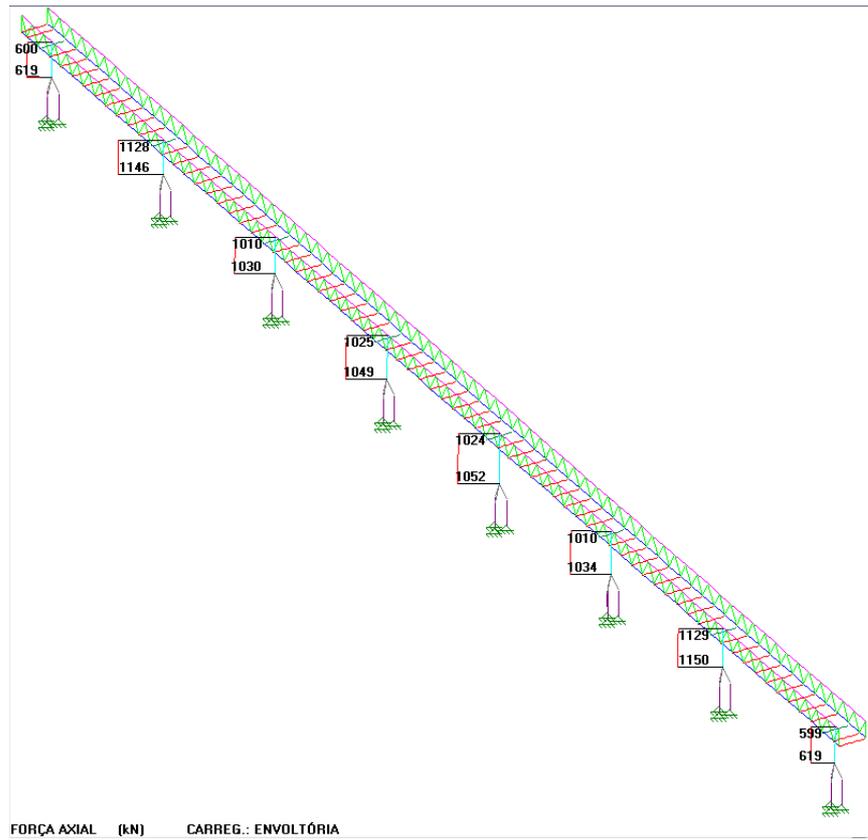


Figura 4.33 – Envoltória de força axial (N_{sd}) - pilares

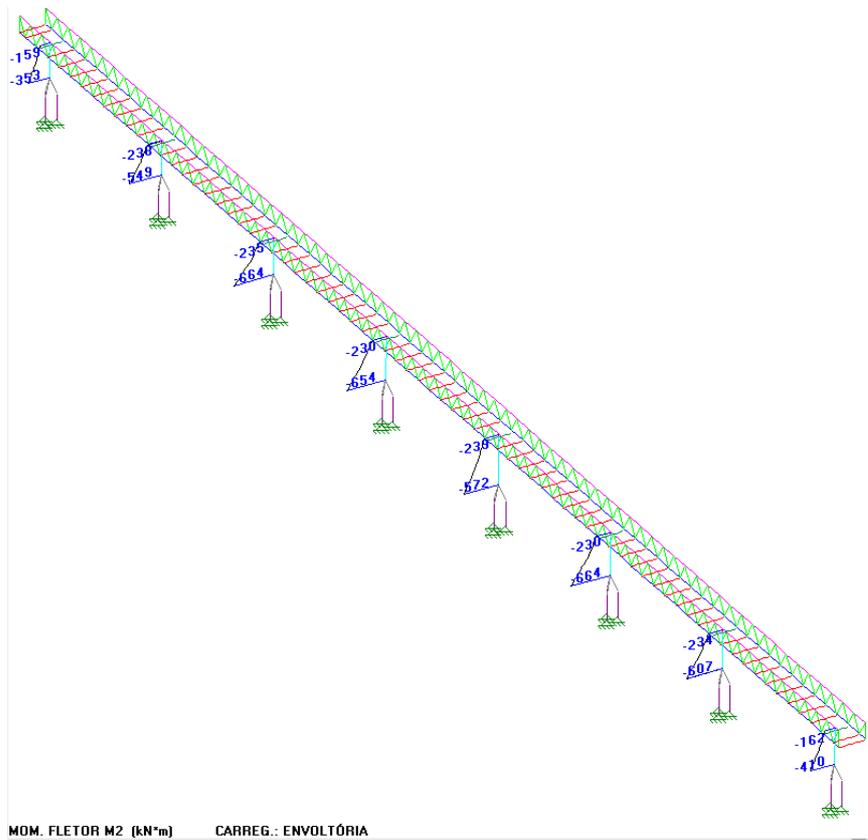


Figura 4.34 – Envoltória de momento fletor transversal à passarela ($M_{sd,x}$) - pilares

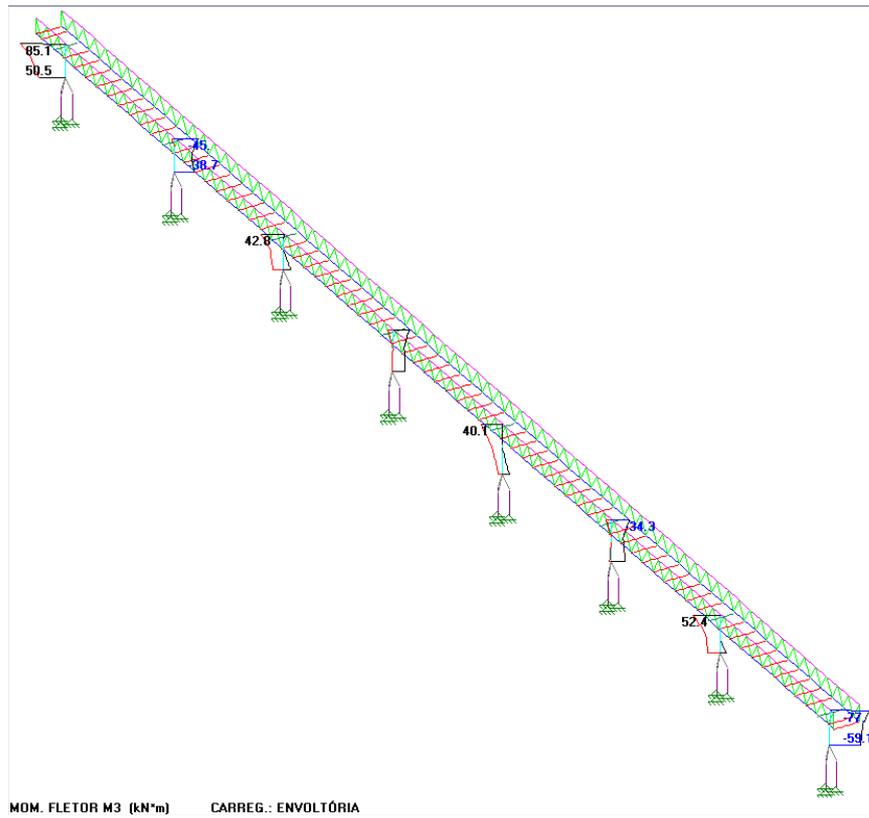


Figura 4.35 – Envoltória de momento fletor longitudinal à passarela (M_{sdy}) - pilares

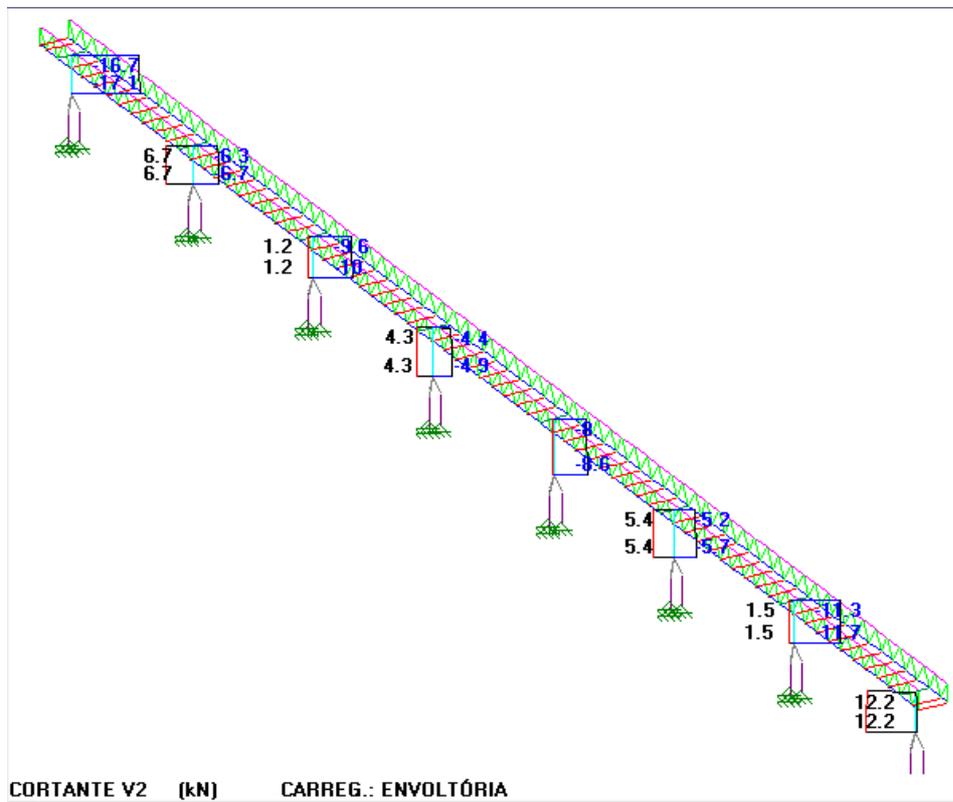


Figura 4.36 – Envoltória de esforço cortante longitudinal à passarela (V_{sdy}) - pilares

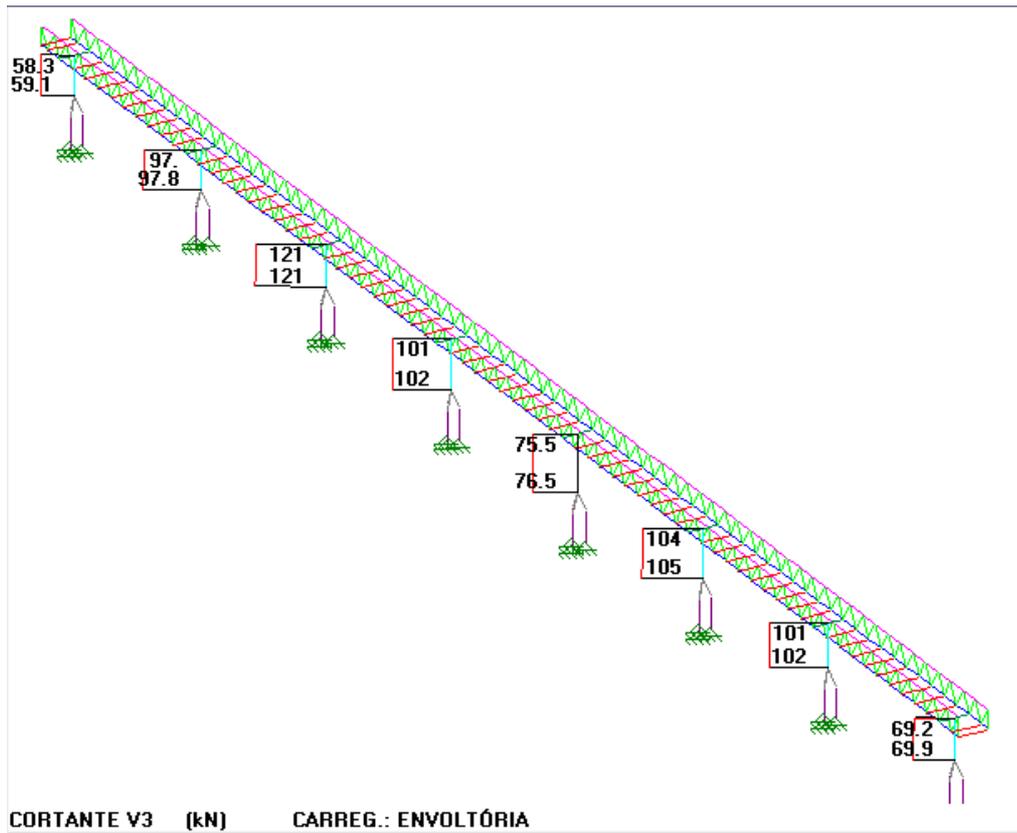


Figura 4.37 – Envoltória de esforço cortante transversal à passarela (V_{sd}) - pilares

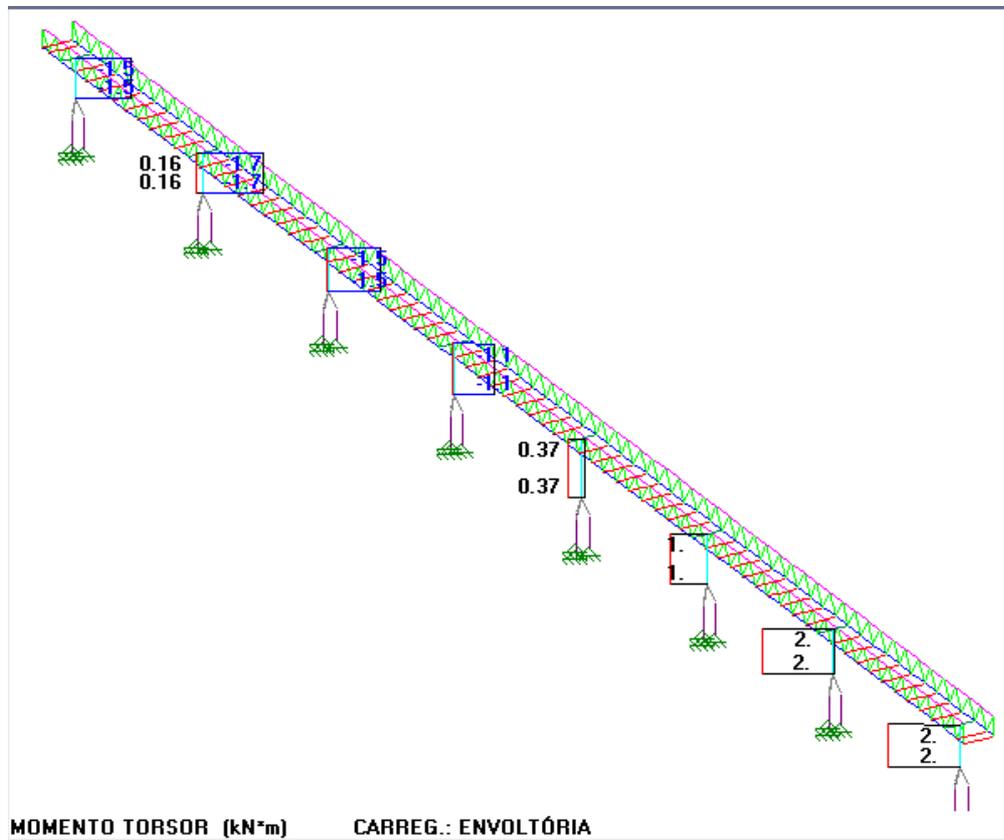


Figura 4.38 – Envoltória de momento torsor (T_{sd}) - pilares

Tabela 4.14 – Solicitações máximas nos nós extremos das barras

Solicitações Máximas (kN; kNm)							
	N _s d (Comp.)	N _s d (Tração)	V _{Sdy}	V _{Sdx}	T _{Sd}	M _{Sdx}	M _{Sdy}
Diag.	273	-270	3	0	1	0	5
B. Sup.	555	-567	3	8	1	9	2
Transv.	67	-211	10	24	2	6	3
Col.	1150	0	17	122	2	664	85
B. Inf.	386	-369	4	40	14	87	7
Trav.	590	-89	20	484	34	688	8

5. DIMENSIONAMENTO

De posse dos resultados do modelo computacional foi elaborado o dimensionamento estrutural. Como os resultados foram obtidos a partir de uma análise não-linear, adotou-se para as barras coeficiente de flambagem (K) igual a 1, exceto nos casos abaixo citados.

A verificação dos membros foi feita com base nas prescrições da norma ABNT NBR 8800:2008 [5] a menos dos casos identificados a seguir, que seguiram as prescrições do projeto de norma para estruturas com emprego de tubos [10].

a) O comprimento de flambagem dos banzos no plano da treliça foi tomado igual a 0,9 L (PN tubos [10] item 4.8.a).

Onde L é o comprimento da barra medido entre os nós.

b) Para diagonais ligadas aos banzos diretamente por meio de solda em todo o seu perímetro, o comprimento de flambagem no plano da treliça foi tomado igual a (PN tubos [10] item 4.8.b):

0,90 L para $\beta > 0,60$

0,75 L para $\beta \leq 0,60$

Temos:

Ligação K no banzo superior: $\beta = d_1/d_0 = 101,6\text{mm} / 141,3\text{mm} = 0,7 > 0,6$

Ligação K no banzo inferior: $\beta = d_1/b_0 = 101,6\text{mm} / 210\text{mm} = 0,5 < 0,6$

Logo foi adotado o comprimento de flambagem de 0,9 L.

Onde: L: comprimento barra; d_1 : diâmetro diagonal; d_0 : diâmetro banzo; b_0 : largura banzo.

c) Fator de redução associado à força axial de compressão resistente para perfis tubulares (PN tubos [10] item 5.2).

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4,48}\right)^{\frac{1}{2,24}}}$$

Onde:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

A_g : área bruta da seção transversal;

N_e : força axial de flambagem elástica;

Q : fator de redução total associado à flambagem local;

f_y : resistência ao escoamento do aço.

d) Cálculo da rigidez efetiva à flexão para pilares mistos (PN tubos [10] item 10.2).

$$(EI)_e = E_a \cdot I_a + 0,70 \cdot E_c \cdot I_c + E_s \cdot I_s$$

Onde:

E_a : módulo de elasticidade do aço do perfil tubular;

I_a : momento de inércia da seção do perfil de aço;

E_c : módulo de elasticidade do concreto;

I_c : momento de inércia da seção do concreto não-fissurado;

E_s : módulo de elasticidade do aço da armadura do concreto;

I_s : momento de inércia da seção da armadura do concreto.

e) Modelo de dimensionamento para pilares mistos submetidos à flexo-compressão (PN tubos [10] item 10.3).

• para $N_{Sd} \leq N_{c,Rd}$: $M_{x,Sd}/M_{x,Rd} + M_{y,Sd}/M_{y,Rd} \leq 1,0$

• para $N_{Sd} > N_{c,Rd}$: $(N_{Sd} - N_{c,Rd})/(N_{Rd} - N_{c,Rd}) + M_{x,Sd}/M_{x,Rd} + M_{y,Sd}/M_{y,Rd} \leq 1,0$

Onde:

N_{Sd} : força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$: força axial de compressão resistente de cálculo referente apenas à parcela do concreto;

N_{Rd} : força axial de compressão resistente de cálculo;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$: momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente, em relação aos eixos x e y da seção transversal do pilar misto;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$: momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixo x e y da seção transversal do pilar misto.

5.1. Banzo Inferior – 360 x 210 x 8,8 VMB300

Para o dimensionamento do banzo inferior foram utilizadas as solicitações nos nós extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção retiradas do catálogo da V&M [11].

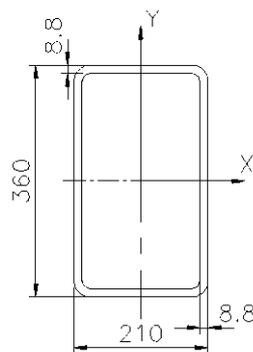


Figura 5.1 – Seção transversal do banzo inferior

Planilha Mathcad

Dados

$$f_y = 300\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento})$$

$$A_g = 95.3\text{cm}^2 \quad (\text{área bruta})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de segurança})$$

$$E = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade})$$

$$L = 2.2\text{m} \quad (\text{comprimento})$$

$$I_x = 16440\text{cm}^4 \quad (\text{inércia em torno do eixo x})$$

$$I_y = 7174\text{cm}^4 \quad (\text{inércia em torno do eixo y})$$

$$K_x = 0.9 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo x})$$

$$K_y = 1 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo y})$$

$$K_z = 1 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo z})$$

$$r_x = 13.1\text{cm} \quad (\text{raio de giração em torno do eixo x})$$

$$r_y = 8.65\text{cm} \quad (\text{raio de giração em torno do eixo y})$$

$$\nu = 0.3 \quad (\text{coeficiente de poisson})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade transversal})$$

$$J = 16260\text{cm}^4 \quad (\text{constante de torção pura / Saint-Venant})$$

$$t = 8.8\text{mm} \quad (\text{espessura da chapa})$$

$$B = 210\text{mm} \quad (\text{largura})$$

$$H = 360\text{mm} \quad (\text{altura})$$

$$b = B - 5 \cdot t = 166 \cdot \text{mm} \quad (\text{largura efetiva})$$

$$h = H - 5 \cdot t = 316 \cdot \text{mm} \quad (\text{altura efetiva})$$

$$Z_x = 1117\text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo x})$$

$$Z_y = 773\text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo y})$$

$$W_x = 913\text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo x})$$

$$W_y = 683\text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo y})$$

$$W_t = 1163\text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção})$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de tração (NBR 8800:2008 item 5.2)

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 2.599 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão (NBR 8800:2008 item 5.3)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L)^2} = 8.278 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2} = 2.926 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}) = 2.926 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma = f_y \quad (\text{tensão que pode atuar no elemento - adotado de forma conservadora})$$

$$b_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{b}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), b \right] = 166 \cdot \text{mm}$$

$$h_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{h}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), h \right] = 316 \cdot \text{mm}$$

$$A_{ef.1} = A_g - 2 \cdot (b - b_{ef}) \cdot t = 95.3 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{ef.2} = A_g - 2 \cdot (h - h_{ef}) \cdot t = 95.3 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{ef.3} = A_g - 2 \cdot (b - b_{ef}) \cdot t - 2 \cdot (h - h_{ef}) \cdot t = 95.3 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda_{lim} = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 36.148$$

$$Q = \begin{cases} \frac{A_{ef.1}}{A_g} & \text{if } \frac{b}{t} > \lambda_{lim} \wedge \frac{h}{t} \leq \lambda_{lim} \\ \frac{A_{ef.2}}{A_g} & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_{lim} \wedge \frac{h}{t} > \lambda_{lim} \\ \frac{A_{ef.3}}{A_g} & \text{if } \frac{b}{t} > \lambda_{lim} \wedge \frac{h}{t} > \lambda_{lim} \\ 1 & \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_{lim} \wedge \frac{h}{t} \leq \lambda_{lim} \end{cases} = 1$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0.313$$

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4.48}\right)^{\frac{1}{2.24}}} = 0.998$$

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 2.593 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Força axial resistente de cálculo

$$N_{Rd_i} = \text{if}(N_{Sd_i} \geq 0, N_{c.Rd}, N_{t.Rd})$$

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo x (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 335.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 35.909$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 62.484$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 147.173$$

$$M_r = f_y \cdot W_x = 273.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.FLA} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd.FLA} = 304.636 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.864$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 28.918$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 36.148$$

$$W_{ef,x} = \frac{b_{ef} \cdot h^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b_{ef}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h} \right)^2 \right] = 750.487 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{ef,x} \cdot f_y = 225.146 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd,FLM} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLM} = 304.636 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLT:

$$\lambda = \frac{K_z \cdot L}{r_y} = 25.434$$

$$\lambda_p = \frac{0.13 \cdot E}{M_{pl}} \cdot \sqrt{J \cdot A_g} = 96.584$$

$$M_r = (f_y - 0.3 \cdot f_y) \cdot W_x = 191.73 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_r = \frac{2.0 \cdot E}{M_r} \cdot \sqrt{J \cdot A_g} = 2.597 \times 10^3$$

$$C_b = 1$$

$$M_{Rd,FLT} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLT} = 304.636 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdx} = \min(M_{Rd,FLA}, M_{Rd,FLM}, M_{Rd,FLT}) = 304.636 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

(ELU: momento de plastificação total da seção)

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo y (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_y \cdot f_y = 231.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.864$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 62.484$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 147.173$$

$$M_r = f_y \cdot W_y = 204.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{Rd.FLA}} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{\text{pl}}}{\gamma_{\text{a1}}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{\text{a1}}} \cdot \left[M_{\text{pl}} - (M_{\text{pl}} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{\text{Rd.FLA}} = 210.818 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 35.909$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 28.918$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 36.148$$

$$W_{\text{ef.y}} = \frac{h_{\text{ef}} \cdot b^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h_{\text{ef}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b} \right)^2 \right] = 476.822 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{\text{ef.y}} \cdot f_y = 143.047 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{cr}} = \frac{W_{\text{ef.y}}^2}{W_y} \cdot f_y = 99.865 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{Rd.FLM}} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{\text{pl}}}{\gamma_{\text{a1}}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \frac{M_{\text{cr}}}{\gamma_{\text{a1}}}, \frac{1}{\gamma_{\text{a1}}} \cdot \left[M_{\text{pl}} - (M_{\text{pl}} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{\text{Rd.FLM}} = 132.71 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLT:

$$\lambda = \frac{K_z \cdot L}{r_x} = 16.794$$

$$\lambda_p = \frac{0.13 \cdot E}{M_{pl}} \cdot \sqrt{J \cdot A_g} = 139.566$$

$$M_r = (f_y - 0.3 \cdot f_y) \cdot W_y = 143.43 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_r = \frac{2.0 \cdot E}{M_r} \cdot \sqrt{J \cdot A_g} = 3.472 \times 10^3$$

$$C_b = 1$$

$$M_{Rd,FLT} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLT} = 210.818 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdy} = \min(M_{Rd,FLA}, M_{Rd,FLM}, M_{Rd,FLT}) = 132.71 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad (\text{ELU: flambagem local da mesa})$$

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo x para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot h \cdot t = 55.616 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{h}{t} = 35.909$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 63.509$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 1.001 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdx} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\~{n} compacta"} \right) = 910.08 \cdot \text{kN}$$

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo y para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot b \cdot t = 29.216 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.864$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 63.509$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 525.888 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdy} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 478.08 \cdot \text{kN}$$

Se\u00e7\u00f5es tubulares retangulares compactas submetidas exclusivamente \u00e0 tor\u00e7\u00e3o (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd} = \text{if} \left(\frac{h}{t} \leq 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 190.309 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

M\u00e9todo da amplifica\u00e7\u00e3o dos esfor\u00e7os solicitantes (NBR 8800:2008 anexo D)

$$C_m = 1.0 \quad (\text{adotado de forma conservadora})$$

$$B_{1x_i} = \max \left(1.0, \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd_i}}{N_{ex}}} \right)$$

(Obs.: N_{Sd_i} leva em conta os efeitos globais de 2^a ordem)

$$B_{1y_i} = \max \left(1.0, \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd_i}}{N_{ey}}} \right)$$

Barras submetidas a momentos fletores, for\u00e7a axial e for\u00e7as cortantes (NBR 8800:2008 item 5.5.1)

$$\text{Verif}_{1_i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + \frac{8}{9} \cdot \left(B_{1x_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} + B_{1y_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rdy}} \right)$$

$$\text{Verif}_{2_i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{2 \cdot N_{Rd_i}} + \left(B_{1x_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} + B_{1y_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rdy}} \right)$$

$$\text{Verif}_{3_i} = \text{if} \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} \geq 0.2, \text{Verif}_{1_i}, \text{Verif}_{2_i} \right)$$

Obs.: Os esforços cortantes devem ser verificados independentemente

Seções tubulares retangulares submetidas à momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante em relação a um dos eixos centrais de inércia (NBR 8800:2008 item 5.5.2.2)

$$\text{Verif}_{4_i} = \text{if} \left[|T_{Sd_i}| > 0.2 \cdot T_{Rd}, \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + B_{1x_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} \right) + \left(\frac{|V_{Sdx_i}|}{V_{Rdx}} + \frac{|T_{Sd_i}|}{T_{Rd}} \right)^2, \text{Verif}_{3_i} \right]$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras do banzo inferior, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.1 – Checagem da barra do banzo inferior mais solicitada

	Verif.3	V _{Sdx} /V _{Rdx}	V _{Sdy} /V _{Rdy}	T _{Sd} /T _{Rd}
Máx.	0,38	0,04	0,01	0,07

Como T_{Sd}/T_{Rd} é menor que 0,2, é utilizada a Verif.3, com as verificações dos esforços cortantes independentes dos outros esforços.

5.2. Banzo Superior – 141,3 x 10,0 VMB300

Para o dimensionamento do banzo superior foram utilizadas as solicitações nos nós extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção retiradas do catálogo da V&M [11].

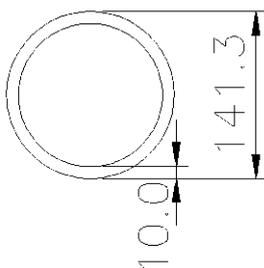


Figura 5.2 – Seção transversal do banzo superior

Planilha Mathcad

Dados

$f_y = 300\text{MPa}$ (tensão de escoamento)

$A_g = 41.2\text{cm}^2$ (área bruta)

$\gamma_{a1} = 1.1$ (coeficiente de segurança)

$E = 200\text{GPa}$ (módulo de elasticidade)

$L = 2.2\text{m}$ (comprimento)

$I = 894\text{cm}^4$ (inércia)

$K_x = 0.9$ (coeficiente de flambagem em torno do eixo x)

$K_y = 1$ (coeficiente de flambagem em torno do eixo y)

$K_z = 1$ (coeficiente de flambagem em torno do eixo z)

$r = 4.66\text{cm}$ (raio de giração)

$\nu = 0.3$ (coeficiente de poisson)

$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ (módulo de elasticidade transversal)

$t = 10.0\text{mm}$ (espessura da chapa)

$D = 141.3\text{mm}$ (diâmetro)

$Z = 173\text{cm}^3$ (módulo plástico)

$$W_t = 253\text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção})$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de tração (NBR 8800:2008 item 5.2)

$$N_{t.Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 1.124 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão (NBR 8800:2008 item 5.3)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K_x \cdot L)^2} = 4.501 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K_y \cdot L)^2} = 3.646 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}) = 3.646 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$Q = \text{if} \left(\frac{D}{t} \leq 0.11 \cdot \frac{E}{f_y}, 1.0, \text{if} \left(\frac{D}{t} > 0.45 \cdot \frac{E}{f_y}, \text{"ñ ok"}, \frac{0.038}{\frac{D}{t}} \cdot \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \right) \right) = 1$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0.582$$

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4.48}\right)^{\frac{1}{2.24}}} = 0.963$$

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 1.082 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Força axial resistente

$$N_{Rd_i} = \text{if} \left(N_{Sd_i} \geq 0, N_{c.Rd}, N_{t.Rd} \right)$$

Momento fletor resistente de cálculo (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 51.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = \text{if} \left(\frac{D}{t} \leq \frac{0.07 \cdot E}{f_y}, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3o compacta"} \right) = 47.182 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

For\u00e7a cortante resistente de c\u00e1lculo (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$L_v = 2.2\text{m}$$

$$\tau_{cr} = \max \left[\min \left[\frac{1.6 \cdot E}{\frac{5}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^4}}, 0.6 \cdot f_y \right], \min \left[\frac{0.78 \cdot E}{\frac{3}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}}, 0.6 \cdot f_y \right] \right] = 180 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rd} = \frac{0.5 \cdot \tau_{cr} \cdot A_g}{\gamma_{a1}} = 337.091 \cdot \text{kN}$$

Se\u00e7\u00f5es tubulares circulares submetidas exclusivamente \u00e0 tor\u00e7\u00e3o (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd} = \max \left[\min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{1.23 \cdot W_t \cdot E}{\frac{5}{\left(\frac{D}{t}\right)^4} \cdot \sqrt{\frac{L}{D}}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right], \min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{0.6 \cdot W_t \cdot E}{\frac{3}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right] \right]$$

$$T_{Rd} = 41.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

M\u00e9todo da amplifica\u00e7\u00e3o dos esfor\u00e7os solicitantes (NBR 8800:2008 anexo D)

$$C_m = 1.0 \quad (\text{adotado de forma conservadora})$$

$$B_{1i} = \max \left(1.0, \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd_i}}{N_e}} \right) \quad (\text{Obs.: } N_{Sd_i} \text{ leva em conta os efeitos globais de 2}^{\text{a}} \text{ ordem})$$

Barras submetidas a momentos fletores, for\u00e7a axial e for\u00e7as cortantes (NBR 8800:2008 item 5.5.1)

$$\text{Verif}_{1i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + \frac{8}{9} \cdot \left(B_{1i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}} \right)$$

$$\text{Verif}_{2i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{2 \cdot N_{Rd_i}} + \left(B_{1i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}} \right)$$

$$\text{Verif}_{3_i} = \text{if} \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} \geq 0.2, \text{Verif}_{1_i}, \text{Verif}_{2_i} \right)$$

Obs.: Os esforços cortantes devem ser verificados independentemente

Seções tubulares retangulares submetidas à momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante em relação a um dos eixos centrais de inércia
(NBR 8800:2008 item 5.5.2.2)

$$\text{Verif}_{4_i} = \text{if} \left[|T_{Sd_i}| > 0.2 \cdot T_{Rd}, \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sd_{x_i}}|}{M_{Rd}} \right) + \left(\frac{|V_{Sd_{x_i}}|}{V_{Rd}} + \frac{|T_{Sd_i}|}{T_{Rd}} \right)^2, \text{Verif}_{3_i} \right]$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras do banzo superior, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.2 – Checagem da barra do banzo superior mais solicitada

	Verif.3	V _{Sdx} /V _{Rdx}	V _{Sdy} /V _{Rdy}	T _{Sd} /T _{Rd}
Máx.	0,66	0,02	0,01	0,03

Como T_{Sd}/T_{Rd} é menor que 0,2, é utilizada a Verif.3, com as verificações dos esforços cortantes independentes dos outros esforços.

5.3. Diagonais – 101,6 x 6,4 VMB350

Para o dimensionamento da diagonal foram utilizadas as solicitações nos nós extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção retiradas do catálogo da V&M [11].

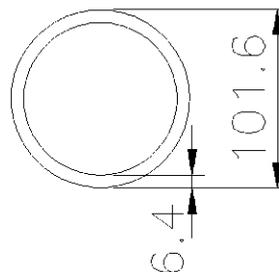


Figura 5.3 – Seção transversal da diagonal

Planilha Mathcad

Dados

$$f_y = 350\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento})$$

$$A_g = 18.9\text{cm}^2 \quad (\text{área bruta})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de segurança})$$

$$E = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade})$$

$$L = 2.177\text{m} \quad (\text{comprimento})$$

$$I = 215\text{cm}^4 \quad (\text{inércia})$$

$$K_x = 0.9 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo x})$$

$$K_y = 1 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo y})$$

$$K_z = 1 \quad (\text{coeficiente de flambagem em torno do eixo z})$$

$$r = 3.38\text{cm} \quad (\text{raio de giração})$$

$$\nu = 0.3 \quad (\text{coeficiente de poisson})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade transversal})$$

$$t = 6.4\text{mm} \quad (\text{espessura da chapa})$$

$$D = 101.6\text{mm} \quad (\text{diâmetro})$$

$$Z = 57.3\text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico})$$

$$W_t = 84.7\text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção})$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de tração (NBR 8800:2008 item 5.2)

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 601.364 \cdot \text{kN}$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão (NBR 8800:2008 item 5.3)

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K_x \cdot L)^2} = 1.106 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K_y \cdot L)^2} = 895.471 \cdot \text{kN}$$

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}) = 895.471 \cdot \text{kN}$$

$$Q = \text{if} \left(\frac{D}{t} \leq 0.11 \cdot \frac{E}{f_y}, 1.0, \text{if} \left(\frac{D}{t} > 0.45 \cdot \frac{E}{f_y}, \text{"\u00e3 ok"}, \frac{0.038}{\frac{D}{t}} \cdot \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \right) \right) = 1$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = 0.859$$

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4.48}\right)^{\frac{1}{2.24}}} = 0.833$$

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 500.685 \cdot \text{kN}$$

Força axial resistente

$$N_{Rd_i} = \text{if} \left(N_{Sd_i} \geq 0, N_{c.Rd}, N_{t.Rd} \right)$$

Momento fletor resistente de cálculo (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 20.055 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = \text{if} \left(\frac{D}{t} \leq \frac{0.07 \cdot E}{f_y}, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 18.232 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Força cortante resistente de cálculo (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$L_v = 2.2\text{m}$$

$$\tau_{cr} = \max \left[\min \left[\frac{1.6 \cdot E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^4}, 0.6 \cdot f_y \right], \min \left[\frac{0.78 \cdot E}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}, 0.6 \cdot f_y \right] \right] = 210 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rd} = \frac{0.5 \cdot \tau_{cr} \cdot A_g}{\gamma_{a1}} = 180.409 \cdot \text{kN}$$

Seções tubulares circulares submetidas exclusivamente à torção (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd} = \max \left[\min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{1.23 \cdot W_t \cdot E}{\left(\frac{D}{t}\right)^4 \cdot \sqrt{\frac{L}{D}}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right], \min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{0.6 \cdot W_t \cdot E}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right] \right]$$

$$T_{Rd} = 16.17 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Método da amplificação dos esforços solicitantes (NBR 8800:2008 anexo D)

$$C_m = 1.0 \quad (\text{adotado de forma conservadora})$$

$$B_{1_i} = \max \left(1.0, \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd_i}}{N_e}} \right) \quad (\text{Obs.: } N_{Sd_i} \text{ leva em conta os efeitos globais de 2ª ordem})$$

Barras submetidas a momentos fletores, força axial e forças cortante (NBR 8800:2008 item 5.5.1)

$$\text{Verif}_{1_i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + \frac{8}{9} \cdot \left(B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}} \right)$$

$$\text{Verif}_{2_i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{2 \cdot N_{Rd_i}} + \left(B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}} \right)$$

$$\text{Verif}_{3_i} = \text{if} \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} \geq 0.2, \text{Verif}_{1_i}, \text{Verif}_{2_i} \right)$$

Obs.: Os esforços cortantes devem ser verificados independentemente

Seções tubulares retangulares submetidas à momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante em relação a um dos eixos centrais de inércia (NBR 8800:2008 item 5.5.2.2)

$$\text{Verif}_{4_i} = \text{if} \left[\left| T_{Sd_i} \right| > 0.2 \cdot T_{Rd}, \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd_i}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sd_{x_i}}|}{M_{Rd}} \right) + \left(\frac{|V_{Sd_{x_i}}|}{V_{Rd}} + \frac{|T_{Sd_i}|}{T_{Rd}} \right)^2, \text{Verif}_{3_i} \right]$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras das diagonais, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.3 – Checagem da barra da diagonal mais solicitada

	Verif.3	V _{Sdx} /V _{Rdx}	V _{Sdy} /V _{Rdy}	T _{Sd} /T _{Rd}
Máx.	0,73	0,00	0,02	0,06

Como T_{Sd}/T_{Rd} é menor que 0,2, é utilizada a Verif.3, com as verificações dos esforços cortantes independentes dos outros esforços.

5.4. Transversinas – 150 x 150 x 6,4 VMB350

A barra que representa a transversina é quebrada, com os nós internos ligados aos nós da malha de elementos finitos que representa a laje. Esses nós são posicionados de acordo com a posição dos conectores. Para o dimensionamento das transversinas foram utilizadas as solicitações nos nós internos e extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção retiradas do catálogo da V&M [11].

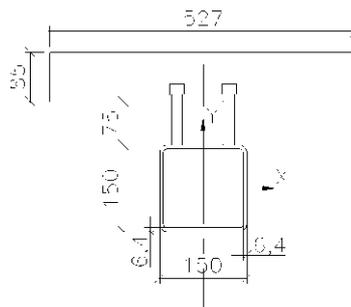


Figura 5.4 – Seção transversal da transversina

Planilha Mathcad

Dados

$$f_y = 350\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento do aço do perfil})$$

$$A_g = 35.9\text{cm}^2 \quad (\text{área bruta do perfil})$$

$$Z_x = 185\text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo x})$$

$$Z_y = Z_x \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo y})$$

$$W_x = 156\text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo x})$$

$$W_y = W_x \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo y})$$

$$W_t = 239\text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de segurança do aço do perfil})$$

$$\gamma_{a2} = 1.35 \quad (\text{coeficiente de segurança do aço do conector})$$

$$E = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do aço})$$

$$h_c = 85\text{mm} \quad (\text{espessura efetiva da laje})$$

$$h_p = 75\text{mm} \quad (\text{altura da fôrma})$$

$$\gamma_c = 1.4 \quad (\text{coeficiente de segurança do concreto})$$

$$f_{ck} = 30\text{MPa} \quad (\text{resistência do concreto})$$

$$t = 6.4\text{mm} \quad (\text{espessura do perfil})$$

$$L = 250\text{mm} \quad (\text{distância entre conectores})$$

$$L_v = 3.01\text{m} \quad (\text{vão das vigas})$$

$$d_v = 2.20\text{m} \quad (\text{distância entre vigas})$$

$$I_x = 1174\text{cm}^4 \quad (\text{inércia em torno do eixo x})$$

$$I_y = I_x \quad (\text{inércia em torno do eixo y})$$

$$r_x = 5.72\text{cm} \quad (\text{raio de giração em torno do eixo x})$$

$$r_y = r_x \quad (\text{raio de giração em torno do eixo } y)$$

$$\nu = 0.3 \quad (\text{coeficiente de poisson})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade transversal})$$

$$J = 1922 \text{cm}^4 \quad (\text{constante de torção pura / Saint-Venant})$$

$$B = 150 \text{mm} \quad (\text{largura})$$

$$H = 150 \text{mm} \quad (\text{altura})$$

$$b = B - 5 \cdot t = 118 \cdot \text{mm} \quad (\text{largura efetiva})$$

$$h = H - 5 \cdot t = 118 \cdot \text{mm} \quad (\text{altura efetiva})$$

$$E_c = 26.072 \text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do concreto})$$

$$f_u = 415 \text{MPa} \quad (\text{tensão de ruptura do aço do conector})$$

$$D_{cs} = 15.9 \text{mm} \quad (\text{diâmetro do conector})$$

$$A_{cs} = \frac{\pi \cdot D_{cs}^2}{4} \quad (\text{área do conector})$$

$$R_g = 0.85 \quad (\text{dois conectores soldados em uma nervura perpendicular ao perfil})$$

$$R_p = 0.75 \quad (\text{conector soldado em nervura perpendicular ao perfil com } emh > 50 \text{mm})$$

$$n_c = 10 \quad (\text{número de conectores entre o meio do vão e o apoio})$$

$$\sigma = f_y \quad (\text{tensão que pode atuar no elemento - adotado de forma conservadora})$$

$$b_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{b}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), b \right] = 118 \cdot \text{mm}$$

$$h_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{h}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), h \right] = 118 \cdot \text{mm}$$

Vigas com seção de aço compacta e com ligação parcial (NBR 8800:2008 anexo O)

$$L_e = \frac{7}{10} \cdot L_v \quad (\text{distância entre pontos de momentos nulos da viga})$$

$$L_e = \frac{7}{10} \cdot 3.01$$

$$b_e = \min\left(d_v, \frac{1}{4} \cdot L_e\right) = 0.527 \text{ m} \quad (\text{largura efetiva da laje})$$

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 57.849$$

$$\text{Verif} = \text{if}(\lambda \leq \lambda_p, \text{"compacta"}, \text{"n\~{o} compacta"}) = \text{"compacta"}$$

$$R_{cd} = \frac{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b_e \cdot h_c}{\gamma_c} = 815.522 \cdot \text{kN} \quad (\text{resistência à compressão no concreto})$$

$$R_{td} = \frac{f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}} = 1.142 \times 10^3 \cdot \text{kN} \quad (\text{resistência à tração no aço})$$

$$Q_{Rd} = \frac{\min(0.5 \cdot A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}, R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_u)}{\gamma_{a2}} = 38.912 \cdot \text{kN} \quad (\text{resistência conector pino})$$

$$F_{cd} = n_c \cdot Q_{Rd} = 389.116 \cdot \text{kN} \quad (\text{resultante de compressão no concreto})$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2} \cdot (R_{td} - F_{cd}) = 376.579 \cdot \text{kN} \quad (\text{força de compressão no aço})$$

$$F_{hd} = \min(R_{cd}, R_{td}) = 815.522 \cdot \text{kN} \quad (\text{esforço cisalhante a ser resistido pelos conectores})$$

$$\eta = \frac{F_{cd}}{F_{hd}} = 0.477 \quad (\text{grau de conexão})$$

$$\eta_{\text{inf}} = \max\left[0.4, 1 - \frac{E}{578 \cdot f_y} \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_e)\right] = 0.4 \quad (\text{grau de conexão mínimo})$$

Barras prismáticas submetidas à força axial de tração (NBR 8800:2008 item 5.2)

$$N_{Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = 1.142 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo x (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 64.75 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 57.849$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 136.256$$

$$M_r = f_y \cdot W_x = 54.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.FLA} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd.FLA} = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.773$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.466$$

$$W_{ef.x} = \frac{b_{ef} \cdot h^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b_{ef}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h} \right)^2 \right] = 106.87 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{ef,x} \cdot f_y = 37.405 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd,FLM} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLM} = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdx} = \min(M_{Rd,FLA}, M_{Rd,FLM}) = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

(ELU: momento de plastificação total da seção)

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo y (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_y \cdot f_y = 64.75 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 57.849$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 136.256$$

$$M_r = f_y \cdot W_y = 54.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd,FLA} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLA} = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.773$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.466$$

$$W_{ef,y} = \frac{h_{ef} \cdot b^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h_{ef}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b} \right)^2 \right] = 106.87 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{ef,y} \cdot f_y = 37.405 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{cr} = \frac{W_{ef,y}^2}{W_y} \cdot f_y = 25.625 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd,FLM} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLM} = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdy} = \min(M_{Rd,FLA}, M_{Rd,FLM}) = 58.864 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

(ELU: momento de plastificação total da seção)

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo x para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot h \cdot t = 15.104 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{h}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 58.797$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 317.184 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdx} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\~{n} compacta"} \right) = 288.349 \cdot \text{kN}$$

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo y para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot b \cdot t = 15.104 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = 18.437$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 58.797$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 317.184 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdy} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 288.349 \cdot \text{kN}$$

Se\u00e7\u00f5es tubulares retangulares compactas submetidas exclusivamente \u00e0 tor\u00e7\u00e3o (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd} = \text{if} \left(\frac{h}{t} \leq 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 45.627 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Barras submetidas a momentos fletores, for\u00e7a axial e for\u00e7as cortantes (NBR 8800:2008 item 5.5.1)

$$\text{Verif}_{1i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} + \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rdy}} \right)$$

$$\text{Verif}_{2i} = \frac{|N_{Sd_i}|}{2 \cdot N_{Rd}} + \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} + \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rdy}}$$

$$\text{Verif}_{3i} = \text{if} \left(\frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd}} \geq 0.2, \text{Verif}_{1i}, \text{Verif}_{2i} \right)$$

Obs.: Os esfor\u00e7os cortantes devem ser verificados independentemente

Se\u00e7\u00f5es tubulares retangulares submetidas \u00e0 momento de tor\u00e7\u00e3o, for\u00e7a axial, momento fletor e for\u00e7a cortante em rela\u00e7\u00e3o a um dos eixos centrais de in\u00e9rcia (NBR 8800:2008 item 5.5.2.2)

$$\text{Verif}_{4i} = \text{if} \left[\left| T_{Sd_i} \right| > 0.2 \cdot T_{Rd}, \frac{|N_{Sd_i}|}{N_{Rd}} + \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rdx}} + \left(\frac{|V_{Sdx_i}|}{V_{Rdx}} + \frac{|T_{Sd_i}|}{T_{Rd}} \right)^2, \text{Verif}_{3i} \right]$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras das transversinas, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.4 – Checagem da barra da transversina mais solicitada

	Verif.3	V_{Sdx}/V_{Rdx}	V_{Sdy}/V_{Rdy}	T_{Sd}/T_{Rd}
Máx.	0,16	0,08	0,03	0,05

Como T_{Sd}/T_{Rd} é menor que 0,2, é utilizada a Verif.3, com as verificações dos esforços cortantes independentes dos outros esforços. Observa-se na rotina que o grau de conexão da ligação parcial é maior que o grau de conexão mínimo exigido.

5.5. Travessas – 400x200x16,0 VMB350 + 200x150x12,5 VMB350 (deitado)

A barra que representa a transversina é quebrada, com os nós internos ligados aos nós da malha de elementos finitos que representa a laje. Para o dimensionamento das travessas foram utilizadas as solicitações nos nós internos e extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção adotada obtidas a partir do programa STRAP [4].

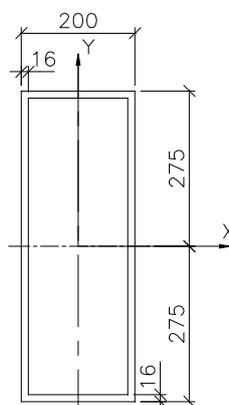


Figura 5.5 – Seção transversal da travessa adotada

Planilha Mathcad

Dados

$$f_y = 350\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento})$$

$$A_g = 229.8\text{cm}^2 \quad (\text{área bruta})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de segurança})$$

$$E = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade})$$

$$I_x = 82703.1\text{cm}^4 \quad (\text{inércia em torno do eixo x})$$

$$I_y = 16198.6\text{cm}^4 \quad (\text{inércia em torno do eixo y})$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} \quad (\text{raio de giração em torno do eixo x})$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} \quad (\text{raio de giração em torno do eixo y})$$

$$\nu = 0.3 \quad (\text{coeficiente de poisson})$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade transversal})$$

$$J = 43027.3\text{cm}^4 \quad (\text{constante de torção})$$

$$t = 16\text{mm} \quad (\text{espessura da chapa})$$

$$B = 200\text{mm} \quad (\text{largura})$$

$$H = 550\text{mm} \quad (\text{altura})$$

$$b = B - 5 \cdot t = 120 \cdot \text{mm} \quad (\text{largura efetiva})$$

$$h = H - 5 \cdot t = 470 \cdot \text{mm} \quad (\text{altura efetiva})$$

$$Z_x = \frac{B \cdot H^2}{4} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{B} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{H} \right)^2 \right] = 3.855 \times 10^3 \text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo x})$$

$$Z_y = \frac{H \cdot B^2}{4} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{H} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{B} \right)^2 \right] = 1.845 \times 10^3 \text{cm}^3 \quad (\text{módulo plástico em torno do eixo y})$$

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{H}{2}} = 3.007 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo x})$$

$$W_y = \frac{I_y}{\frac{B}{2}} = 1.62 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico em torno do eixo } y)$$

$$W_t = 2 \cdot (B - t) \cdot (H - t) \cdot t - 4.5 \cdot (4 - \pi) \cdot t^3 = 3.128 \times 10^3 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção})$$

$$\sigma = f_y \quad (\text{tensão que pode atuar no elemento - adotado de forma conservadora})$$

$$b_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{b}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), b \right] = -155.069 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = \min \left[1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\frac{h}{t}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right), h \right] = 470 \text{ mm}$$

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo x (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 1.349 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 29.375$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 57.849$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 136.256$$

$$M_r = f_y \cdot W_x = 1.053 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.FLA} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd.FLA} = 1.227 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 7.5$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.773$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.466$$

$$W_{ef.x} = \frac{b_{ef} \cdot h^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b_{ef}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h} \right)^2 \right] = 364.583 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{ef.x} \cdot f_y = 127.604 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.FLM} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd.FLM} = 1.227 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdx} = \min(M_{Rd.FLA}, M_{Rd.FLM}) = 1.227 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad (\text{ELU: momento de plastificação total da seção})$$

Momento fletor resistente de cálculo em torno do eixo y (NBR 8800:2008 item 5.4.2)

$$M_{pl} = Z_y \cdot f_y = 645.747 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 7.5$$

$$\lambda_p = 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 57.849$$

$$\lambda_r = 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 136.256$$

$$M_r = f_y \cdot W_y = 566.951 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.FLA} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd.FLA} = 587.043 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{h}{t} = 29.375$$

$$\lambda_p = 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.773$$

$$\lambda_r = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.466$$

$$W_{ef,y} = \frac{h_{ef} \cdot b^2}{1.12 \cdot 4} \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot t}{h_{ef}} \right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot t}{b} \right)^2 \right] = 753.6 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_r = W_{ef,y} \cdot f_y = 263.76 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd,FLM} = \text{if} \left[\lambda \leq \lambda_p, \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{if} \left[\lambda > \lambda_r, \text{"esbelta"}, \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right] \right]$$

$$M_{Rd,FLM} = 452.052 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rdy} = \min(M_{Rd,FLA}, M_{Rd,FLM}) = 452.052 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad (\text{ELU: flambagem local da mesa})$$

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo x para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot h \cdot t = 150.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{h}{t} = 29.375$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 58.797$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 3.158 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdx} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\~{n} compacta"} \right) = 2.871 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Força cortante resistente de cálculo perpendicular ao eixo y para seções compactas (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$k_v = 5.0$$

$$A_w = 2 \cdot b \cdot t = 38.4 \cdot \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = 7.5$$

$$\lambda_p = 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 58.797$$

$$V_{pl} = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y = 806.4 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rdy} = \text{if} \left(\lambda \leq \lambda_p, \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 733.091 \cdot \text{kN}$$

Se\u00e7\u00f5es tubulares retangulares compactas submetidas exclusivamente \u00e0 tor\u00e7\u00e3o (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd} = \text{if} \left(\frac{h}{t} \leq 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}}, \text{"\u00e3 compacta"} \right) = 597.234 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras das travessas, suas solicita\u00e7\u00f5es de projeto (Sd) s\u00e3o menores que as resist\u00eancias de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.5 – Checagem da barra da travessa mais solicitada

	M _{Sdx} /M _{Rdx}	M _{Sdy} /M _{Rdy}	V _{Sdx} /V _{Rdx}	V _{Sdy} /V _{Rdy}	T _{Sd} /T _{Rd}
M\u00e1x.	0,56	0,02	0,17	0,03	0,06

5.6. Colunas – 355,6 x 25,0 VMB350

A coluna mista trata-se de um tubo circular preenchido com concreto onde n\u00e3o foi adotada armadura. De acordo com a NBR8800/2008 [5] item P.3.3, os efeitos da retra\u00e7\u00e3o e flu\u00eancia do concreto podem ser simulados por uma redu\u00e7\u00e3o do m\u00f3dulo de elasticidade do concreto, tomando-se, no lugar de E_c, o valor de E_{c,red} dado por:

$$E_{c.red} = \frac{E_c}{1 + \phi \cdot \left(\frac{N_{G.Sd}}{N_{Sd}} \right)}$$

Onde ϕ é o coeficiente de fluência do concreto, onde admite-se ser tomado igual a zero nas seções tubulares preenchidas com concreto. Logo $E_{c,red} = E_c$.

Para o dimensionamento das colunas foram utilizadas as solicitações nos nós extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9]. Propriedades da seção retiradas do catálogo da V&M [11].

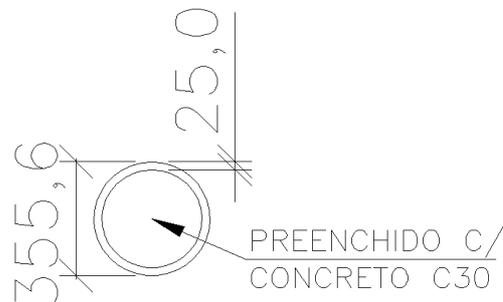


Figura 5.6 – Seção transversal da coluna

Planilha Mathcad

Dados

$D = 355.6\text{mm}$ (diâmetro)

$t = 25.0\text{mm}$ (espessura da chapa)

$K = 1$ (coeficiente de flambagem)

$A_a = 260\text{cm}^2$ (área da seção do perfil de aço)

$A_s = 0\text{cm}^2$ (área da seção da armadura do concreto)

$A_c = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot t)^2}{4} = 733.494\text{cm}^2$ (área da seção do concreto não-fissurado)

$I_a = 35677\text{cm}^4$ (momento de inércia da seção do perfil de aço)

$$I_s = 0 \text{ cm}^4 \quad (\text{momento de inércia da seção da armadura do concreto})$$

$$I_c = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot t)^4}{64} = 4.281 \times 10^4 \text{ cm}^4 \quad (\text{momento de inércia da seção do concreto não-fissurado})$$

$$W_t = 4013 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência à torção da seção do perfil de aço})$$

$$f_y = 350 \text{ MPa} \quad (\text{tensão de escoamento do aço do perfil})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de segurança do aço do perfil})$$

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = 318.182 \text{ MPa}$$

$$f_{ys} = 50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{tensão de escoamento do aço da armadura})$$

$$\gamma_s = 1.15 \quad (\text{coeficiente de segurança do aço da armadura})$$

$$f_{sd} = \frac{f_{ys}}{\gamma_s} = 43.478 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad (\text{resistência do concreto})$$

$$\gamma_c = 1.4 \quad (\text{coeficiente de segurança do concreto})$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 21.429 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 0.95 \quad (\text{coeficiente para seção tubular circular preenchida com concreto})$$

$$f_{cd1} = \alpha \cdot f_{cd} = 20.357 \text{ MPa}$$

$$E_a = 200 \text{ GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do aço estrutural})$$

$$E_s = 210 \text{ GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do aço da armadura})$$

$$E_c = 26071.6 \text{ MPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do concreto})$$

$$Z_a = 2738 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência plástico da seção do perfil de aço})$$

$$Z_s = 0 \text{ mm}^3 \quad (\text{módulo de resistência plástico da seção da armadura do concreto})$$

$$Z_c = \frac{(D - 2 \cdot t) \cdot (D - 2 \cdot t)^2}{4} - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{D}{2} - t\right)^3 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \cdot (4 - \pi) \cdot \left[\frac{D}{2} - t - \left(\frac{D}{2} - t\right)\right] - Z_s$$

$$Z_c = 4.757 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência plástico da seção de concreto})$$

Pilares submetidos à compressão axial (NBR 8800:2008 item P.3)

$$\text{Verif}_0 = \text{if} \left(\frac{D}{t} \leq 0.15 \cdot \frac{E_a}{f_y}, \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right) = \text{"ok"} \quad (\text{verificação da não ocorrência de flambagem local do perfil de aço})$$

$$N_{\text{pl.a.Rd}} = f_{yd} \cdot A_a = 8.273 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_{\text{pl.c.Rd}} = f_{cd1} \cdot A_c = 1.493 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_{\text{pl.s.Rd}} = f_{sd} \cdot A_s = 0$$

$$N_{\text{pl.Rd}} = N_{\text{pl.a.Rd}} + N_{\text{pl.c.Rd}} + N_{\text{pl.s.Rd}} = 9.766 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{\text{pl.Rd}}} = 0.847$$

$$\text{Verif}_1 = \text{if}(\delta < 0.2, \text{"concreto"}, \text{if}(\delta > 0.9, \text{"aço"}, \text{"misto"})) = \text{"misto"}$$

$$N_{\text{pl.R}} = f_y \cdot A_a + \alpha \cdot f_{ck} \cdot A_c + f_{ys} \cdot A_s = 1.119 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

$$EI_e = E_a \cdot I_a + 0.7 \cdot E_c \cdot I_c + E_s \cdot I_s$$

$$N_{e_i} = \frac{\pi^2 \cdot EI_e}{(K \cdot L_i)^2}$$

L (m)	Ne (kN)
4.064	47308.5
4.315	41964.8
4.826	33548.4
5.657	24416.0
4.868	32972.0
4.059	47425.2
3.830	53265.9
3.901	51344.6

$$\lambda_{0.m_i} = \sqrt{\frac{N_{pl.R}}{N_{e_i}}}$$

L (m)	λ_{0m}
4.064	0.486
4.315	0.516
4.826	0.578
5.657	0.677
4.868	0.583
4.059	0.486
3.830	0.458
3.901	0.467

$$\text{Verif}_{2_i} = \text{if}(\lambda_{0.m_i} \leq 2.0, \text{"ok"}, \text{"ñ ok"})$$

L (m)	Verif ₂
4.064	ok
4.315	ok
4.826	ok
5.657	ok
4.868	ok
4.059	ok
3.830	ok
3.901	ok

$$\chi_i = \text{if} \left[\lambda_{0.m_i} \leq 1.5, 0.658 \left(\lambda_{0.m_i} \right)^2, \frac{0.877}{\left(\lambda_{0.m_i} \right)^2} \right]$$

L (m)	χ
4.064	0.906
4.315	0.894
4.826	0.870
5.657	0.825
4.868	0.868
4.059	0.906
3.830	0.916
3.901	0.913

$$N_{c.Rd_i} = \chi_i \cdot N_{pl.c.Rd}$$

L (m)	N _{cRd} (kN)
4.064	1352.4
4.315	1335.5
4.826	1298.6
5.657	1232.5
4.868	1295.5
4.059	1352.8
3.830	1367.5
3.901	1363.0

$$N_{Rd_i} = \chi_i \cdot N_{pl.Rd}$$

L (m)	N _{Rd} (kN)
4.064	8845.4
4.315	8734.5
4.826	8493.4
5.657	8061.2
4.868	8472.7
4.059	8847.5
3.830	8943.8
3.901	8914.5

Momentos fletores de plastificação de cálculo (NBR 8800:2008 item P.5.4)

$$A_{sn} = 0 \text{ cm}^2$$

$$h_n = \frac{A_c \cdot f_{cd1} - A_{sn} \cdot (2 \cdot f_{sd} - f_{cd1})}{2 \cdot D \cdot f_{cd1} + 4 \cdot t \cdot (2 \cdot f_{yd} - f_{cd1})} = 19.627 \cdot \text{mm}$$

$$Z_{sn} = 0 \text{ mm}^3$$

$$Z_{cn} = (D - 2 \cdot t) \cdot h_n^2 - Z_{sn} = 117.721 \cdot \text{cm}^3$$

$$Z_{an} = D \cdot h_n^2 - Z_{cn} - Z_{sn} = 19.261 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_{pl.a.Rd} = f_{yd} \cdot (Z_a - Z_{an}) = 865.053 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.c.Rd} = 0.5 \cdot f_{cd1} \cdot (Z_c - Z_{cn}) = 47.219 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.s.Rd} = f_{sd} \cdot (Z_s - Z_{sn}) = 0$$

$$M_{pl.Rd} = M_{pl.a.Rd} + M_{pl.c.Rd} + M_{pl.s.Rd} = 912.272 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = 0.9 \cdot M_{pl.Rd} = 821.045 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Força cortante resistente de cálculo (NBR 8800:2008 item 5.4.3)

$$L_{v_i} = L_i$$

$$\tau_{cr_i} = \max \left[\min \left[\frac{1.6 \cdot E_a}{\sqrt{\frac{L_{v_i}}{D}} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{5}{4}}}, 0.6 \cdot f_y \right], \min \left[\frac{0.78 \cdot E_a}{\left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}, 0.6 \cdot f_y \right] \right]$$

L (m)	τ_{cr} (MPa)
4.064	210.0
4.315	210.0
4.826	210.0
5.657	210.0
4.868	210.0
4.059	210.0
3.830	210.0
3.901	210.0

$$V_{Rd_i} = \frac{0.5 \cdot \tau_{cr_i} \cdot A_a}{\gamma_{a1}}$$

L (m)	V_{Rd} (kN)
4.064	2481.8
4.315	2481.8
4.826	2481.8
5.657	2481.8
4.868	2481.8
4.059	2481.8
3.830	2481.8
3.901	2481.8

Seções tubulares circulares submetidas exclusivamente à torção (NBR 8800:2008 item 5.5.2.1)

$$T_{Rd_i} = \max \left[\min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{1.23 \cdot W_t \cdot E_a}{\left(\frac{D}{t}\right)^4 \cdot \sqrt{\frac{L_i}{D}}}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right], \min \left[\frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{0.6 \cdot W_t \cdot E_a}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}, \frac{0.6 \cdot W_t \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \right] \right]$$

L (m)	T _{Rd} (kNm)
4.064	766.1
4.315	766.1
4.826	766.1
5.657	766.1
4.868	766.1
4.059	766.1
3.830	766.1
3.901	766.1

Método da amplificação dos esforços solicitantes (NBR 8800:2008 anexo D)

$C_m = 1.0$ (adotado de forma conservadora)

$$B_{1_i} = \max \left(1.0, \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Sd_i}}{N_{e_i}}} \right) \quad (\text{Obs.: } N_{Sd_i} \text{ leva em conta os efeitos globais de } 2^{\text{a}} \text{ ordem})$$

Barras submetidas a momentos fletores, força axial e forças cortantes (PN item 10.3)

$$\text{Verif}_{3_i} = B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}}$$

$$\text{Verif}_{4_i} = \frac{N_{Sd_i} - N_{c.Rd_i}}{N_{Rd_i} - N_{c.Rd_i}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdx_i}|}{M_{Rd}} + B_{1_i} \cdot \frac{|M_{Sdy_i}|}{M_{Rd}}$$

$$\text{Verif}_{5_i} = \text{if} \left(N_{Sd_i} \leq N_{c.Rd_i}, \text{Verif}_{3_i}, \text{Verif}_{4_i} \right)$$

Obs.: Os esforços cortantes devem ser verificados independentemente

Seções tubulares retangulares submetidas à momento de torção, força axial, momento fletor e força cortante em relação a um dos eixos centrais de inércia
(NBR 8800:2008 item 5.5.2.2)

$$\text{Verif}_6 = \text{if} \left[\left| T_{Sd_i} \right| > 0.2 \cdot T_{Rd_i}, \left(\frac{\left| N_{Sd_i} \right|}{N_{Rd_i}} + B_{1_i} \cdot \frac{\left| M_{Sdx_i} \right|}{M_{Rd_i}} \right) + \left(\frac{\left| V_{Sdx_i} \right|}{V_{Rd_i}} + \frac{\left| T_{Sd_i} \right|}{T_{Rd_i}} \right)^2, \text{Verif}_5 \right]$$

Cisalhamento nas superfícies de contato entre o perfil de aço e o concreto
Região de introdução de cargas (NBR 8800:2008 item P.2.1)

Quando a viga estiver ligada apenas ao perfil de aço do pilar:

$$N_{l.Sd_i} = N_{Sd_i} \cdot \left(1 - \frac{N_{pl.a.Rd}}{N_{pl.Rd}} \right) \quad (\text{força axial solicitante na ligação})$$

$$M_{l.Sd_i} = \left| M_{Sdx_i} \right| \cdot \left(1 - \frac{M_{pl.a.Rd}}{M_{pl.Rd}} \right) \quad (\text{momento fletor solicitante na ligação})$$

$$L_{int} = 2 \cdot D = 711.2 \cdot \text{mm} \quad (\text{comprimento de introdução de carga})$$

$$W = 2007 \text{cm}^3 \quad (\text{módulo elástico do perfil})$$

$$\tau_{Sd_i} = \frac{N_{l.Sd_i}}{\pi \cdot (D - 2 \cdot t) \cdot L_{int}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_{l.Sd_i} \cdot t}{L_{int} \cdot W} \quad (\text{tensão cisalhante solicitante na ligação})$$

$$\tau_{Rd} = 0.55 \text{MPa} \quad (\text{tensão cisalhante resistente - NBR 8800:2008 tabela P.1})$$

$$\text{Verif}_7 = \frac{\tau_{Sd_i}}{\tau_{Rd}}$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das barras das colunas, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da barra mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 5.6 – Checagem da barra da coluna mais solicitada

	Verif.5	V _{Sdx} /V _{Rdx}	V _{Sdy} /V _{Rdy}	T _{Sd} /T _{Rd}	τ _{Sd} /τ _{Rd}
Máx.	0,83	0,05	0,01	0,00	1,00

Como T_{sd}/T_{Rd} é menor que 0,2, é utilizada a Verif.5, com as verificações dos esforços cortantes independentes dos outros esforços. Observa-se na rotina que na ligação da coluna com a travessa, que é uma região de introdução de carga, as tensões de cisalhamento na interface entre o concreto e o perfil de aço do pilar misto são da mesma ordem de grandeza que a tensão limite dada pela tabela P.1 da NBR8800/2008 [5], logo não ocorre escorregamento significativo nessa interface, estando o pilar misto apto a resistir com segurança os esforços oriundos da estrutura da passarela.

5.7. Laje

A laje mista foi verificada para efeito de ELU segundo a NBR 8800:2008 [5] anexo Q.

5.8. Resumo verificações

Segue imagens indicando as barras mais solicitadas e suas checagens.

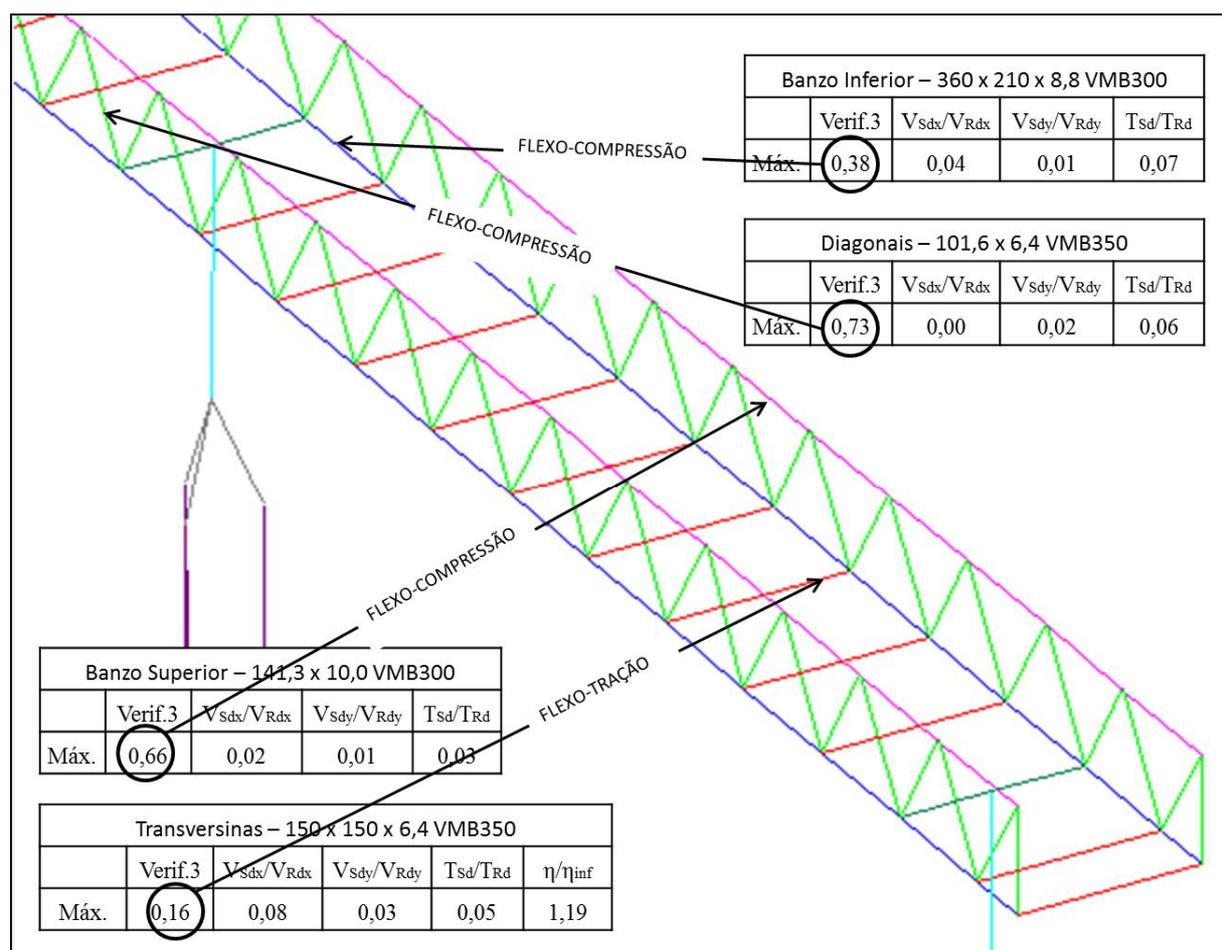


Figura 5.7 – Barras mais solicitadas

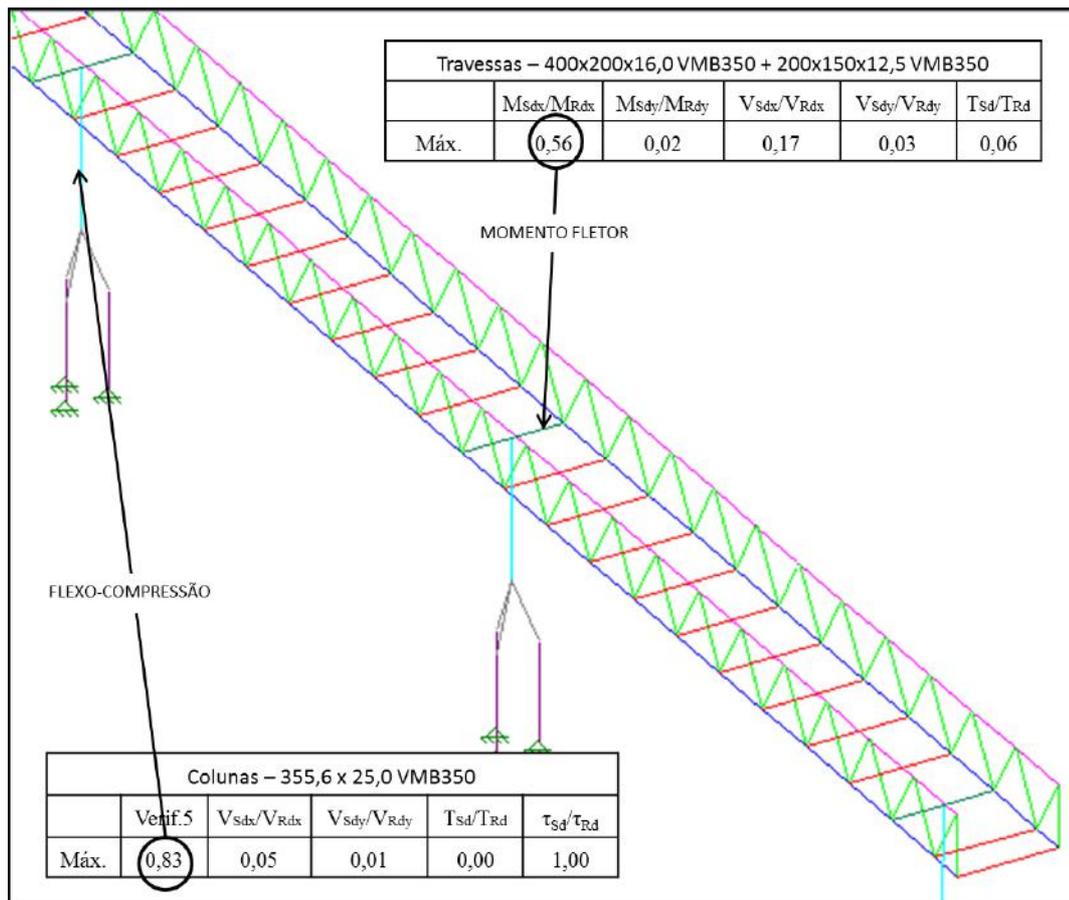


Figura 5.8 – Barras mais solicitadas

6. LIGAÇÕES

De posse dos resultados do modelo computacional foi elaborada a verificação das ligações. A determinação da resistência de cálculo das ligações foi feita com base nas prescrições da norma NBR 8800:2008[5] e do projeto de norma para tubos [10]. As ligações da treliça são classificadas como ligações K com afastamento e DK com afastamento. Segue detalhe da treliça indicando o local das ligações, tipo das ligações e nomenclaturas.

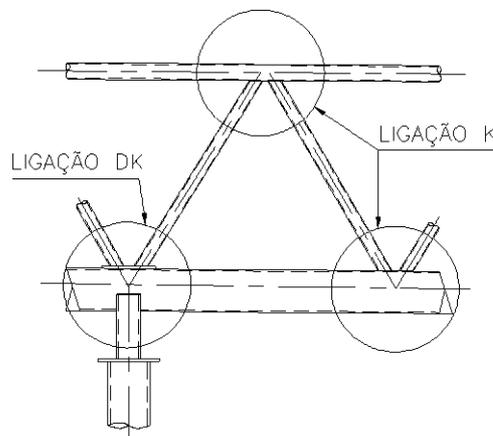


Figura 6.1 – Detalhe da treliça indicando as ligações

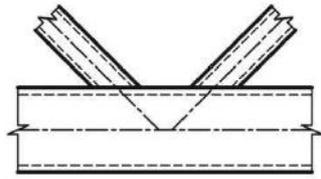


Figura 6.2 – Ligação K com afastamento

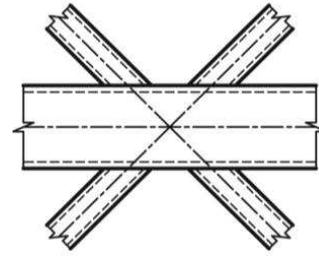


Figura 6.3 – Ligação DK com afastamento (consideração para cálculo)

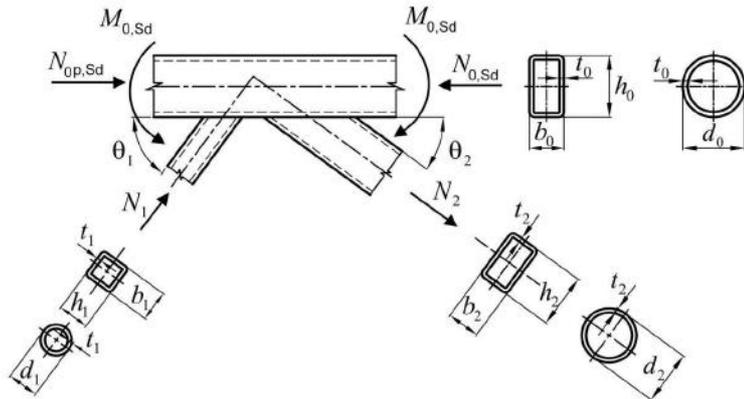


Figura 6.4 – Parâmetros, convenções e nomenclaturas

6.1. Ligação Diagonal – Banzo Inferior

Essas são ligações soldadas entre diagonais de perfis tubulares circulares e bantos de perfis tubulares retangulares. São classificadas como ligações K com afastamento no vão da treliça. Como nos apoios da treliça (travessa de apoio), a resultante perpendicular ao banzo das forças externas aplicadas no nó (reações de apoio) são superiores a 20% da maior projeção perpendicular ao banzo das forças das diagonais, a ligação é classificada como DK com afastamento.

A capacidade resistente de cálculo da ligação é baseada nos seguintes modos de falha:

Modo A – Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes;

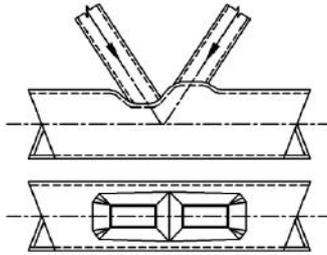


Figura 6.5 – Modo de falha A

Modo C – Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes;

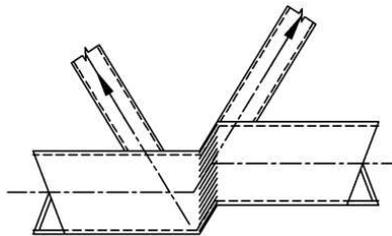


Figura 6.6 – Modo de falha C

Modo D – Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes;

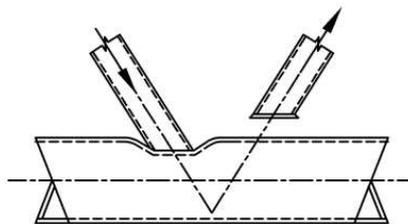


Figura 6.7 – Modo de falha D

Modo E – Ruptura ou plastificação na região da solda ou flambagem localizada de diagonais ou montantes devido a distribuição não uniforme de tensão.

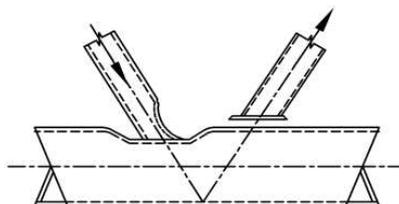


Figura 6.8 – Modo de falha E

Para a verificação das ligações foram utilizadas as solicitações nos nós extremos das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9].

Planilha Mathcad

Ligações soldadas entre perfis tubulares circulares com banzos de perfis tubulares retangulares - diagonal / banzo inferior (PN item 6.3)

A seguir é feita a verificação dos requisitos necessários para a aplicação das fórmulas e a verificação de ligações K, DK, K com reforço e DK com reforço.

I. Dados

$$E = 200\text{GPa} \quad (\text{módulo de elasticidade do aço})$$

$$f_{y0} = 300\text{MPa} \quad (\text{resistência ao escoamento do aço do perfil do banzo})$$

$$h_0 = 360\text{mm} \quad (\text{altura da seção transversal do banzo})$$

$$b_0 = 210\text{mm} \quad (\text{largura da seção transversal do banzo})$$

$$t_0 = 8.8\text{mm} \quad (\text{espessura da parede do banzo})$$

$$A_0 = 95.9\text{cm}^2 \quad (\text{área da seção transversal do banzo})$$

$$W_0 = 913\text{cm}^3 \quad (\text{módulo de resistência elástico da seção transversal do banzo})$$

$$f_{y1} = 350\text{MPa} \quad (\text{resistência ao escoamento do aço do perfil da diagonal 1})$$

$$d_1 = 101.6\text{mm} \quad (\text{diâmetro da diagonal 1})$$

$$t_1 = 6.4\text{mm} \quad (\text{espessura da parede da diagonal 1})$$

$$\theta_1 = 60\text{deg} \quad (\text{ângulo entre a diagonal 1 e o banzo})$$

$$f_{y2} = f_{y1} \quad (\text{resistência ao escoamento do aço do perfil da diagonal 2})$$

$$d_2 = d_1 \quad (\text{diâmetro da diagonal 2})$$

$$t_2 = t_1 \quad (\text{espessura da parede da diagonal 2})$$

$$\theta_2 = \theta_1 \quad (\text{ângulo entre a diagonal 2 e o banzo})$$

$$g = 58\text{mm} \quad (\text{comprimento do afastamento entre diagonais longitudinal ao banzo})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente de ponderação da resistência})$$

$$\sigma_{0.Sd_i} = \frac{N_{0.Sd_i}}{A_0} + \frac{M_{0.Sd_i}}{W_0}$$

$$n_i = \frac{\sigma_{0.Sd_i}}{f_{y0}}$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot b_0}$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0}$$

$$k_{n_i} = \text{if} \left(n_i < 0, 1.3 + \frac{0.4 \cdot n_i}{\beta}, 1.0 \right)$$

II. Condições de validade de ligações soldadas entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares retangulares (PN tabela 6.6)

A força resistente de cálculo das ligações deve ser tomada conforme os itens a seguir, desde que sejam atendidas as condições abaixo.

$$\text{if} \left(\frac{d_1}{t_1} \leq 0.05 \cdot \frac{E}{f_{y1}}, \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right) = \text{"ok"}$$

$$\text{if} \left(\frac{d_1}{t_1} \leq 50, \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right) = \text{"ok"}$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{d_1}{b_0} \geq 0.4 \right) \wedge \left(\frac{d_1}{b_0} \leq 0.8 \right), \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right] = \text{"ok"}$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{b_0}{t_0} \leq 36 \right) \wedge \left(\frac{b_0}{t_0} \leq 1.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}} \right), \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right] = \text{"ok"}$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{b_0}{t_0} \leq 36 \right) \wedge \left(\frac{b_0}{t_0} \leq 1.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}} \right), \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right] = \text{"ñ ok"}$$

$$\text{if} \left[\left[\frac{g}{b_0} \leq 1.5(1 - \beta) \right] \wedge \left[\frac{g}{b_0} \geq 0.5(1 - \beta) \right], "ok", "ñ ok" \right] = "ok"$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{h_0}{b_0} \geq 0.5 \right) \wedge \left(\frac{h_0}{b_0} \leq 2.0 \right), "ok", "ñ ok" \right] = "ok"$$

III. Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas K entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares retangulares - Ligação K com afastamento (PN tabela 6.10)

Abaixo são dadas as forças axiais resistentes para cada modo de falha (item III.1 a III.4).

$$\alpha = 0$$

$$A_v = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$$

$$d_{1,ef} = \min \left(\frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot d_1, d_1 \right)$$

$$d_{1,e.p} = \min \left(\frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} \cdot d_1, d_1 \right)$$

III.1. Modo de falha A

$$N_{1.Rd.A_i} = \frac{\frac{9.79 \cdot k_{n_i} \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin(\theta_1)} \cdot \left(\frac{2 \cdot d_1 + 2 \cdot d_2}{4 \cdot b_0} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

III.2. Modo de falha C

$$N_{1.Rd.C} = \frac{\frac{0.66 \cdot f_{y0} \cdot A_v}{\sin(\theta_1)}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{0.Sd_i} = N_{1.Sd_i} \cdot \sin(\theta_1) + N_{2.Sd_i} \cdot \sin(\theta_2)$$

$$V_{pl.0.Rd} = \frac{1.2 \cdot (h_0 - 4 \cdot t_0) \cdot t_0 \cdot f_{y0}}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{0.Rd_i} = \frac{1.1 \cdot \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_0 \cdot S_{d_i}}{V_{pl.0.Rd}} \right)^2} \right]}{\gamma_{a1}}$$

III.3. Modo de falha E

$$N_{1.Rd.E} = \frac{1.1 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot d_1 - 4 \cdot t_1 + d_1 + d_{1.ef})}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

III.4. Modo de falha D

No caso de a condição abaixo ser negativa, não ocorre o modo de falha D e é tomado um valor de força axial resistente igual ao modo de falha C.

$$N_{1.Rd.D} = \text{if} \left[\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right), \frac{0.66 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot d_1}{\sin(\theta_1)} + d_1 + d_{1.e.p} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}, N_{1.Rd.C} \right]$$

III.5. Modo de falha determinante - ligação K

A força axial resistente de cálculo da ligação é tomada como o menor valor entre os modos de falha acima indicados (item III.1 a III.4).

$$N_{1.Rd_i} = \min(N_{1.Rd.A_i}, N_{1.Rd.C}, N_{1.Rd.E}, N_{1.Rd.D})$$

$$N_{2.Rd_i} = N_{1.Rd_i}$$

IV. Critério de cálculo para tipos especiais de ligações soldadas uniplanares entre diagonais e banzos de perfis tubulares retangulares - Ligação DK (PN tabela 6.12)

Abaixo são feitas as verificações para os casos de ligação DK (item IV.1 e IV.2)

IV.1. Todas as diagonais devem ser comprimidas ou tracionadas

A ligação se comporta como uma ligação X, abaixo é dado a força axial resistente para o caso (item IV.1.1 e IV.1.2).

IV.1.1. Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas X entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares retangulares - modo de falha A (PN tabela 6.9)

Somente é dada a força axial resistente para o modo de falha A, devido a condição $\beta \leq 0,85$.

$$\beta_x = \frac{d_1}{b_0} = 0.484$$

$$\eta_x = \frac{d_1}{b_0} = 0.484$$

$$k_{n,x_i} = \text{if} \left(n_i < 0, 1.3 + \frac{0.4 \cdot n_i}{\beta_x}, 1.0 \right)$$

$$N_{1.Rd.X_i} = \frac{\frac{k_{n,x_i} \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta_x) \cdot \sin(\theta_1)} \cdot \left(\frac{2.2 \cdot \eta_x}{\sin(\theta_1)} + 4.4 \cdot \sqrt{1 - \beta_x} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$N_{2.Rd.X_i} = N_{1.Rd.X_i}$$

IV.1.2. Verificação - ligação DK com ambas diagonais comprimidas ou ambas tracionadas

A força axial resistente é o maior valor entre as das diagonais.

$$N_{x.Rd_i} = \max \left(\left| N_{1.Rd.X_i} \cdot \sin(\theta_1) \right|, \left| N_{2.Rd.X_i} \cdot \sin(\theta_2) \right| \right)$$

$$\text{Verif}_{1_i} = \frac{N_{1.Sd_i} \cdot \sin(\theta_1) + N_{2.Sd_i} \cdot \sin(\theta_2)}{N_{x.Rd_i}}$$

IV.2. A diagonal 1 é comprimida e a diagonal 2 é tracionada

A força axial resistente é a mesma da ligação K, satisfazendo a condição abaixo.

$$N_{Sd_i} = \min(N_{1.Sd_i}, N_{2.Sd_i})$$

$$N_{pl.0.Rd} = \frac{A_0 \cdot f_{y0}}{\gamma_{a1}}$$

$$\text{Verif}_{2_i} = \max \left[\frac{N_{Sd_i}}{N_{1.Rd_i}}, \left(\frac{N_{0.Sd_i}}{N_{pl.0.Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_{0.Sd_i}}{V_{pl.0.Rd}} \right)^2 \right]$$

V. Verificação

20% da maior projeção perpendicular ao banzo (em módulo) das forças das diagonais:

$$N\sin\theta_i = \max\left(\left|0.2 \cdot N_1 \cdot S_{d_i} \cdot \sin(\theta_1)\right|, \left|0.2 \cdot N_2 \cdot S_{d_i} \cdot \sin(\theta_2)\right|\right)$$

Classificação da ligação DK com relação aos sentidos das forças axiais nas diagonais:

$$\text{Verif}_{3_i} = \text{if}\left(N_1 \cdot S_{d_i} \cdot N_2 \cdot S_{d_i} > 0, \text{Verif}_{1_i}, \text{Verif}_{2_i}\right)$$

Verificação da diagonal 1 com classificação da ligação em K ou DK:

$$\text{Verif}_{4_i} = \text{if}\left(\left|V_{S_{d_i}}\right| \leq N\sin\theta_i, \frac{\left|N_1 \cdot S_{d_i}\right|}{N_1 \cdot R_{d_i}}, \left|\text{Verif}_{3_i}\right|\right)$$

Verificação da diagonal 2 com classificação da ligação em K ou DK:

$$\text{Verif}_{5_i} = \text{if}\left(\left|V_{S_{d_i}}\right| \leq N\sin\theta_i, \frac{\left|N_2 \cdot S_{d_i}\right|}{N_2 \cdot R_{d_i}}, \left|\text{Verif}_{3_i}\right|\right)$$

Verificação do banzo:

$$\text{Verif}_{6_i} = \frac{\left|N_0 \cdot S_{d_i}\right|}{N_0 \cdot R_{d_i}}$$

VI. Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas reforçadas K entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares retangulares - Reforço com chapa na mesa do banzo - Ligação K com afastamento (PN tabela 6.15)

Abaixo são dadas as dimensões da chapa de reforço e as forças axiais resistentes para os modos de falha (item VI.1 a VI.4).

$$l_{p,\min} = 1.5 \cdot \left(\frac{d_1}{\sin(\theta_1)} + g + \frac{d_2}{\sin(\theta_2)} \right) = 438.953 \cdot \text{mm} \quad (\text{comprimento mínimo da chapa})$$

$$l_p = 450 \text{mm} \quad (\text{comprimento adotado da chapa})$$

$$b_{p,\min} = b_0 - 2 \cdot t_0 = 192.4 \cdot \text{mm} \quad (\text{largura mínima da chapa})$$

$$b_p = 200 \text{mm} \quad (\text{largura adotada da chapa})$$

$$t_{p,\min} = \max(2 \cdot t_1, 2 \cdot t_2) = 12.8 \cdot \text{mm} \quad (\text{espessura mínima da chapa})$$

$t_p = 19.05\text{mm}$ (espessura adotada da chapa)

$f_{yp} = 345\text{MPa}$ (resistência ao escoamento do aço da chapa)

VI.1. Modo de falha A

$$N_{1.Rd.A_i} = \frac{\frac{9.79 \cdot k_{n_i} \cdot f_{y0} \cdot t_p^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin(\theta_1)} \cdot \left(\frac{2 \cdot d_1 + 2 \cdot d_2}{4 \cdot b_0} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

VI.2. Modo de falha C

$$N_{1.Rd.C} = \frac{\frac{0.66 \cdot f_{y0} \cdot A_v}{\sin(\theta_1)}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{0.Sd_i} = N_{1.Sd_i} \cdot \sin(\theta_1) + N_{2.Sd_i} \cdot \sin(\theta_2)$$

$$V_{pl.0.Rd} = \frac{1.2 \cdot (h_0 - 4 \cdot t_0) \cdot t_0 \cdot f_{y0}}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{0.Rd_i} = \frac{1.1 \cdot \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{0.Sd_i}}{V_{pl.0.Rd}} \right)^2} \right]}{\gamma_{a1}}$$

VI.3. Modo de falha E

$$N_{1.Rd.E} = \frac{1.1 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot d_1 - 4 \cdot t_1 + d_1 + d_{1.ef})}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

VI.4. Modo de falha D

No caso de a condição abaixo ser negativa, não ocorre o modo de falha D e é tomado um valor de força axial resistente igual ao modo de falha C.

$$N_{1.Rd.D} = \text{if} \left[\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right), \frac{0.66 \cdot f_{y0} \cdot t_p \cdot \left(\frac{2 \cdot d_1}{\sin(\theta_1)} + d_1 + d_{1.e.p} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}, N_{1.Rd.C} \right]$$

VI.5. Modo de falha determinante - ligação K com reforço

A força axial resistente de cálculo da ligação é tomada como o menor valor entre os modos de falha acima indicados (item VI.1 a VI.4).

$$N_{1.Rd_i} = \min(N_{1.Rd.A_i}, N_{1.Rd.C}, N_{1.Rd.E}, N_{1.Rd.D})$$

$$N_{2.Rd_i} = N_{1.Rd_i}$$

VII. Critério de cálculo para tipos especiais de ligações soldadas uniplanares entre diagonais e banzos de perfis tubulares retangulares - Reforço com chapa na mesa do banzo - Ligação DK (PN tabela 6.12)

Abaixo são feitas as verificações para os casos de ligação DK com reforço (item VII.1 e VII.2).

VII.1. Todas as diagonais devem ser comprimidas ou tracionadas

A ligação se comporta como uma ligação X com reforço, a seguir é dado a força axial resistente para o caso (item VII.1.1 e VII.1.2).

VII.1.1. Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas reforçadas X entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares retangulares - modo de falha A (PN tabela 6.14)

Abaixo os casos de ligação X com reforço (item VII.1.1.1 e VII.1.1.2).

VII.1.1.1. Diagonal tracionada

$$N_{t.Rd.X} = \frac{\frac{1.1 \cdot f_{yp} \cdot t_p^2}{\left(1 - \frac{d_1}{b_p} \right) \cdot \sin(\theta_1)} \cdot \left(\frac{2 \cdot \frac{d_1}{b_p}}{\sin(\theta_1)} + 4 \cdot \sqrt{1 - \frac{d_1}{b_p}} \right)}{\gamma_{a1}} \cdot \frac{\pi}{4}$$

VII.1.1.2. Diagonal comprimida

$$k_{n,x} = 1.0$$

$$N_{c.Rd.X} = \frac{k_{n.x} \cdot f_{y0} \cdot t_p^2}{(1 - \beta_x) \cdot \sin(\theta_1)} \cdot \left(\frac{2.2 \cdot \eta_x}{\sin(\theta_1)} + 4.4 \cdot \sqrt{1 - \beta_x} \right) \cdot \frac{\pi}{4 \gamma_{a1}}$$

VII.1.1.3. Modo de falha determinante - ligação X com reforço

A força axial resistente para o caso de ligação X com reforço é tomada como o menor valor entre a força axial resistente para o caso de diagonal tracionada e o caso de diagonal comprimida (itens VII.1.1.1 e VII.1.1.2).

$$N_{1.Rd.X_i} = \text{if}(N_{1.Sd_i} \geq 0, N_{t.Rd.X}, N_{c.Rd.X})$$

$$N_{2.Rd.X_i} = \text{if}(N_{2.Sd_i} \geq 0, N_{t.Rd.X}, N_{c.Rd.X})$$

VII.1.2. Verificação - ligação DK com reforço com ambas as diagonais comprimidas ou ambas tracionadas

A força axial resistente é o maior valor entre as das diagonais.

$$N_{x.Rd_i} = \max\left(\left|N_{1.Rd.X_i} \cdot \sin(\theta_1)\right|, \left|N_{2.Rd.X_i} \cdot \sin(\theta_2)\right|\right)$$

$$\text{Verif}_{1_i} = \frac{N_{1.Sd_i} \cdot \sin(\theta_1) + N_{2.Sd_i} \cdot \sin(\theta_2)}{N_{x.Rd_i}}$$

VII.2. A diagonal 1 é comprimida e a diagonal 2 é tracionada

A força axial resistente é a mesma da ligação K, satisfazendo a condição abaixo.

$$N_{Sd_i} = \min(N_{1.Sd_i}, N_{2.Sd_i})$$

$$N_{pl.0.Rd} = \frac{A_0 \cdot f_{y0}}{\gamma_{a1}}$$

$$\text{Verif}_{2_i} = \max\left[\frac{N_{Sd_i}}{N_{1.Rd_i}}, \left(\frac{N_{0.Sd_i}}{N_{pl.0.Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{0.Sd_i}}{V_{pl.0.Rd}}\right)^2\right]$$

VIII. Verificação - ligação com reforço

20% da maior projeção perpendicular ao banzo (em módulo) das forças das diagonais:

$$N\sin\theta_i = \max\left(\left|0.2 \cdot N_1 \cdot S_{d_i} \cdot \sin(\theta_1)\right|, \left|0.2 \cdot N_2 \cdot S_{d_i} \cdot \sin(\theta_2)\right|\right)$$

Classificação da ligação DK reforçada, com relação aos sentidos das forças axiais nas diagonais:

$$\text{Verif}_3 = \text{if}\left(N_1 \cdot S_{d_i} \cdot N_2 \cdot S_{d_i} > 0, \text{Verif}_1, \text{Verif}_2\right)$$

Verificação da diagonal 1 com classificação da ligação em K reforçada ou DK reforçada:

$$\text{Verif}_4 = \text{if}\left(\left|V_{S_{d_i}}\right| \leq N\sin\theta_i, \frac{\left|N_1 \cdot S_{d_i}\right|}{N_1 \cdot R_{d_i}}, \left|\text{Verif}_3\right|\right)$$

Verificação da diagonal 2 com classificação da ligação em K reforçada ou DK reforçada:

$$\text{Verif}_5 = \text{if}\left(\left|V_{S_{d_i}}\right| \leq N\sin\theta_i, \frac{\left|N_2 \cdot S_{d_i}\right|}{N_2 \cdot R_{d_i}}, \left|\text{Verif}_3\right|\right)$$

Verificação do banzo:

$$\text{Verif}_6 = \frac{\left|N_0 \cdot S_{d_i}\right|}{N_0 \cdot R_{d_i}}$$

Fim Planilha Mathcad

A partir da checagem das ligações diagonal – banzo inferior observou-se:

- Nas ligações das regiões aonde chega a transversina, as solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da ligação mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 6.1 – Checagem da ligação “diagonal – banzo inferior” mais solicitada (região da transversina)

	Verif.4	Verif.5	Verif.6
Máx.	0,87	0,86	0,13

• Nas ligações das regiões aonde chega a travessa, as solicitações de projeto (Sd) são maiores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da ligação mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 6.2 – Checagem da ligação “diagonal – banzo inferior” mais solicitada (região da travessa)

	Verif.4	Verif.5	Verif.6
Máx.	3,08	3,08	0,14

• Nas ligações das regiões aonde chega a travessa, com a introdução da chapa de reforço de dimensões 19x200x450mm na mesa do banzo, as solicitações de projeto (Sd) foram menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da ligação com reforço mais solicitada (capacidade mais exigida).

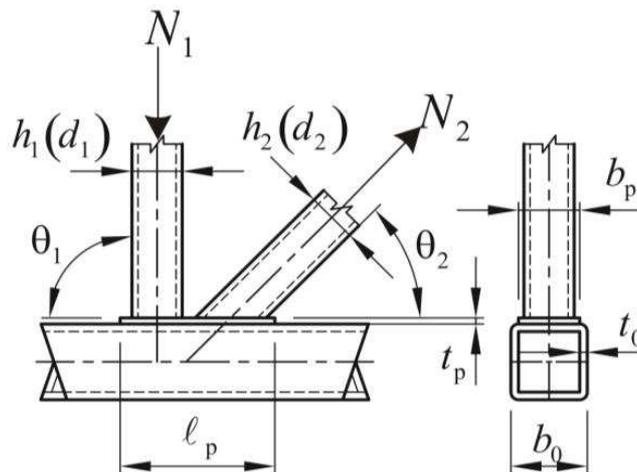


Figura 6.9 – Reforço com chapa na mesa do banzo para os modos de falha A, D e E

Tabela 6.3 – Checagem da ligação “diagonal – banzo inferior” com chapa de reforço mais solicitada (região da travessa)

	Verif.4	Verif.5	Verif.6
Máx.	0,66	0,66	0,14

• Na verificação das condições de validade da rotina acima (item II) observou-se que as condições abaixo não foram satisfeitas. Essas condições são pré-requisitos para a aplicabilidade das fórmulas utilizadas na rotina.

$$h_0/t_0 \leq 36 \rightarrow 360/8,8 = 40,9 > 36 \rightarrow \text{ñ ok}$$

$$h_0/t_0 \leq 1,45 \cdot \sqrt{(E/f_y)} \rightarrow 360/8,8 = 40,9 > 1,45 \cdot \sqrt{(200 \cdot 10^3/300)} = 37,4 \rightarrow \text{ñ ok}$$

Onde:

h_0 : altura seção banzo; t_0 : espessura banzo; E : módulo de elasticidade; f_y : tensão de escoamento

Levando-se em conta essa não conformidade, optou-se por também introduzir a chapa de reforço nas ligações junto à região da transversina, de forma a aumentar a segurança da estrutura. Abaixo os valores das checagens da ligação com reforço mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 6.4 – Checagem da ligação “diagonal – banzo inferior” com chapa de reforço mais solicitada (região da transversina)

	Verif.4	Verif.5	Verif.6
Máx.	0,47	0,47	0,13

6.2. Ligação Diagonal – Banzo Superior

Essas são ligações soldadas entre diagonais de perfis tubulares circulares e banzos de perfis tubulares circulares. São classificadas como ligações K com afastamento.

A capacidade resistente de cálculo da ligação é baseada nos seguintes modos de falha:

Modo A – Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes;

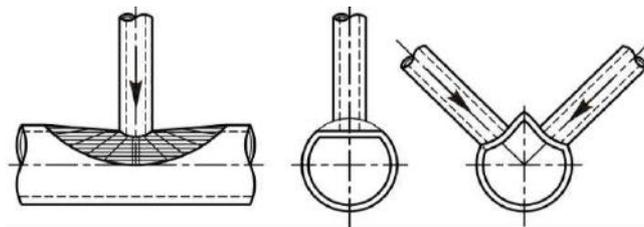


Figura 6.10 – Esquema do modo de falha A para força axial em uma ligação do tipo T e em uma ligação do tipo TT

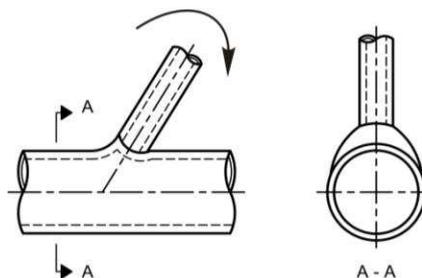


Figura 6.11 – Esquema do modo de falha A para momento fletor em uma ligação do tipo Y

Modo D – Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes;

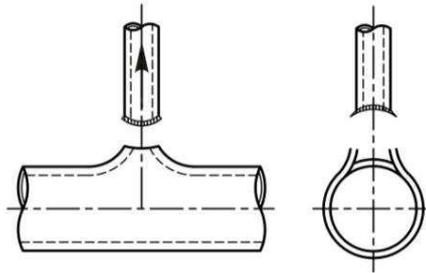


Figura 6.12 – Esquema do modo de falha D para força axial em uma ligação do tipo T

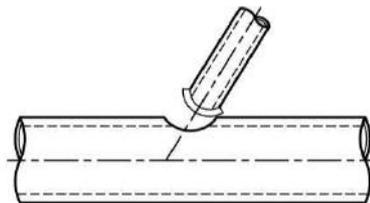


Figura 6.13 – Esquema do modo de falha D para momento fletor em uma ligação do tipo Y

Para a verificação das ligações foram utilizadas as solicitações nos nós das barras. Segue a rotina de verificação, desenvolvida com o auxílio do programa Mathcad [9].

Planilha Mathcad

Ligações soldadas entre perfis tubulares circulares - diagonal / banzo superior (PN item 6.2)

A seguir é feita a verificação dos requisitos necessários para a aplicação das fórmulas e a verificação de ligações K.

I. Dados

$E = 200\text{GPa}$ (módulo de elasticidade do aço)

$f_{y0} = 300\text{MPa}$ (resistência ao escoamento do aço do perfil do banzo)

$d_0 = 141.3\text{mm}$ (diâmetro do banzo)

$t_0 = 10\text{mm}$ (espessura da parede do banzo)

$A_0 = 41.2\text{cm}^2$ (área da seção transversal do banzo)

$W_0 = 127\text{cm}^3$ (módulo de resistência elástico da seção transversal do banzo)

$f_{y1} = 350\text{MPa}$ (resistência ao escoamento do aço do perfil da diagonal 1)

$d_1 = 101.6\text{mm}$ (diâmetro da diagonal 1)

$t_1 = 6.4\text{mm}$ (espessura da parede da diagonal 1)

$\theta_1 = 60\text{deg}$ (ângulo entre a diagonal 1 e o banzo)

$f_{y2} = f_{y1}$ (resistência ao escoamento do aço do perfil da diagonal 2)

$d_2 = d_1$ (diâmetro da diagonal 2)

$t_2 = t_1$ (espessura da parede da diagonal 2)

$\theta_2 = \theta_1$ (ângulo entre a diagonal 2 e o banzo)

$g = 35\text{mm}$ (comprimento do afastamento entre diagonais longitudinal ao banzo)

$\gamma_{a1} = 1.1$ (coeficiente de ponderação da resistência)

$$\sigma_{0p.Sd_i} = \frac{N_{0p.Sd_i}}{A_0} + \frac{M_{0p.Sd_i}}{W_0}$$

$$n_{p_i} = \frac{\sigma_{0p.Sd_i}}{f_{y0}}$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_0}$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0}$$

$$k_{p_i} = \text{if} \left[n_{p_i} < 0, 1 + 0.3 \cdot n_{p_i} - 0.3 \cdot (n_{p_i})^2, 1 \right]$$

$$k_g = \gamma^{0.2} \cdot \left(1 + \frac{0.024 \cdot \gamma^{1.2}}{0.5 \cdot \frac{E}{t_0} - 1.33} \right)$$

II. Requisitos necessários (PN item 6.2.1)

A força resistente de cálculo das ligações deve ser tomada conforme os itens a seguir, desde que sejam atendidas as condições abaixo

$$\text{if} \left[\left(\frac{d_1}{d_0} \geq 0.2 \right) \wedge \left(\frac{d_1}{d_0} \leq 1.0 \right), "ok", "ñ ok" \right] = "ok"$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{d_0}{t_0} \geq 10.0 \right) \wedge \left(\frac{d_0}{t_0} \leq 50.0 \right), "ok", "ñ ok" \right] = "ok"$$

$$\text{if} \left[\left(\frac{d_1}{t_1} \geq 10.0 \right) \wedge \left(\frac{d_1}{t_1} \leq 50.0 \right), "ok", "ñ ok" \right] = "ok"$$

$$\text{if} \left(\frac{d_0}{t_0} \leq 0.11 \cdot \frac{E}{f_{y0}}, "ok", "ñ ok" \right) = "ok"$$

$$\text{if} \left(\frac{d_1}{t_1} \leq 0.11 \cdot \frac{E}{f_{y1}}, "ok", "ñ ok" \right) = "ok"$$

III. Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas entre perfis tubulares circulares - ligação K com afastamento (PN tabela 6.1)

Abaixo são dadas as forças axiais resistentes de cálculo, das diagonais, para cada modo de falha (itens III.1 e III.2).

III.1. Modo de falha A

$$N_{1.Rd.A_1} = \frac{k_g \cdot k_{p_i} \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin(\theta_1)} \cdot \left(1.98 + 11.22 \cdot \frac{d_1}{d_0} \right)$$

III.2. Modo de falha D

$$N_{1.Rd.D_i} = \text{if} \left[d_1 \leq d_0 - 2 \cdot t_0, \frac{0.66 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \left(\frac{1 + \sin(\theta_1)}{2 \cdot \sin(\theta_1)^2} \right)}{\gamma_{a1}}, N_{1.Rd.A_i} \right]$$

IV. Momento fletor resistente de cálculo das ligações soldadas entre montantes e banzos de perfil tubular circular (momentos fora do plano)

Abaixo são dados os momentos fletores resistentes de cálculo, das diagonais, fora do plano da treliça, para cada modo de falha (itens IV.1 e IV.2).

IV.1. Modo de falha A

$$M_{op.1.Rd.A_i} = \frac{f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1 \cdot \frac{2.97 \cdot k_{p_i}}{1 - 0.81 \cdot \beta}}{\gamma_{a1}}$$

IV.2. Modo de falha D

$$M_{op.1.Rd.D_i} = \text{if} \left(d_1 \leq d_0 - 2 \cdot t_0, \frac{0.6 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot d_1^2 \cdot \frac{3.3 + 1.1 \cdot \sin(\theta_1)}{4 \cdot \sin(\theta_1)^2}}{\gamma_{a1}}, M_{op.1.Rd.A_i} \right)$$

V. Verificação

A força axial resistente de cálculo da ligação é tomada como o menor valor entre os modos de falha acima indicados (itens III.1 e III.2):

$$N_{1.Rd_i} = \min(N_{1.Rd.A_i}, N_{1.Rd.D_i})$$

$$N_{2.Rd_i} = N_{1.Rd_i}$$

O momento fletor fora do plano resistente de cálculo da ligação é tomado como o menor valor entre os modos de falha acima indicados (itens IV.1 e IV.2):

$$M_{op.1.Rd_i} = \min(M_{op.1.Rd.A_i}, M_{op.1.Rd.D_i})$$

$$M_{op.2.Rd_i} = M_{op.1.Rd_i}$$

Verificações para ligações sujeitas a combinação de força axial e momento fletor (PN item 6.2.2.2):

$$\text{Verif}_{1_i} = \frac{|N_{1.Sd_i}|}{N_{1.Rd_i}} + \frac{|M_{op.1.Sd_i}|}{M_{op.1.Rd_i}}$$

$$\text{Verif}_{2_i} = \frac{|N_{2.Sd_i}|}{N_{2.Rd_i}} + \frac{|M_{op.2.Sd_i}|}{M_{op.2.Rd_i}}$$

Fim Planilha Mathcad

De acordo com a checagem das ligações diagonais – banzo superior, suas solicitações de projeto (Sd) são menores que as resistências de projeto (Rd). Abaixo os valores das checagens da ligação mais solicitada (capacidade mais exigida).

Tabela 6.5 – Checagem da ligação “diagonal – banzo superior” mais solicitada

	Verif.1	Verif.2
Máx.	0,57	0,57

6.3. Soldas das Ligações Diagonais – Banzos

As forças resistentes de cálculo das soldas que ligam as diagonais aos banzos superior e inferior foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 [5] item 6.2. Adicionalmente foram aplicadas as prescrições do projeto de norma para tubos [10] anexo A.

Planilha Mathcad

Ligações soldadas entre perfis tubulares

I. Dados

$$f_{y1} = 350\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento do aço da diagonal})$$

$$d_1 = 101.6\text{mm} \quad (\text{diâmetro do tubo da diagonal})$$

$$t_1 = 6.4\text{mm} \quad (\text{espessura do tubo da diagonal})$$

$$\theta_1 = 60\text{deg} \quad (\text{ângulo tubo da diagonal})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente da resistência do metal base})$$

$$f_w = 485\text{MPa} \quad (\text{resistência à ruptura da solda})$$

$$\gamma_{w1} = 1.25 \quad (\text{coeficiente da resistência da solda})$$

$$\gamma_{w2} = 1.35 \quad (\text{coeficiente da resistência da solda})$$

$$N_{Sd} = 273.5\text{kN} \quad (\text{força normal solicitante na diagonal})$$

II. Resistência de cálculo da solda de penetração parcial

$$a_w = t_1 \quad (\text{espessura efetiva da solda})$$

$$r_m = \frac{d_1}{2} - \frac{t_1}{2} \quad (\text{raio médio do tubo da diagonal})$$

$$l_{ef} = 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot \left(\frac{1 + \frac{1}{\sin(\theta_1)}}{2} \right) \quad (\text{comprimento efetivo da solda})$$

$$A_w = a_w \cdot l_{ef} \quad (\text{área efetiva da solda})$$

$$A_{MB} = A_w \quad (\text{área do metal-base})$$

II.1. Tensões de tração ou compressão perpendiculares ao eixo da solda

II.1.1. Metal-base

$$N_{Rd.1} = \frac{A_{MB} \cdot f_{y1}}{\gamma_{a1}} = 656.144 \cdot \text{kN}$$

II.1.2. Metal da solda

$$N_{Rd.2} = \frac{0.6 \cdot A_w \cdot f_w}{\gamma_{w1}} = 480.072 \cdot \text{kN}$$

II.2. Tensões de cisalhamento

II.2.1. Metal-base

$$N_{Rd.3} = \frac{0.6 \cdot A_{MB} \cdot f_{y1}}{\gamma_{a1}} = 393.686 \cdot \text{kN}$$

II.2.2. Metal da solda

$$N_{Rd.4} = \frac{0.6 \cdot A_w \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 444.511 \cdot \text{kN}$$

III. Força normal resistente

$$N_{Rd} = \min(N_{Rd.1}, N_{Rd.2}, N_{Rd.3}, N_{Rd.4}) = 393.686 \cdot \text{kN} \quad (\text{ok})$$

Fim Planilha Mathcad

6.4. Ligações flangeadas da Treliça

De modo a permitir a montagem da estrutura é necessário definir ligações de continuidade dos banzos e das diagonais. As ligações dos banzos superiores e diagonais são denominadas flangeadas circulares, as dos banzos inferiores flangeadas retangulares. Por as solicitações de momento fletor, torção e esforço cortante não serem significativas, considerou-se a ligação sujeita apenas a força axial de tração. As ligações foram dimensionadas de acordo com as prescrições do projeto de norma para tubos [10] item 7.

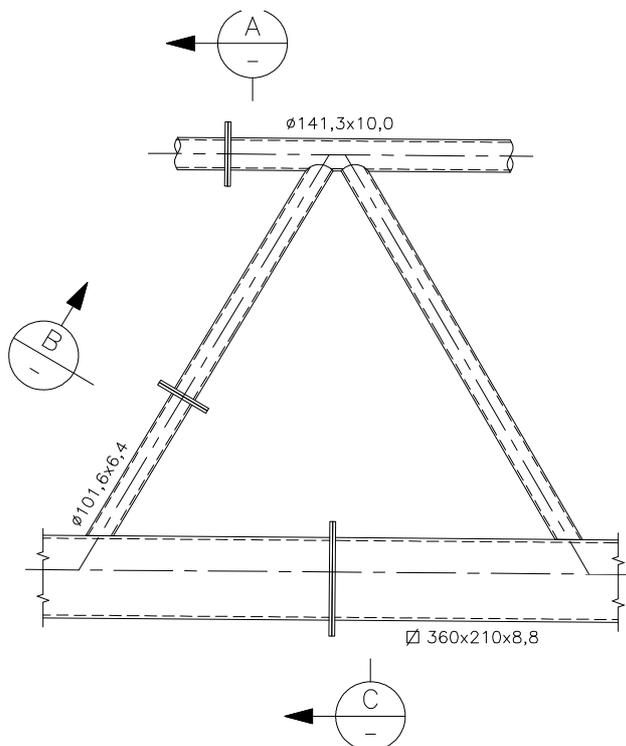


Figura 6.14 – Detalhe das ligações flangeadas

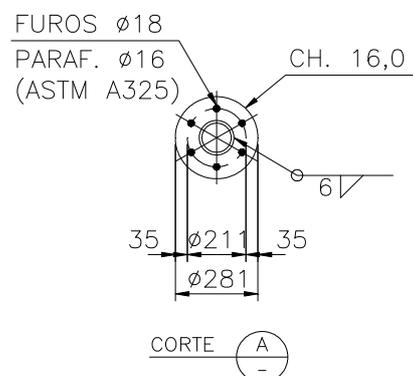


Figura 6.15 – Ligação do banzo sup.

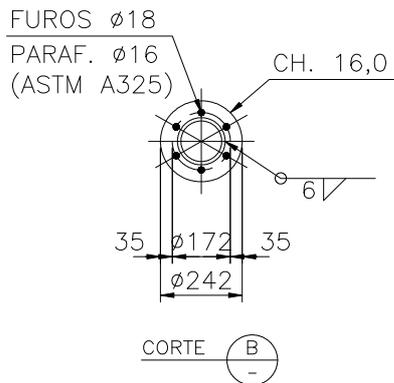


Figura 6.16 – Ligação da diagonal

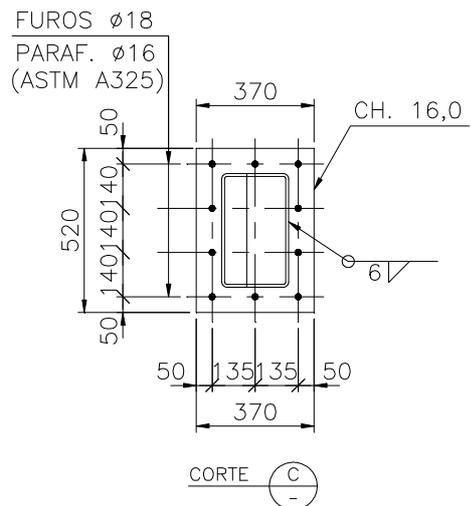


Figura 6.17 – Ligação do banzo inf.

Planilha Mathcad

Ligações flangeadas

I. Dados

$$f_y = 250\text{MPa} \quad (\text{tensão de escoamento do aço da chapa})$$

$$f_u = 72.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{tensão de ruptura do aço do parafuso})$$

$$\gamma_{a1} = 1.1 \quad (\text{coeficiente da resistência do aço da chapa})$$

$$\gamma_{a2} = 1.35 \quad (\text{coeficiente da resistência do aço do parafuso})$$

$$f_w = 485\text{MPa} \quad (\text{tensão resistente do metal da solda})$$

$$\gamma_{w2} = 1.35 \quad (\text{coeficiente da resistência do metal da solda})$$

II. Ligação flangeada circular do banzo superior

$$d = 141.3\text{mm} \quad (\text{diâmetro do tubo do banzo})$$

$$d_b = 15.9\text{mm} \quad (\text{diâmetro do parafuso})$$

$$e_1 = 35\text{mm} \quad (\text{distância do eixo do parafuso à face do tubo})$$

$$t_0 = 10\text{mm} \quad (\text{espessura do tubo do banzo})$$

$$A_g = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} \quad (\text{área bruta do parafuso})$$

$$N_{0.Sd} = 235\text{kN} \quad (\text{força de tração solicitante de cálculo do banzo})$$

$$F_{t.Rd} = \frac{0.75 \cdot A_g \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo do parafuso})$$

$$r_1 = \frac{d}{2} + 2 \cdot e_1$$

$$r_2 = \frac{d}{2} + e_1$$

$$r_3 = \frac{d - t_0}{2}$$

$$k_1 = \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)$$

$$k_2 = k_1 + 2$$

$$k_3 = \ln\left(\frac{r_1}{r_3}\right)$$

$$f_3 = \frac{1}{2 \cdot k_1} \cdot \left(k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4 \cdot k_1}\right)$$

$$t_{f.min} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_{a1} \cdot N_{0.Sd}}{\pi \cdot f_3 \cdot f_y}} = 11.757 \cdot \text{mm} \quad (\text{espessura mínima da chapa do flange})$$

$$t_f = 16\text{mm} \quad (\text{espessura chapa flange adotado - ok})$$

$$n_{\min} = \frac{N_{0.Sd}}{F_{t.Rd}} \cdot \left(1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \cdot k_3} \right) = 3.131 \quad (\text{número mínimo de parafusos})$$

$$n = 6 \quad (\text{número parafusos adotado - ok})$$

$$\text{if} \left[e_1 \geq \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot d_b \cdot n}{\pi} - d \right), \text{"ok"}, \text{"ñ ok"} \right] = \text{"ok"} \quad (\text{verificação da distância})$$

$$b_w = 6\text{mm} \quad (\text{perna da solda de filete})$$

$$l_w = \pi \cdot \left(d + \frac{b_w}{4} \right) \quad (\text{comprimento efetivo da solda de filete})$$

$$A_w = 0.7 \cdot b_w \cdot l_w \quad (\text{área efetiva da solda de filete})$$

$$N_{Rd} = \frac{A_w \cdot 0.6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 406.15 \cdot \text{kN} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo da solda de filete - ok})$$

III. Ligação flangeada circular da diagonal

$$d = 101.6\text{mm} \quad (\text{diâmetro do tubo da diagonal})$$

$$d_b = 15.9\text{mm} \quad (\text{diâmetro do parafuso})$$

$$e_1 = 35\text{mm} \quad (\text{distância do eixo do parafuso à face do tubo})$$

$$t_0 = 6.4\text{mm} \quad (\text{espessura do tubo da diagonal})$$

$$A_g = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} \quad (\text{área bruta do parafuso})$$

$$N_{0.Sd} = 204\text{kN} \quad (\text{força de tração solicitante de cálculo da diagonal})$$

$$F_{t.Rd} = \frac{0.75 \cdot A_g \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo do parafuso})$$

$$r_1 = \frac{d}{2} + 2 \cdot e_1$$

$$r_2 = \frac{d}{2} + e_1$$

$$r_3 = \frac{d - t_0}{2}$$

$$k_1 = \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)$$

$$k_2 = k_1 + 2$$

$$k_3 = \ln\left(\frac{r_1}{r_3}\right)$$

$$f_3 = \frac{1}{2 \cdot k_1} \cdot \left(k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4 \cdot k_1}\right)$$

$$t_{f,\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_{a1} \cdot N_{0.Sd}}{\pi \cdot f_3 \cdot f_y}} = 12.002 \cdot \text{mm} \quad (\text{espessura m\u00ednima da chapa do flange})$$

$$t_f = 16 \text{mm} \quad (\text{espessura chapa flange adotado - ok})$$

$$n_{\min} = \frac{N_{0.Sd}}{F_{t.Rd}} \cdot \left(1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \cdot k_3}\right) = 2.598 \quad (\text{n\u00famero m\u00ednimo de parafusos})$$

$$n = 6 \quad (\text{n\u00famero parafusos adotado - ok})$$

$$\text{if} \left[e_1 \geq \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot d_b \cdot n}{\pi} - d \right), \text{"ok"}, \text{"\u00e3o ok"} \right] = \text{"ok"} \quad (\text{verifica\u00e7\u00e3o da dist\u00e2ncia})$$

$$b_w = 6 \text{mm} \quad (\text{perna da solda de filete})$$

$$l_w = \pi \cdot \left(d + \frac{b_w}{4} \right) \quad (\text{comprimento efetivo da solda de filete})$$

$$A_w = 0.7 \cdot b_w \cdot l_w \quad (\text{\u00e1rea efetiva da solda de filete})$$

$$N_{Rd} = \frac{A_w \cdot 0.6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 293.236 \cdot \text{kN} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo da solda de filete - ok})$$

IV. Ligação flangeada retangular do banzo inferior

$$e_1 = 30\text{mm} \quad (\text{distância do eixo do parafuso à face do tubo})$$

$$e_2 = 50\text{mm} \quad (\text{distância do eixo do parafuso à borda da chapa})$$

$$c = 140\text{mm} \quad (\text{distância entre parafusos})$$

$$d_f = 18\text{mm} \quad (\text{diâmetro do furo})$$

$$d_b = 15.9\text{mm} \quad (\text{diâmetro do parafuso})$$

$$A_g = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} \quad (\text{área bruta do parafuso})$$

$$F_{t.Rd} = \frac{0.75 \cdot A_g \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo do parafuso})$$

$$N_{0.Sd} = 325\text{kN} \quad (\text{força de tração solicitante de cálculo do banzo})$$

$$n = 10 \quad (\text{número de parafusos adotado})$$

$$F_{t.Sd} = \frac{N_{0.Sd}}{n} \quad (\text{força de tração solicitante de cálculo de um parafuso})$$

$$\text{if}[c \geq 2 \cdot (d_b + e_1), "ok", "ñ ok"] = "ok"$$

$$\text{if}(e_2 \geq d_b + e_1, "ok", "ñ ok") = "ok"$$

$$\text{if}[(e_1 \geq 1.25 \cdot d_b) \wedge (e_1 \leq 2 \cdot d_b), "ok", "ñ ok"] = "ok"$$

$$a = e_2 + \frac{d_b}{2}$$

$$b = e_1 - \frac{d_b}{2}$$

$$p = 2 \cdot (d_b + e_1)$$

$$\rho = \frac{b}{a}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_f}{p}$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{F_{t.Rd}}{F_{t.Sd}} - 1 \right)$$

$$\alpha_p = \text{if} \left[\beta \geq 1.0, 1.0, \min \left[1.0, \frac{1}{\delta} \cdot \left(\frac{\beta}{1 - \beta} \right) \right] \right]$$

$$t_{f.min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \gamma_{a1} \cdot b \cdot F_{t.Sd}}{p \cdot (1 + \delta \cdot \alpha_p) \cdot f_y}} = 8.727 \cdot \text{mm} \quad (\text{espessura m\u00ednima da chapa do flange})$$

$$t_f = 16 \text{mm} \quad (\text{espessura chapa flange adotado - ok})$$

$$t_c = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot F_{t.Sd}}{p \cdot \left(\frac{f_y}{\gamma_{a1}} \right)}}$$

$$\alpha = \max \left[0, \frac{1}{\delta} \cdot \left[\frac{F_{t.Sd}}{F_{t.Rd}} \cdot \left(\frac{t_c}{t_f} \right)^2 - 1 \right] \right]$$

$$Q_{al} = F_{t.Rd} \cdot \left[\delta \cdot \alpha \cdot \rho \cdot \left(\frac{t_f}{t_c} \right)^2 \right]$$

$$\text{if}(F_{t.Sd} + Q_{al} \leq F_{t.Rd}, "ok", "n\u00e3 ok") = "ok" \quad (\text{verifica\u00e7\u00e3o do parafuso \u00e0 ruptura})$$

$$b_w = 6 \text{mm} \quad (\text{perna da solda de filete})$$

$b = 210\text{mm}$ (largura do tubo do banzo)

$l = 360\text{mm}$ (altura do tubo do banzo)

$$l_w = 2 \cdot \left(1 + \frac{b_w}{4}\right) + 2 \cdot \left(b + \frac{b_w}{4}\right) \quad (\text{comprimento efetivo da solda de filete})$$

$$A_w = 0.7 \cdot b_w \cdot l_w \quad (\text{área efetiva da solda de filete})$$

$$N_{Rd} = \frac{A_w \cdot 0.6 \cdot f_w}{\gamma_{w2}} = 1.038 \times 10^3 \cdot \text{kN} \quad (\text{força de tração resistente de cálculo da solda de filete - ok})$$

Fim Planilha Mathcad

7. ANÁLISE DO BANZO SUPERIOR

De forma complementar, verificou-se o banzo superior por meio de uma análise de flambagem. Foi feito um modelo computacional no programa SAP2000 [15] igual ao modelo feito no programa STRAP [4] e aplicada uma carga uniforme de $1,0 \text{ kN/m}^2$ sobre a laje (ação de peso próprio da estrutura desprezada). Carregando os vãos alternadamente entre os eixos D & E, eixos F & G, eixos H & J e eixos K & L (fig. 2.4) foi a situação de carregamento onde observou-se o menor autovalor.

Na análise de flambagem obteve-se um autovalor de 51,3 para o 1º modo de flambagem, indicado na figura 7.1. A partir desse resultado conclui-se que a flambagem lateral do banzo superior ocorre para cargas cerca de 10 vezes maiores a sobrecarga de multidão para passarela de pedestres ($51,3 \times 1,0 \text{ kN/m}^2 = 51,3 \text{ kN/m}^2 \approx 10 \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 50,0 \text{ kN/m}^2$), logo não sendo determinante para o dimensionamento da estrutura.

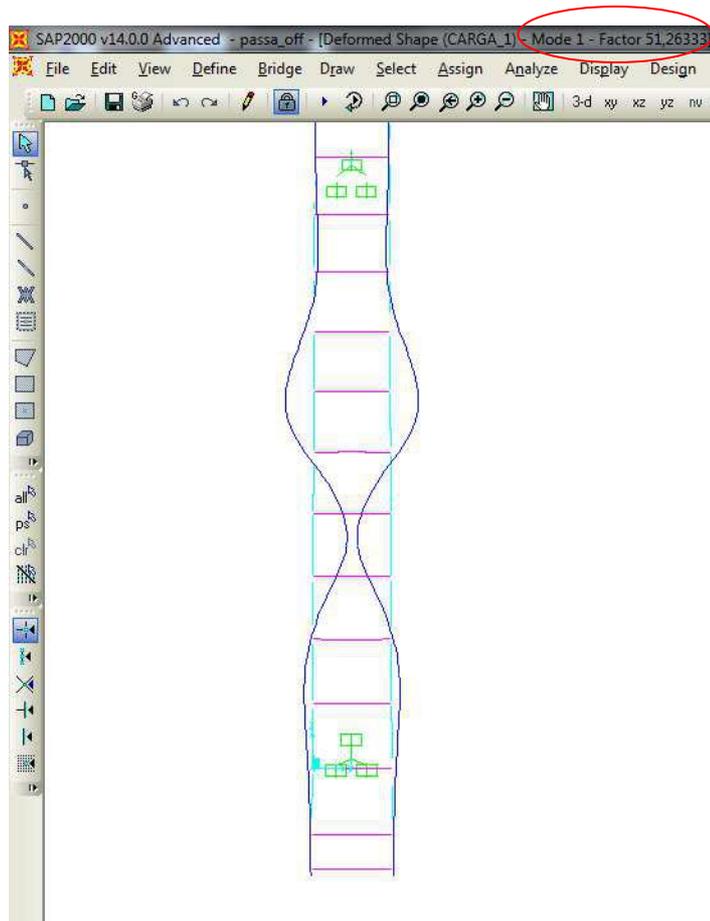


Figura 7.1 – Detalhe da deformada do banzo superior

8. CONCLUSÃO

O tipo de análise estrutural é classificado de acordo com os efeitos dos deslocamentos da estrutura. Quanto aos efeitos dos deslocamentos, os esforços internos podem ser determinados por análise linear ou análise não-linear. A análise não-linear deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços internos.

A NBR8800:2008 [5] se refere a projetos de edifícios, a classificação quanto à deslocabilidade de estruturas é dada em função de deslocamentos laterais de andares de edifícios. Como esse PFC trata-se de uma passarela, é difícil estimar a importância de seus deslocamentos para os esforços internos, pois não é possível fazer a classificação da estrutura. O mesmo acontece com relação à importância dos efeitos das imperfeições geométricas iniciais e efeitos das imperfeições iniciais de material, que levam em conta essa classificação.

Como o banzo superior da viga treliçada apresenta-se sem contenção lateral e seu comportamento depender do pórtico invertido, é difícil obter o seu comprimento de

flambagem, necessário para uma análise linear. A análise não-linear foi adotada para levar em conta os efeitos do deslocamento lateral do banzo.

Para a verificação da ligação “diagonal-banzo inferior”, tiveram condições de validade das fórmulas presentes no projeto de norma para tubos [10] que não foram satisfeitas. Isso mostrou a importância de um pré-dimensionamento que além de levar em conta a resistência dos elementos da estrutura, também considere a resistência de suas ligações.

Não foi possível fazer algumas verificações nas ligações da treliça, pois tais critérios de cálculo não estão presentes no projeto de norma para tubos [10]. São elas:

- Momento fletor resistente de cálculo para ligações soldadas entre diagonais ou montantes de perfis tubulares circulares e bantos de perfis tubulares retangulares (ligação “diagonal-banzo inferior);
- Momento fletor resistente de cálculo para ligações soldadas reforçadas (ligação “diagonal-banzo inferior);
- Verificações de ligações flangeadas que levem em conta solicitações de momento fletor e esforço cortante.

Seguem quantidades referentes à estrutura a ser executada no Campus da Cidade Universitária da UFRJ.

Tabela 8.1 – Lista de materiais da estrutura metálica

Lista de Materiais (Aço)	
Perfil	Massa (kg)
355,6x25,0	7.344
141,3x10,0	10.653
101,6x6,4	8.643
400x200x16,0	5.491
360x210x8,8	24.134
200x150x12,5	1.433
150x150x6,3	5.843
Total	63.541

Tabela 8.2 – Quantidade de concreto

Quantidade - Concreto	
Item	Volume (m ³)
Colunas	3
Blocos	32
Laje	72
Total	107

Tabela 8.3 – Quantidade de aço

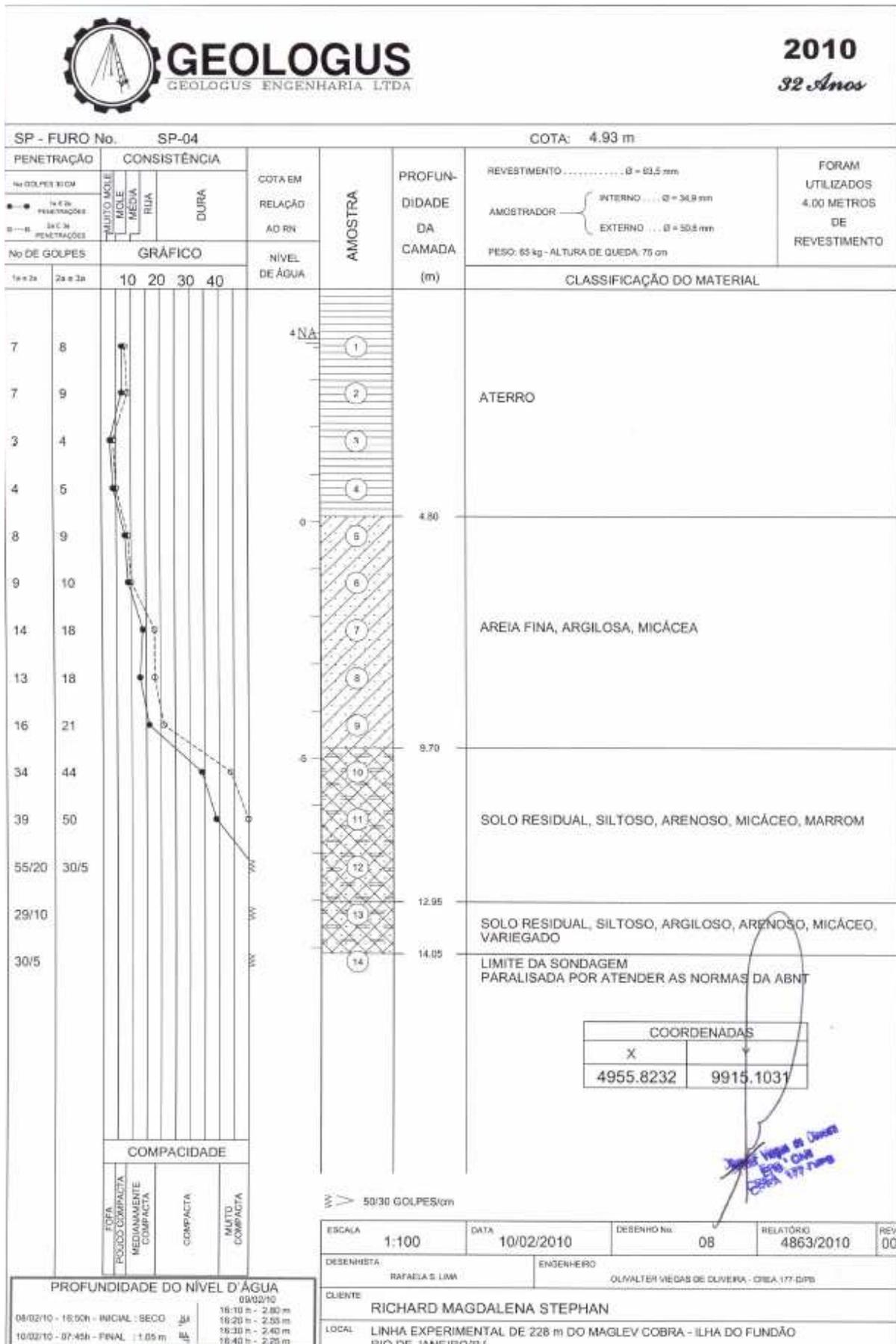
Quantidade - Aço	
Item	Massa (kg)
Estacas	17.856
Steel Deck	5.004
Armadura Laje	1.331
Armadura Bloco	4.096
Total	28.287

- Consumo aço/metro construído (estrutura metálica): $63541\text{kg}/160,7\text{m} = 395,4\text{kg/m}$
- Consumo aço/m² construído (estrutura metálica): $63541\text{kg}/(160,7\text{m}\cdot 3,01\text{m}) = 131,6\text{kg/m}^2$

REFERÊNCIAS

- [1] Maglev Cobra - Lasup. Laboratório de Aplicações de Supercondutores. Disponível em: <http://www.dee.ufrj.br/lasup/maglev/>. Acesso em: 15 de março de 2013.
- [2] Vallourec & Mannesmann Tubes – V & M do Brasil. Disponível em: www.vmtubes.com.br. Acesso em: 8 de agosto de 2013.
- [3] Pillar, R. V.; Estudo de Viabilidade de Cobertura Metálica com Alternativas em Perfis Formados a Frio, Laminados Abertos ou Tubulares; Projeto Final de Curso; Departamento de Estruturas; Escola Politécnica da UFRJ; 2013.
- [4] SAE - Sistemas de Análise Estrutural; STRAP 2011 - Structural Analysis Programs
- [5] ABNT; NBR 8800/2008: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.
- [6] Pinto, C. S.; Curso Básico de Mecânica dos Solos; 6ª edição.
- [7] Lopes, F. R.; Velloso D. A.; Fundações Vol. 2: Fundações Profundas; 1ª edição.
- [8] Gerdau; Coletânea do Uso do Aço / Estacas Metálicas; 6ª Edição; 2012.
- [9] Product & Service Advantage; Mathcad V14.0.
- [10] ABNT; PN 02:125.03-004: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares; Associação Brasileira de Normas Técnicas; 2013.
- [11] Vallourec & Mannesmann Tubes – V & M do Brasil; Catálogo de Tubos Estruturais 2012.
- [12] Metform; Catálogo Steel Deck Metform.
- [13] ABNT; NBR 7188/1982: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.
- [14] ABNT; NBR 6123/1988: Forças devidas ao vento em edificações.
- [15] CSI – Computers & Structures Inc.; SAP 2000 v.14.

ANEXO A. Sondagens.



ANEXO B. Efeito P-Delta - Método de Cálculo.

O Efeito P-Delta é o método utilizado pelo programa para o cálculo de forças e momentos de segunda ordem de origem geométrica (deslocamentos da estrutura).

A explicação do método de cálculo do efeito P-Delta utilizado pelo programa está reproduzido a seguir.

A força aplicada em qualquer nó é igual a soma das forças internas nas extremidades das barras conectadas a este nó, mas com sinal oposto (Figura C.1.a).

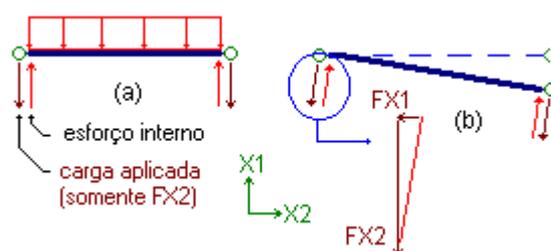


Figura C.1 – Esquema do método de cálculo do efeito P-Delta

Para a segunda e subsequentes interações, o programa primeiro calcula a nova orientação de cada barra, baseada na posição deslocada dos nós de incidência, a partir da interação anterior, ou seja, é atribuída à barra um novo sistema de coordenadas locais (Figura C.1.b).

O programa calcula a soma das forças internas em cada nó baseada nos novos sistemas locais das barras. Esta soma é então aplicada ao nó (com sinal oposto). No exemplo na figura C.1, esta carga aplicada contém uma componente vertical e uma horizontal (quando a carga original não continha nenhuma componente horizontal) (Figura C.1.b).

O programa resolve o modelo novamente e continua com as próximas iterações até convergir.

Para convergir é necessário que a condição abaixo seja satisfeita para TODOS os nós do modelo:

$$\frac{(\text{def})_i - (\text{def})_{i-1}}{\text{deformação max.}} < 0.005$$

onde:

i = iteração atual.

i-1 = iteração anterior.

Desloc. Máx.: Referente a solução original.

Estruturas muito flexíveis podem não convergir. Caso a solução não convirja após cinco iterações, o programa pausa e exibe uma janela perguntando se o usuário deseja fazer mais 5 iterações ou parar. A cada 5 iterações o programa repete esta pergunta. Note que muitos modelos convergem em 5 iterações, mas não são todos, alguns necessitam de mais de 30 iterações para convergir.

Todas as iterações são calculadas com a Matriz de Rigidez Inicial do modelo, sendo o cálculo realizado a partir da geometria inicial (**não deformada**) do modelo.

As reações de apoio exibidas nas tabelas **não** incluirão as forças adicionais que aparecem em função do efeito P-Delta.

O cálculo é geralmente conservador para barras relativamente esbeltas com deformações ao longo de seu comprimento. Na Figura C.2.a, a deformada assumida pelo método não é igual à deformada real da barra.

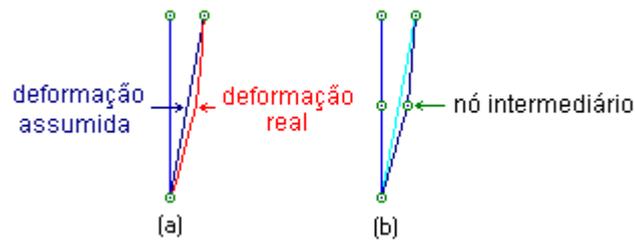


Figura C.2 – Esquema do método de cálculo do efeito P-Delta

Para melhorar a precisão, pode-se dividir a barra em duas, inserindo um nó intermediário como mostrado na Figura C.2.b. Quanto maior o número de nós intermediários, melhor a precisão do método.