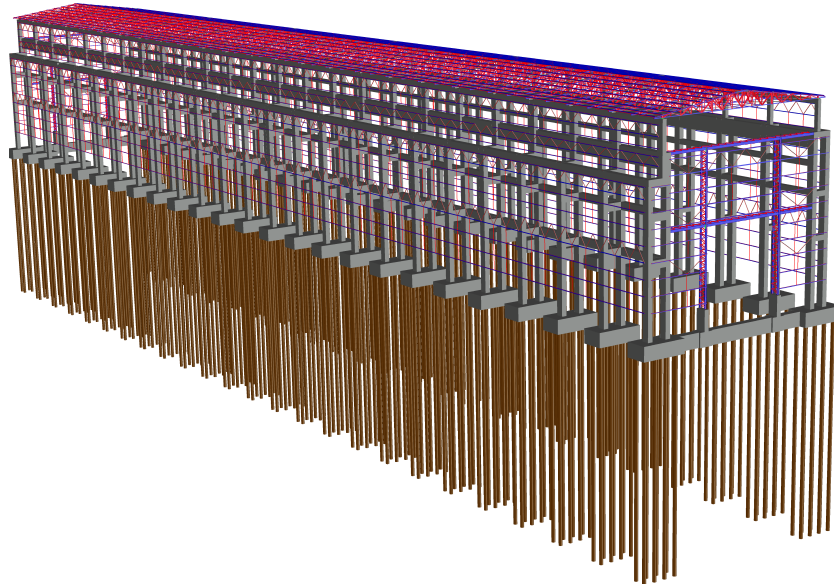




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Dimensionamento de um Hangar de Armazenamento de Matérias-Primas

ANTÓNIO RAFAEL PINA FARÓFIA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho de projecto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil

Orientador:

Licenciado Especialista José António Fontelas dos Santos Viseu

Júri:

Presidente: Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Vogais:

Licenciado Especialista José António Fontelas dos Santos Viseu

Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto

Maio de 2021



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil

Dimensionamento de um Hangar de Armazenamento de Matérias-Primas

ANTÓNIO RAFAEL PINA FARÓFIA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho de projecto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil

Orientador:

Licenciado Especialista José António Fontelas dos Santos Viseu

Júri:

Presidente: Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Vogais:

Licenciado Especialista José António Fontelas dos Santos Viseu

Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto

Maio de 2021

Agradecimentos

Este projeto é o resultado de vários anos de trabalho e significa o alcançar de um objetivo que me proporciona enorme realização pessoal. O longo e difícil percurso percorrido não teria sido possível sem a ajuda de algumas pessoas, a quem devo eterna gratidão e apreço.

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais pela educação dada, pelos valores transmitidos e por acreditarem em mim, mesmo nas fases mais difíceis. Ao meu pai, meu grande companheiro, presença forte e inabalável, e à minha querida mãe, minha eterna defensora, um profundo agradecimento.

À minha irmã, pelo incentivo, compreensão e pelas suas brincadeiras características.

Aos meus quatro avós, pelos ensinamentos, exemplos de vida e por sempre me incentivarem ao longo destes anos.

Um grande obrigado ao Carlos Jorge e à Sandra pelos momentos passados, apoio constante e conselhos dados.

Ao Ricardo pelas grandes sovas na *Playstation* que geraram bons momentos de descontração.

À minha namorada Rita um especial agradecimento, por tudo o que significa para mim, pelo amor, pelas palavras amigas, pela compreensão, pela constante motivação, pelos momentos passados e pelos olhares e sorrisos trocados, sendo um pilar fundamental ao longo deste percurso.

Uma palavra de apreço ao Engenheiro Santos Viseu, meu orientador, por me ter dado a oportunidade de aprender, pela partilha de conhecimentos, pela dedicação, paciência e disponibilidade demonstradas ao longo da realização do trabalho, pois sem isso não teria sido possível completar esta fase da minha vida.

Aos meus colegas e amigos de faculdade João Damásio, Filipe Marques, João Nunes, Daniel Pinto, Paulo Rolão, Miguel Melo e Bernardo Barradas pelos grandes momentos passados e por todas as experiências e gargalhadas que ficarão para sempre na minha memória e no meu coração.

Um agradecimento especial ao meu grande amigo e companheiro de tese João Nunes, pelo companheirismo, entajuda, troca de impressões e por tudo o que passámos ao longo destes anos. Poderás contar sempre comigo.

Ao meu grande amigo de infância João Avelino, agradeço pelos conselhos e motivação, por me ter incentivado a redigir este documento em LaTeX e pela prontidão demonstrada em ajudar sempre que necessário.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação académica e cujos ensinamentos serão certamente importantes no desenrolar da minha vida profissional.

Resumo

O presente trabalho final de mestrado refere-se à realização do projeto estrutural de um Hangar de Armazenamento de Matérias-Primas numa unidade fabril em Moçambique.

A estrutura ocupa uma área em planta de 197,1m x 28,4m, sendo constituída por uma cobertura metálica assente em pilares e vigas de betão armado. As fundações são indiretas, compostas por um conjunto de maciços que servem de encabeçamento em estacas com diâmetros de 0,50m.

Toda a estrutura foi projetada de modo a resistir a todas as ações permanentes e variáveis com base nos Eurocódigos Estruturais adaptados à zona em Moçambique. Em resumo, utilizou-se a NP EN 1990 para definir as combinações de ações, a NP EN 1991 na quantificação das ações, a NP EN 1992 no dimensionamento dos elementos de betão armado, a NP EN 1993 no dimensionamento dos elementos metálicos, a NP EN 1997 no projeto geotécnico das fundações e a NP EN 1998 no estudo e quantificação das ações sísmicas.

O *software* “SAP2000” foi utilizado para modelar e analisar a estrutura e o *software* “AutoCad” para elaborar as peças desenhadas. Os programas de cálculo “Gala Reinforcement”, “SemiComp+”, “A3C” e “LTBeamN”, bem como as tabelas de cálculo Excel, foram também utilizados para dimensionar todos os elementos metálicos e de betão armado.

Palavras-chave

Cobertura Metálica; Pilares e Vigas de Betão Armado; Fundações Indiretas; Dimensionamento.

Abstract

The present master's thesis refers to the structural design of a Raw Materials Storage Hangar in a factory unit in Mozambique.

The structure occupies a plan area of 197,1m x 28,4m, being constituted by a metallic cover resting on reinforced concrete pillars and beams. The foundations are indirect, composed by a set of solid blocks that serve as heading in pile caps with diameters of 0.50m.

The whole structure was designed to resist all permanent and variable actions based on the Structural Eurocodes adapted to the area in Mozambique. In short, NP EN 1990 was used to define the combinations of actions, NP EN 1991 to quantify the actions, NP EN 1992 to design the reinforced concrete elements, NP EN 1993 to design the metallic elements, NP EN 1997 for the geotechnical design of the foundations and NP EN 1998 to study and quantify the seismic actions.

The "SAP2000" *software* was used to model and analyse the structure and the "AutoCad" *software* to elaborate the drawing pieces. "Gala Reinforcement", "SemiComp+", "A3C" and "LTBeamN" calculation programs, as well as Excel calculation tables, were also used to design all the metallic and reinforced concrete elements.

Keywords

Metallic cover; Reinforced Concrete Columns and Beams; Indirect foundations; Design.

ÍNDICE DAS PEÇAS DO PROJETO

A - PEÇAS ESCRITAS

I - MEMÓRIA DESCRITIVA

II - MEMÓRIA JUSTIFICATIVA

III - CONSIDERAÇÕES FINAIS

IV - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

V - ANEXOS

B - PEÇAS DESENHADAS

A - PEÇAS ESCRITAS

I- MEMÓRIA DESCRITIVA

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
2 Descrição do Projeto	3
2.1 Localização	3
2.2 Geologia e geotecnia	3
2.3 Geometria do edifício	5
2.4 Funcionamento do Hangar	5
2.5 Descrição da estrutura do edifício	5
3 Materiais	25
3.1 Estruturas metálicas	25
3.2 Estruturas de betão armado	25
4 Ações	27
4.1 Ações Permanentes	27
4.1.1 Peso Próprio	27
4.1.2 Restantes Cargas Permanentes	27
4.2 Ações Variáveis	27
4.2.1 Sobrecargas	28
4.2.2 Ação Térmica	28
4.2.3 Ação do Vento	29
4.2.4 Ação Sísmica	46
4.2.5 Equipamentos mecânicos - Ponte Rolante	52
5 Combinações de Ações	53
5.1 Estados Limites Últimos	53
5.2 Estados Limites de Utilização	55
6 Critérios Gerais de Dimensionamento	57
6.1 Elementos metálicos	57
6.1.1 Estados Limites Últimos	58
6.1.2 Estados Limites de Utilização	73
6.2 Ligações metálicas	74
6.2.1 Ligações aparafusadas	74
6.2.2 Ligações soldadas	78

6.3	Elementos em Betão Armado	79
6.3.1	Vigas	79
6.3.2	Pilares	83
6.3.3	Fundações	85

Lista de Figuras

2.1	Localização geográfica do hangar.	3
2.2	Perfil estratigráfico do terreno de fundação.	4
2.3	Planta do Hangar de Matérias-Primas.	5
2.4	Planta da estrutura de betão armado.	7
2.5	Alçado longitudinal.	7
2.6	Pórticos - alinhamentos 2 a 24.	9
2.7	Pórtico do alçado norte.	10
2.8	Pórtico do alçado sul.	11
2.9	“Módulos” considerados.	12
2.10	Perspetiva da estrutura da cobertura - “módulo” tipo.	12
2.11	Perspetiva das asnas no módulo tipo.	13
2.12	Vista frontal das asnas no módulo tipo.	13
2.13	Vista lateral das asnas no módulo tipo.	13
2.14	Planta das asnas - módulo tipo.	14
2.15	Perspetiva parcial de uma das asnas.	14
2.16	Vigas de travamento entre asnas - vista frontal.	15
2.17	Vigas de travamento entre asnas - vista em planta.	15
2.18	Vigas de travamento entre asnas.	16
2.19	Viga V.T.3.	16
2.20	Viga V.T.2.	16
2.21	Viga V.T.1.	17
2.22	Perspetiva de uma das vigas de travamento.	17
2.23	Madres da cobertura - módulo tipo.	17
2.24	Planta das madres da cobertura - módulo tipo.	18
2.25	Posição das madres de cobertura nas asnas.	18
2.26	Planta de travamentos ao nível das cordas inferiores das asnas - Módulo tipo.	19
2.27	Perspetiva dos travamentos ao nível das cordas inferiores - Módulo tipo.	19
2.28	Planta de travamentos ao nível das águas da cobertura - Módulo tipo.	20
2.29	Vista dos travamentos ao nível das águas da cobertura.	20
2.30	Planta de tarugos - módulo tipo.	21
2.31	Madres do alçado nascente - Módulo tipo.	22
2.32	Madres do alçado poente - Módulo tipo.	22
2.33	Madres do alçado norte.	23
4.1	Direções do vento.	31
4.2	Alturas de referência.	32
4.3	Categorias de terreno.	34
4.4	Pressões exercidas sobre superfícies.	36
4.5	Caso 1 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.	37
4.6	Caso 2 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.	37

4.7	Caso 3 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.	38
4.8	Zonas a considerar em paredes verticais.	38
4.9	Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais.	39
4.10	Zonas em coberturas de duas vertentes, segundo $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$	39
4.11	Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes segundo $\theta = 0^\circ$	40
4.12	Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes segundo $\theta = 90^\circ$	40
4.13	Coeficientes de pressão interior para edifícios sem face predominante.	41
4.14	Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo.	43
4.15	Zonamento sísmico em Portugal Continental	48
4.16	Forma do espectro de resposta elástico.	51
4.17	Ponte rolante.	52
6.1	Fluxograma de dimensionamento de secções à tração.	58
6.2	Fluxograma de dimensionamento de secções à compressão.	59
6.3	Fluxograma de dimensionamento de secções à flexão simples.	60
6.4	Fluxograma de dimensionamento de secções ao esforço transverso.	61
6.5	Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas a flexão com esforço transverso.	62
6.6	Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas à flexão com esforço axial.	63
6.7	Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas a flexão com esforço transverso.	65
6.8	Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas à flexão desviada com esforço axial.	66
6.9	Fluxograma para a verificação da resistência à encurvadura de elementos comprimidos.	67
6.10	Fluxograma de verificação da resistência à encurvadura de elementos à flexão.	69
6.11	Fluxograma de verificação da resistência à encurvadura de elementos sujeitos à flexão composta com compressão.	71
6.12	Definição dos deslocamentos verticais em vigas.	73
6.13	Principais elementos de uma ligação aparafusada.	75
6.14	Modelação das estacas.	85

Lista de Tabelas

3.1	Classes de Resistência dos Aços.	25
3.2	Características do Aço.	25
3.3	Betão a utilizar.	25
3.4	Características do betão.	26
3.5	Principais características do aço das armaduras ordinárias.	26
4.1	Regulamentação aplicada às Ações Permanentes.	27
4.2	Regulamentação aplicada às Ações Variáveis	28
4.3	Valor básico da velocidade de referência do vento.	33
4.4	Os valores recomendados para z_0 e z_{min}	35
4.5	Valores recomendados para os coeficientes de atrito.	42
4.6	Parâmetros dos espectros de resposta para a ação sísmica tipo 1.	47
4.7	Parâmetros dos espectros de resposta para a ação sísmica tipo 2.	47
4.8	Aceleração máxima de referência para os dois tipos de ação sísmica.	48
4.9	Valores dos coeficientes de importância recomendados.	49
5.1	Valores reduzidos	53
6.1	Coefficientes Parciais de Segurança.	57
6.2	Valores para o cálculo de N_{Rk} , $M_{i,Rk}$ e $\Delta M_{i,Ed}$	72
6.3	Valores recomendados para os limites máximos dos deslocamentos.	73
6.4	Valores recomendados para os limites dos deslocamentos horizontais.	74
6.5	Valores nominais da tensão de cedência f_{yb} e da tensão de rotura à tração f_{ub} para as classes correntes.	74
6.6	Principais características geométricas dos parafusos.	75
6.7	Categorias e critérios de dimensionamento de Ligações Aparafusadas.	76
6.8	Critérios para o cálculo da resistência em elementos de ligação ao corte.	76
6.9	Critérios para o cálculo da resistência em elementos de ligação à tração.	77
6.10	Critérios para o cálculo da resistência em elementos de ligação sujeitos a esforços combinados de corte e tração.	77
6.11	Coefficientes Parciais de Segurança de Resistência.	79
6.12	Parâmetro “a”.	83
6.13	Coefficientes de segurança parciais para as combinações 1 e 2.	87
6.14	Área mínima de armaduras longitudinais em estacas moldadas.	88

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O Hangar a projetar desempenha uma função muito importante dentro do complexo fabril onde se integra, funcionando como barreira protetora contra os agentes atmosféricos e assegurando a qualidade das matérias-primas presentes no interior.

Neste tipo de estruturas as coberturas representam muitas vezes uma parcela importante no custo geral da obra. Do ponto de vista do cliente, a solução ótima passa na maior parte dos casos pela opção mais económica, pelo que se exige projetar estruturas mais leves, mais fáceis de construir e de montar.

Para as coberturas metálicas é comum o recurso a soluções estruturais treliçadas, constituídas por asnas e vigas de nós articulados, pois estas soluções permitem vencer grandes vãos com pesos reduzidos. Trata-se de um requisito impreterível em edifícios fabris devido à necessidade de criar espaços amplos, funcionais, sem obstáculos estruturais interiores, de modo a tirar partido dos grandes vãos que estas soluções proporcionam.

Tal como as vigas de alma cheia constituídas por perfis laminados ou compostos, as vigas treliçadas são também compostas por dois banzos: o banzo superior denominado por cordão superior, e o banzo inferior por cordão inferior, sendo a alma constituída por um conjunto de barras designadas por prumos e diagonais.

Em relação à geometria, estas vigas podem ter formas triangulares, retangulares, trapezoidais ou parabólicas. Neste sentido, existem várias opções que permitem escolher a melhor solução estrutural, tendo em conta não só as diversas formas geométricas, mas também a disposição das barras nestas treliças. Este fato faz com que a procura de uma solução económica e eficaz se torne num desafio interessante do ponto de vista da engenharia.

Uma outra componente importante na realização destes projetos é a quantificação correta das ações permanentes (pesos próprios e outras cargas permanentes) e variáveis (sobrecargas, temperatura, vento e sismo). O estudo destas ações e a determinação dos parâmetros envolvidos constitui um desafio para todos os engenheiros de estruturas.

De referir, também, que o estudo mais aprofundado das matérias necessárias para a realização destes projetos permite compreender melhor alguns dos conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico e juntar outras competências. Por exemplo, o estudo da ação do vento que não foi muito desenvolvido durante o curso de engenharia civil, e que naturalmente exigiu uma análise mais aprofundada durante a realização deste projeto.

1.2 Objetivos

O presente trabalho consiste na elaboração do projeto de um Hangar misto de armazenamento de inertes, constituído por uma cobertura metálica e por um conjunto de vigas e pilares em betão armado com fundações indiretas, a realizar numa unidade fabril em Moçambique.

Com base na arquitetura proposta pelo Dono de Obra pretende-se estudar diversas soluções estruturais por forma a encontrar a solução mais económica, verificando-se os requisitos de segurança ao nível dos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS) através da aplicação das normas vigentes.

Um dos objetivos principais deste trabalho é o estudo aprofundado da ação do vento no hangar com base na NP EN 1991-1-4:2010, adaptada a Moçambique, bem como o dimensionamento de todos os elementos estruturais principais e secundários.

Uma vez dimensionados todos os elementos com base nas normas vigentes, recorreu-se ao *software* “AutoCad” para a elaboração das peças desenhadas.

Com a elaboração deste projeto pretende-se desenvolver competências profissionais em projeto de betão armado e estruturas metálicas, recorrendo não só aos Eurocódigos Estruturais, mas também aos *softwares* “SAP2000”, “LTBeamN”, “Gala Reinforcement”, “Semi-Comp+” e “AutoCad”.

Capítulo 2

Descrição do Projeto

2.1 Localização

O Hangar de Matérias-Primas, cuja estrutura faz parte deste trabalho, pertence a uma unidade fabril localizada em Moçambique, no município do Dondo, província de Sofala. A localização geográfica do edifício encontra-se indicada na figura 2.1.



Figura 2.1 Localização geográfica do hangar.

2.2 Geologia e geotecnia

O solo é o agente responsável por suportar toda a construção bem como todas as solicitações da superestrutura. Como tal, é essencial conhecer as suas características de forma a garantir o correto funcionamento da estrutura, e evitar acidentes ou problemas construtivos tais como assentamentos e outros fenómenos indesejáveis. Além disso, a informação geotécnica é também importante na determinação do tipo de fundações, bem como na quantificação da ação sísmica. Neste caso, a caracterização geotécnica do terreno de fundação foi efetuada a partir de prospeções efetuadas com base em ensaios SPT (Standard Penetration Test), tendo-se obtido a seguinte informação:

- Aterro de argilas com 3 metros de altura (NSPT de 4 pancadas);

- Argilas médias com 14 metros de altura (NSPT de 16 pancadas);
- Argilas duras com 11 metro de altura (NSPT de 30 pancadas);
- Argilas muito duras (NSPT de 50 pancadas).

A estratigrafia do subsolo obtido encontra-se representada na figura 2.2.

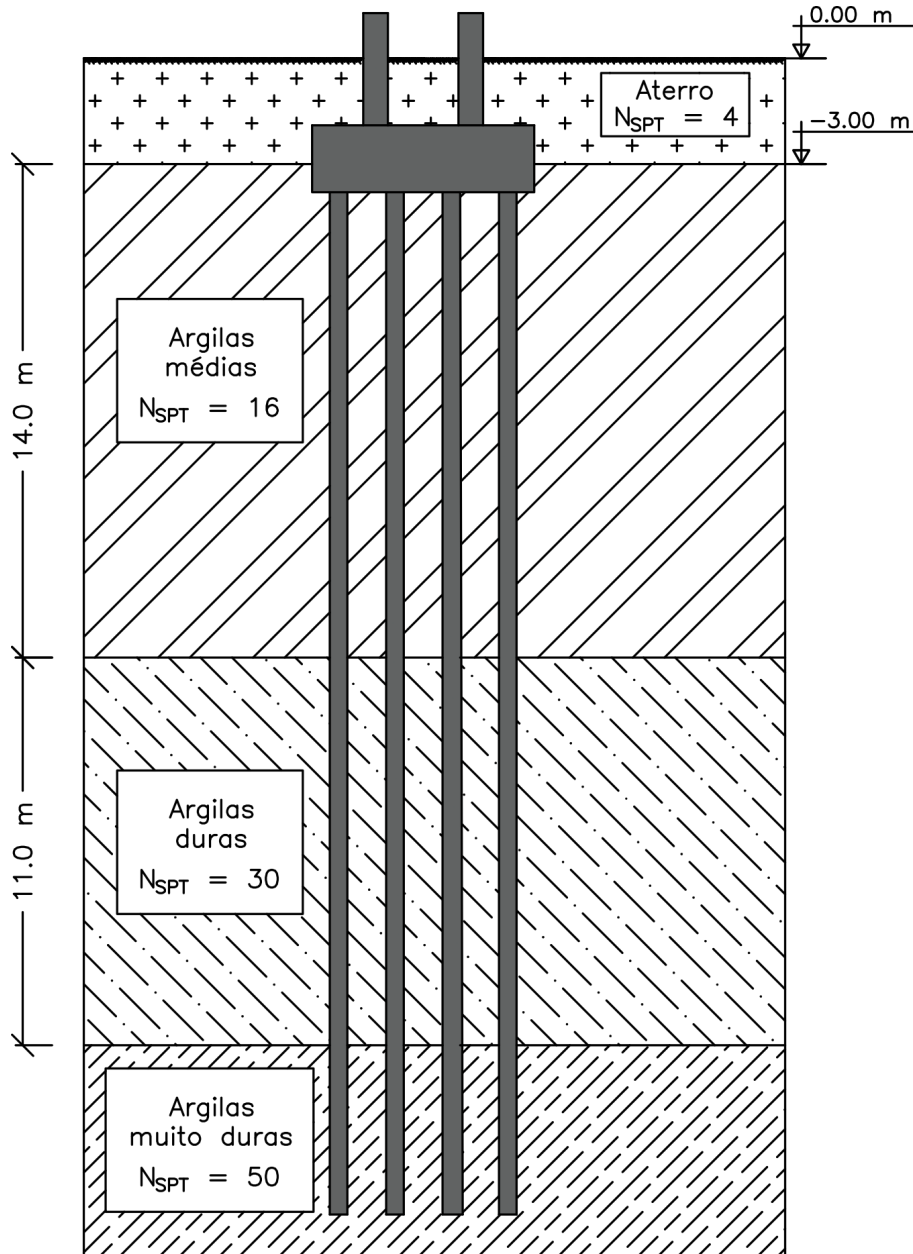


Figura 2.2 Perfil estratigráfico do terreno de fundação.

Devido à fraca consistência dos terrenos de fundação e à existência de uma ponte rolante de grande envergadura recorreu-se a fundações indiretas, realizadas a partir de estacas moldadas com diâmetros de 0,50m e comprimentos na ordem dos 29 metros.

2.3 Geometria do edifício

O hangar possui uma área em planta de 197,1m x 28,4m e um pé-direito de 23,6m, encontrando-se dividido interiormente em espaços ocupados por várias tremonhas e baias, cuja função é garantir a *stockagem*, em separado, das diferentes matérias-primas utilizadas no fabrico do cimento. A planta do hangar encontra-se representada na figura 2.3.

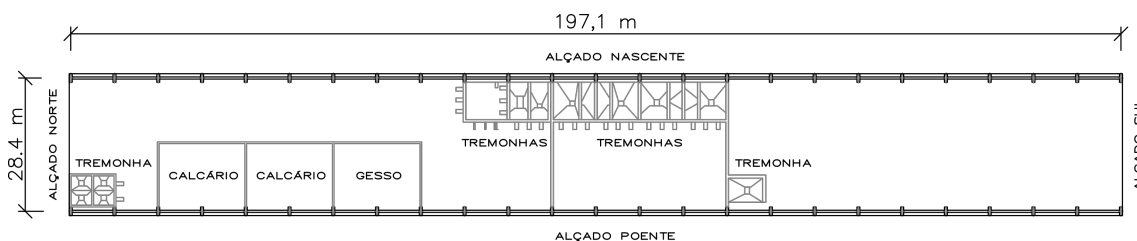


Figura 2.3 Planta do Hangar de Matérias-Primas.

2.4 Funcionamento do Hangar

O Hangar de Matérias-Primas serve como armazém dos diferentes materiais utilizados no fabrico do cimento como por exemplo, filler, gesso e também o clínquer obtido da transformação do calcário em fornos a altas temperaturas. Estes materiais são transportados por telas transportadoras do exterior, e posteriormente *stockados* nas diferentes zonas do Hangar com recurso a uma ponte rolante.

2.5 Descrição da estrutura do edifício

O hangar é constituído por uma cobertura metálica ligada a um conjunto de 24 pórticos planos, em que os pilares funcionam como consolas, travados longitudinalmente por vigas em betão armado onde se incluem as vigas de suporte da ponte rolante, garantindo-se deste modo a estabilidade do conjunto estrutural. Na figura 2.4 mostra-se a vista em planta da estrutura de betão armado.

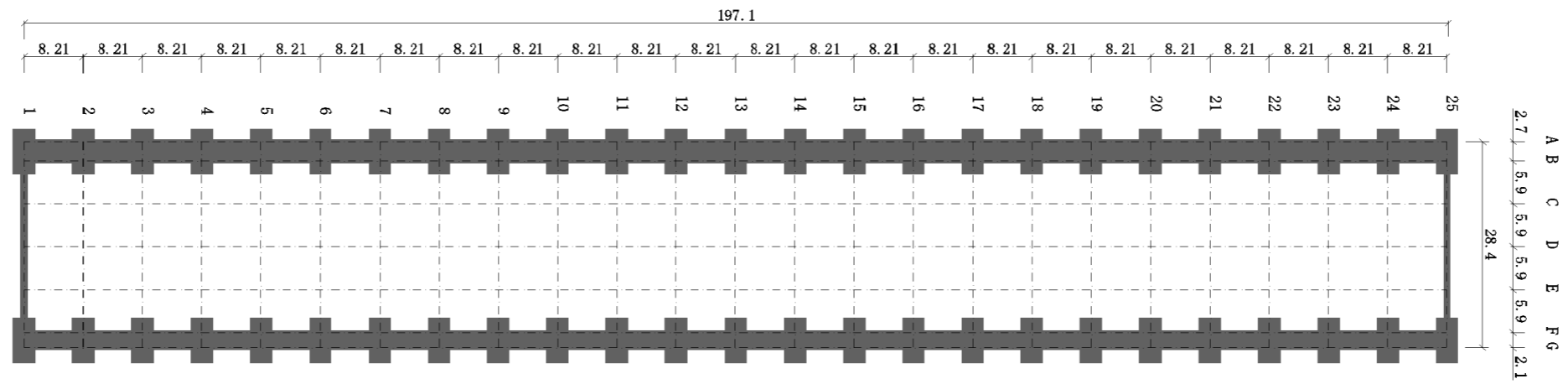


Figura 2.4 Planta da estrutura de betão armado.

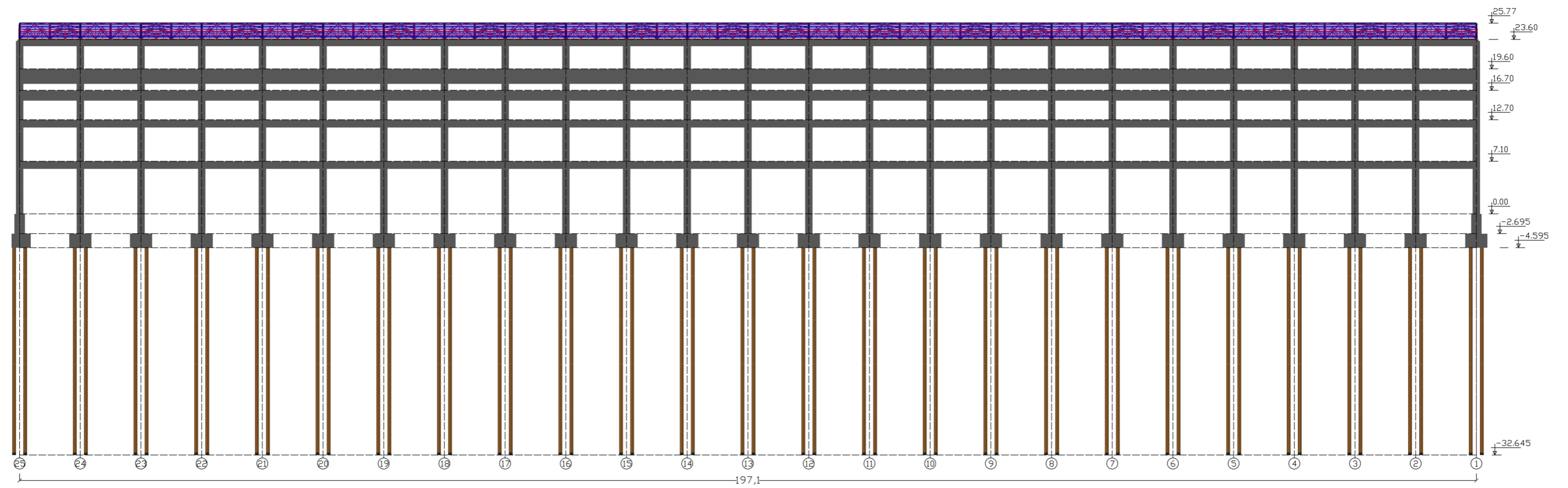


Figura 2.5 Alçado longitudinal.

Os alinhamentos centrais 2 a 24 correspondem ao pórtico transversal tipo representados na figura 2.6.

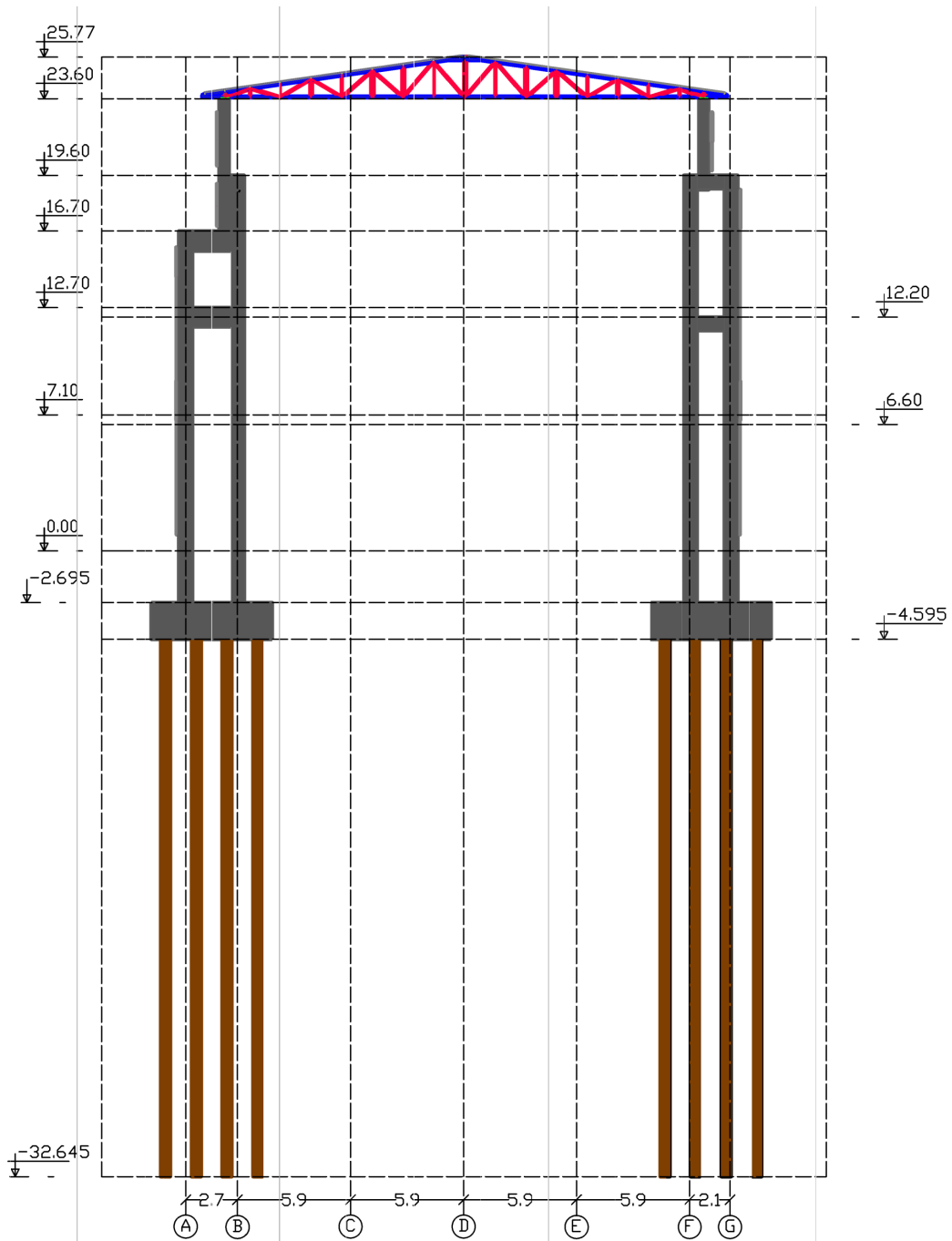


Figura 2.6 Pórticos - alinhamentos 2 a 24.

A geometria do alçado norte correspondente ao alinhamento 1 consta na figura 2.7.

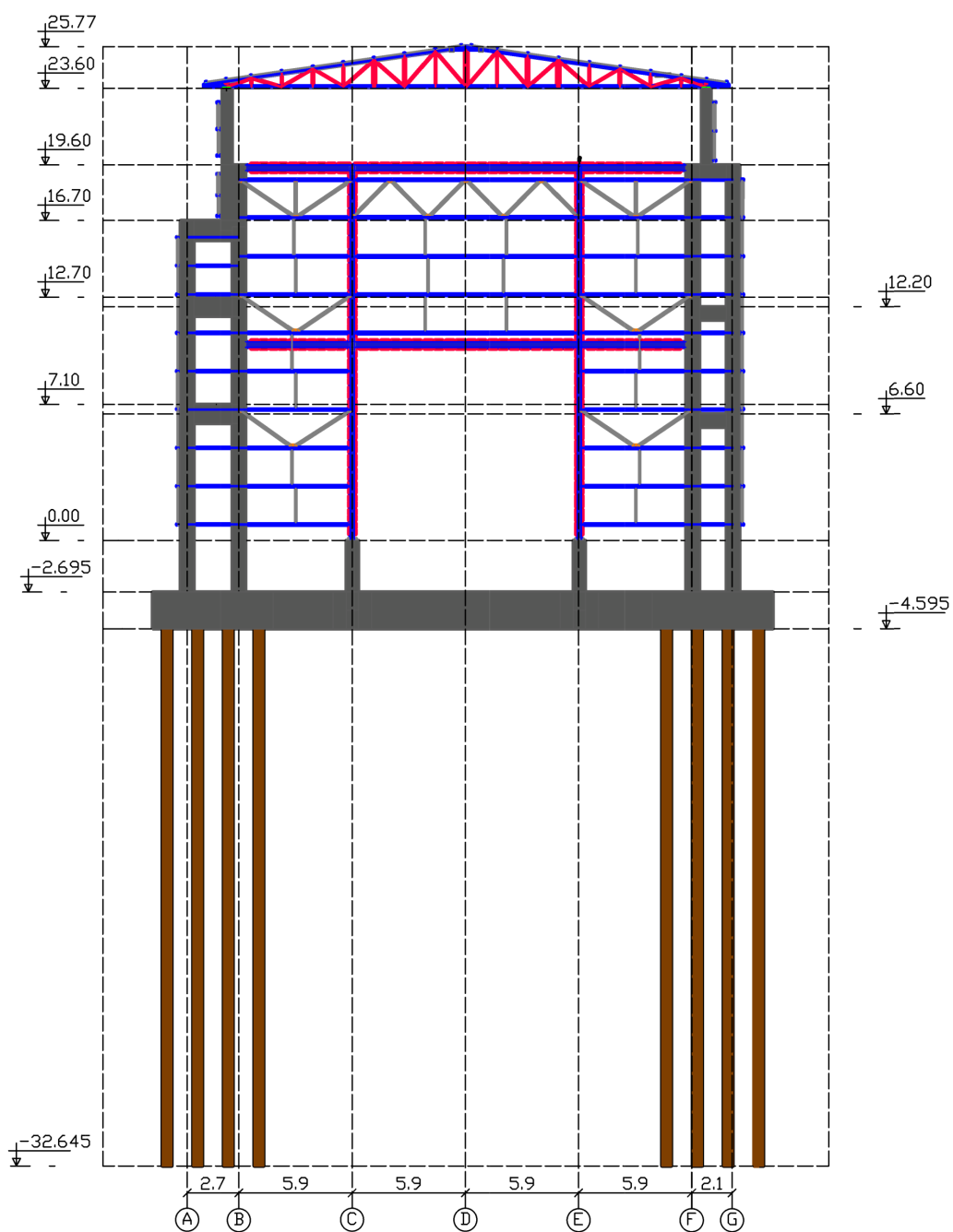


Figura 2.7 Pórtico do alçado norte.

Na figura 2.8 representa-se a geometria do alçado de topo sul.

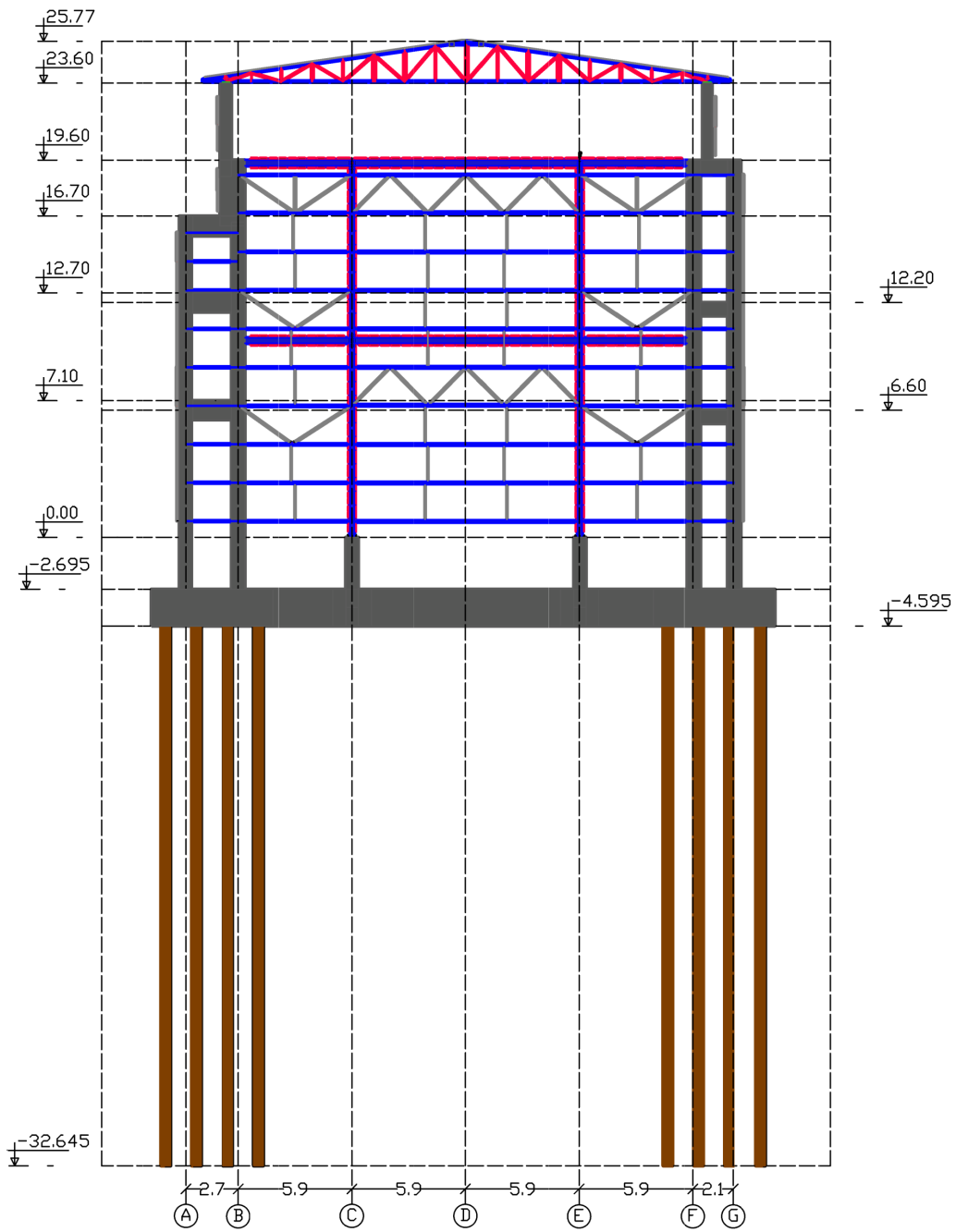


Figura 2.8 Pórtico do alçado sul.

O hangar inclui seis módulos independentes com comprimentos máximos da ordem dos 32,85 metros, correspondentes à distância entre juntas de dilatação. Todos estes módulos têm a mesma geometria, com exceção dos módulos dos alçados Norte e a Sul, aos quais acresce a estrutura dos alçados de topo. A figura 2.9 mostra os módulos considerados ao longo do edifício.

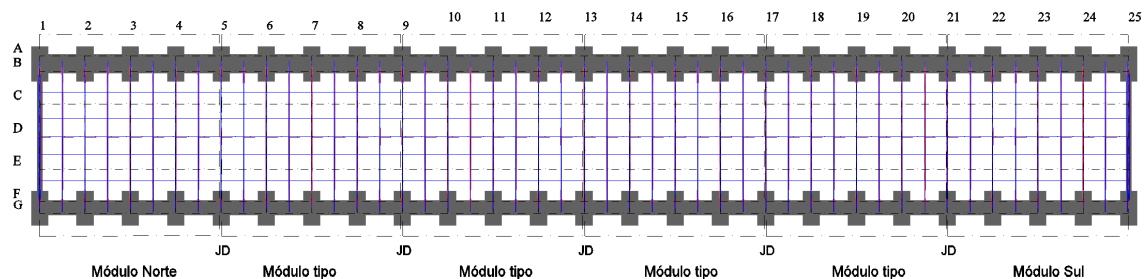


Figura 2.9 “Módulos” considerados.

A estrutura da cobertura é constituída por um conjunto de elementos metálicos cuja conceção foi realizada no sentido de encontrar a solução mais leve, mais fácil de fabricar e de montar.

Para a solução escolhida procedeu-se ao dimensionamento de todos os elementos principais e secundários, a saber:

- asnas;
- vigas longitudinais de travamento;
- madres de cobertura e alçados;
- estruturas de travamentos das asnas ao nível das águas da cobertura e das cordas inferiores;
- restantes elementos secundários.

A figura 2.10 mostra parte da solução estrutural da cobertura considerada para todos os módulos definidos para o Hangar.

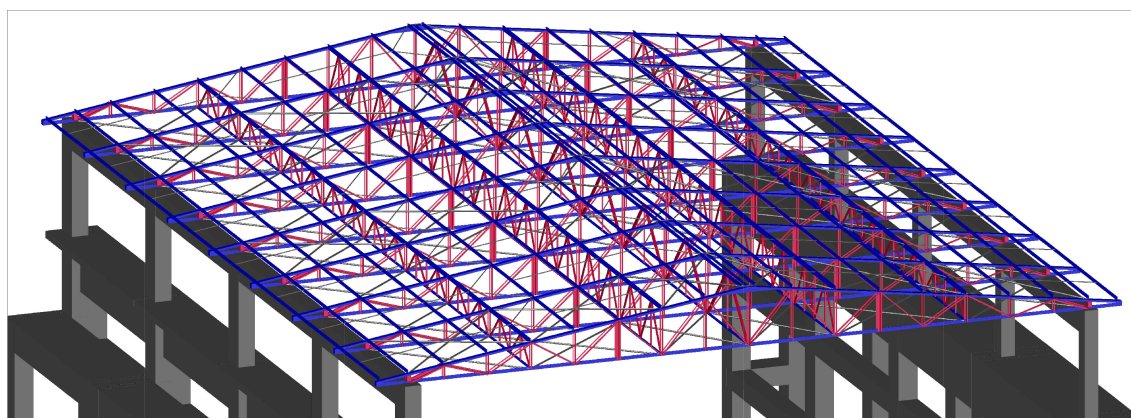


Figura 2.10 Perspetiva da estrutura da cobertura - “módulo” tipo.

As asnas apresentam uma geometria triangular e apoiam simultaneamente nos pilares e nas vigas de travamento entre pilares, conforme se pode observar nas figuras 2.11, 2.12 e 2.13.

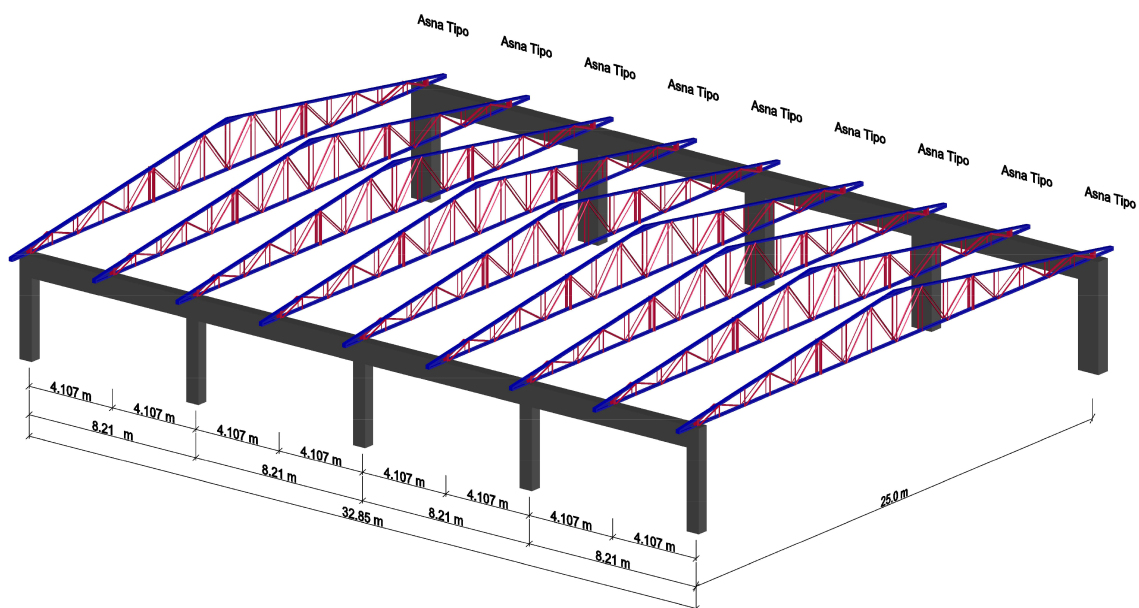


Figura 2.11 Perspetiva das asnas no módulo tipo.

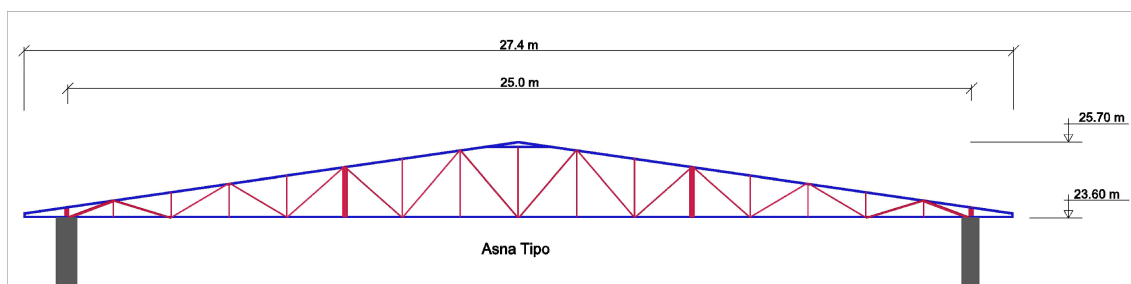


Figura 2.12 Vista frontal das asnas no módulo tipo.

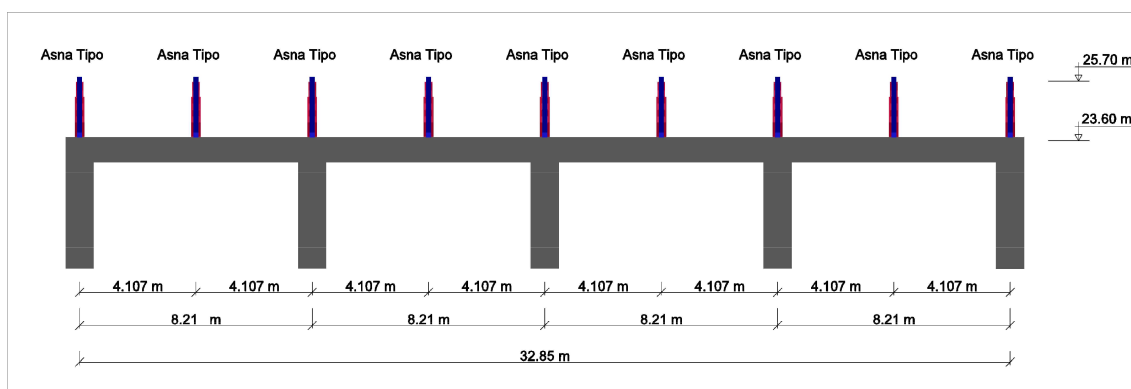


Figura 2.13 Vista lateral das asnas no módulo tipo.

A planta das asnas está representada na figura 2.14.

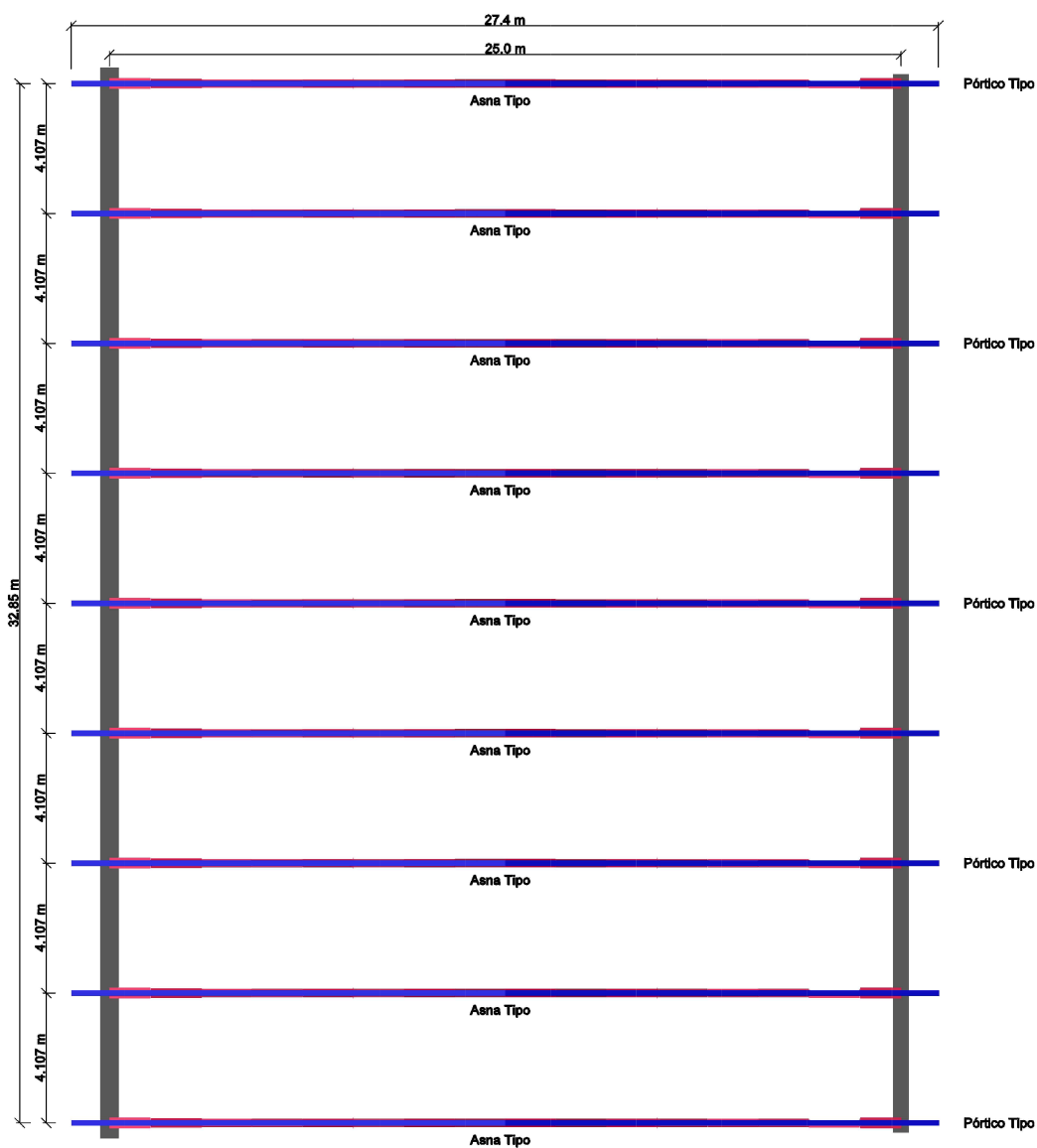


Figura 2.14 Planta das asnas - módulo tipo.

Estas vigas são compostas por perfis UNP nas barras exteriores e por cantoneiras compostas de abas iguais nos elementos interiores, tal como se mostra na figura 2.15.

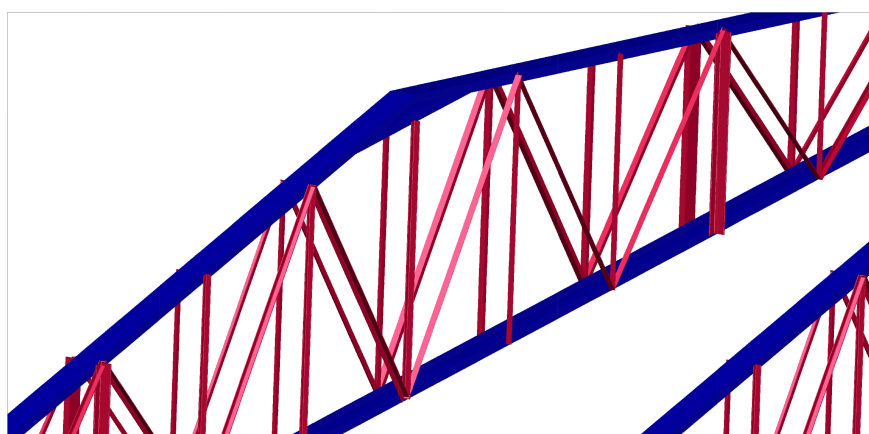


Figura 2.15 Perspetiva parcial de uma das asnas.

As vigas de ligação entre as asnas servem de travamento e diminuem também o comprimento de encurvadura das barras dos cordões. São também estruturas treliçadas cujos elementos exteriores são compostos por perfis UNP, sendo os elementos interiores cantoneiras simples de abas iguais. As figuras 2.16 e 2.17 mostram a localização das vigas de travamento no módulo tipo.

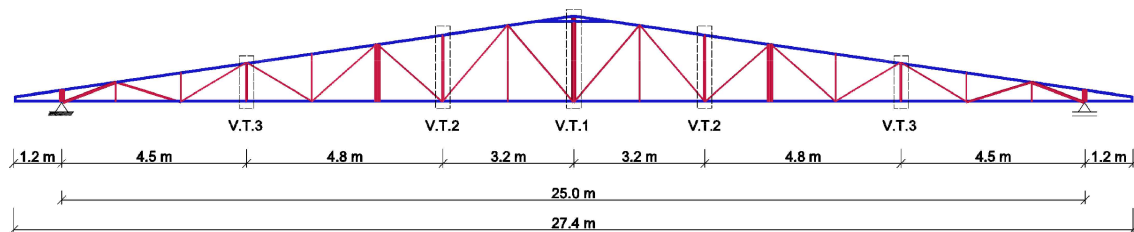


Figura 2.16 Vigas de travamento entre asnas - vista frontal.

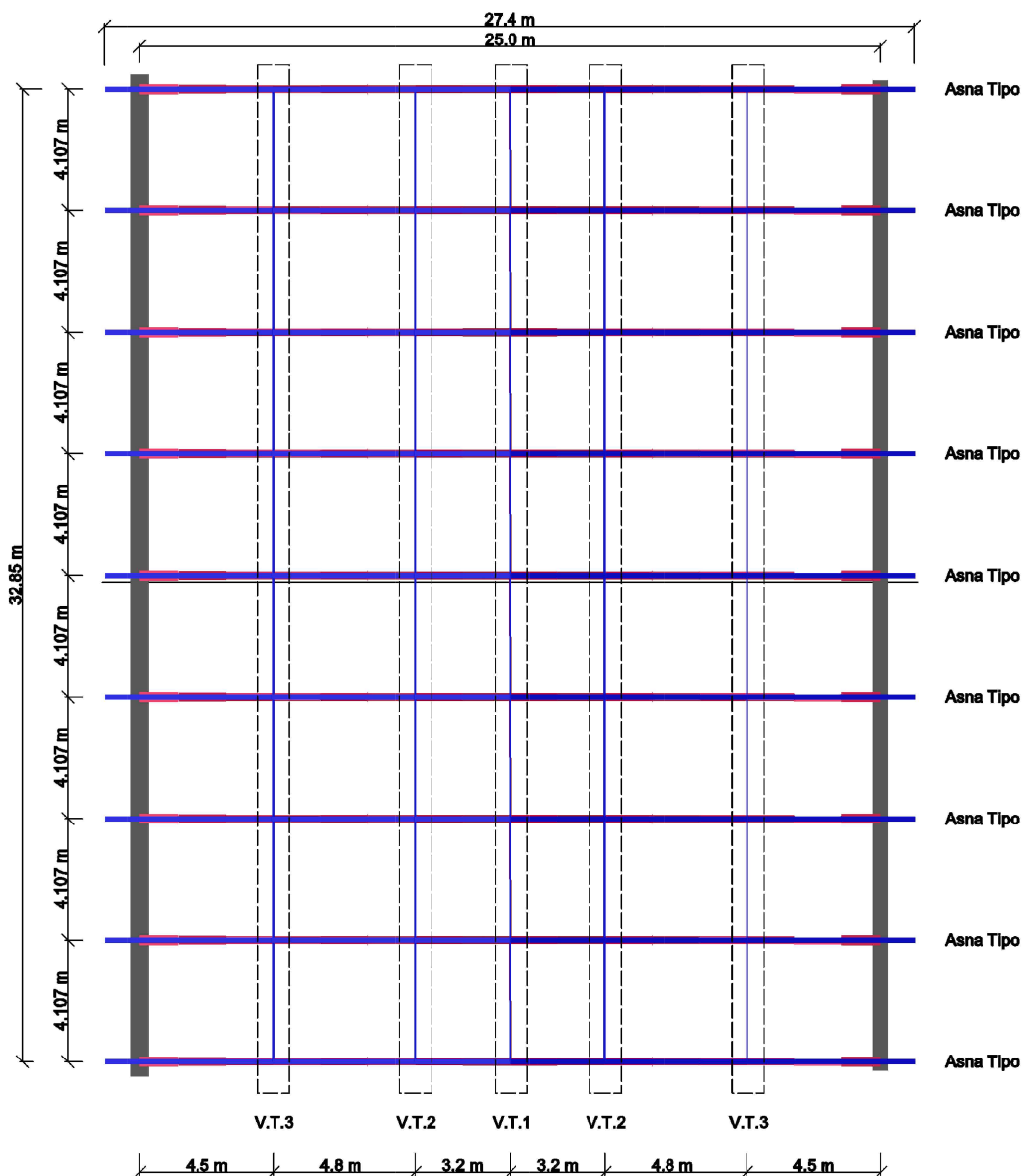


Figura 2.17 Vigas de travamento entre asnas - vista em planta.

A figura 2.18 mostra as vigas de travamento entre asnas.

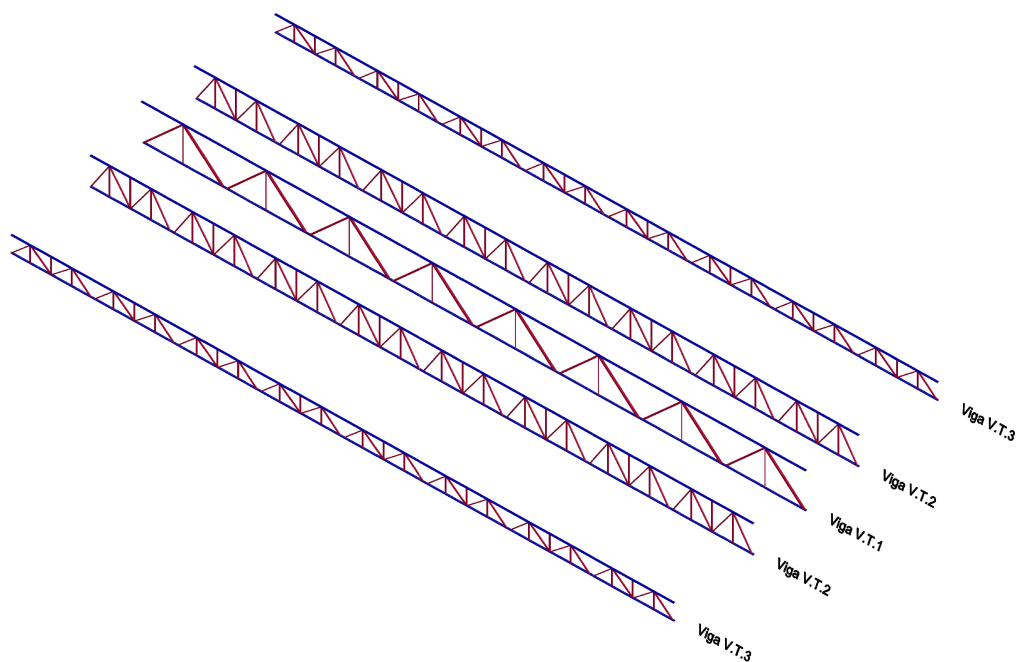


Figura 2.18 Vigas de travamento entre asnas.

Nas figuras 2.19, 2.20 e 2.21 indica-se o pormenor de cada uma das vigas de travamento.

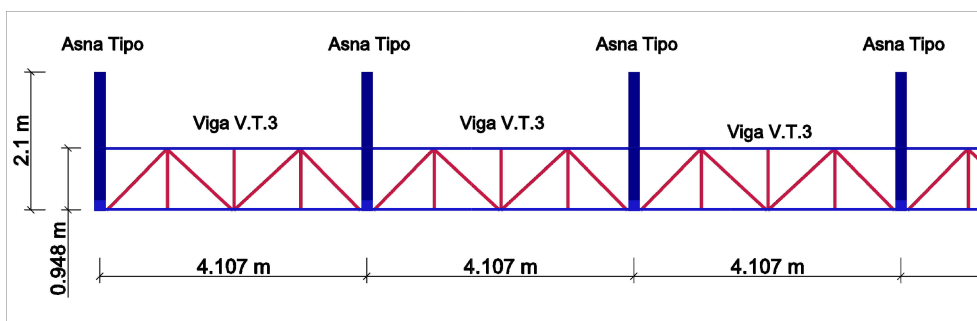


Figura 2.19 Viga V.T.3.

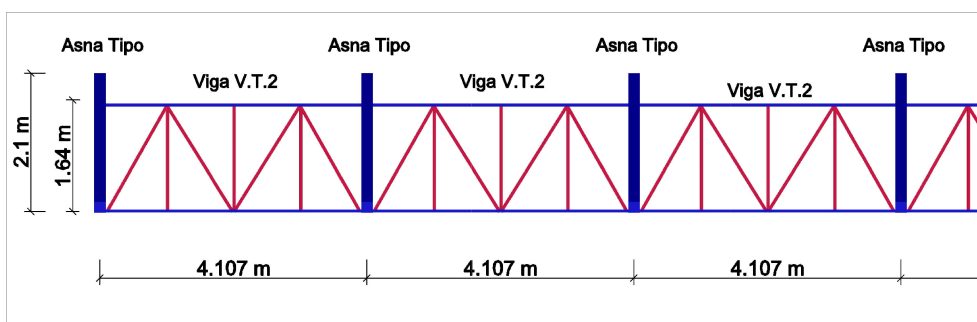


Figura 2.20 Viga V.T.2.

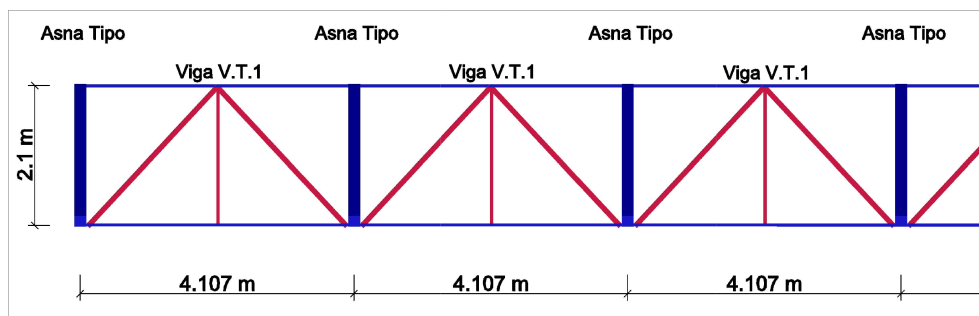


Figura 2.21 Viga V.T.1.

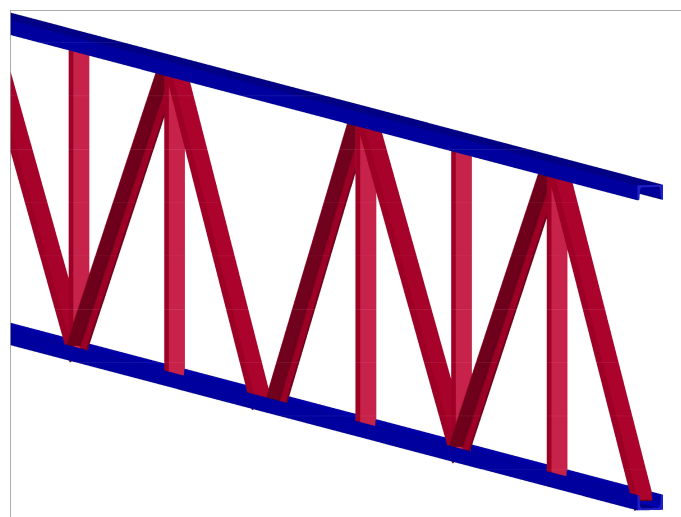


Figura 2.22 Perspetiva de uma das vigas de travamento.

As madres da cobertura são constituídas por perfis laminados IPE (figuras 2.23 a 2.25), sendo os restantes elementos de contraventamento formados por secções tubulares circulares (figuras 2.26 a 2.30).

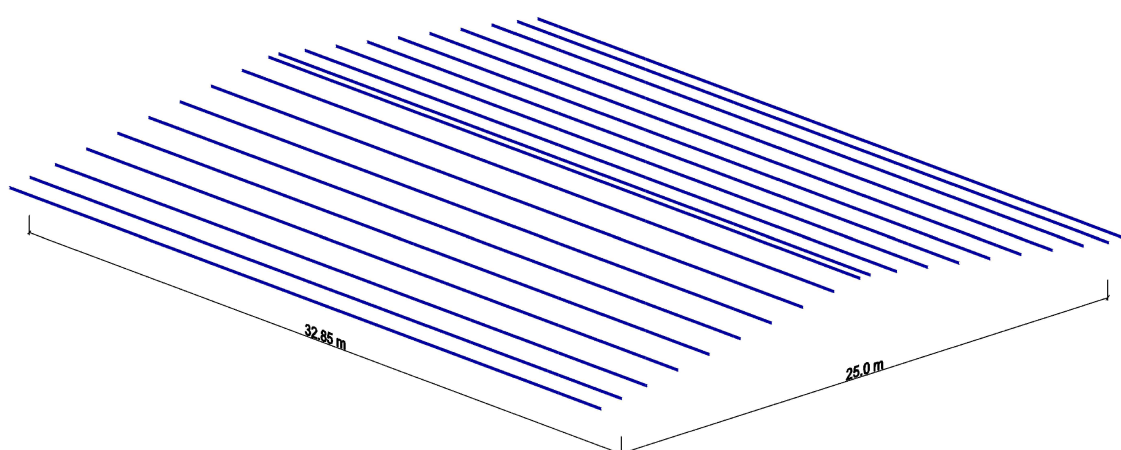


Figura 2.23 Madres da cobertura - módulo tipo.

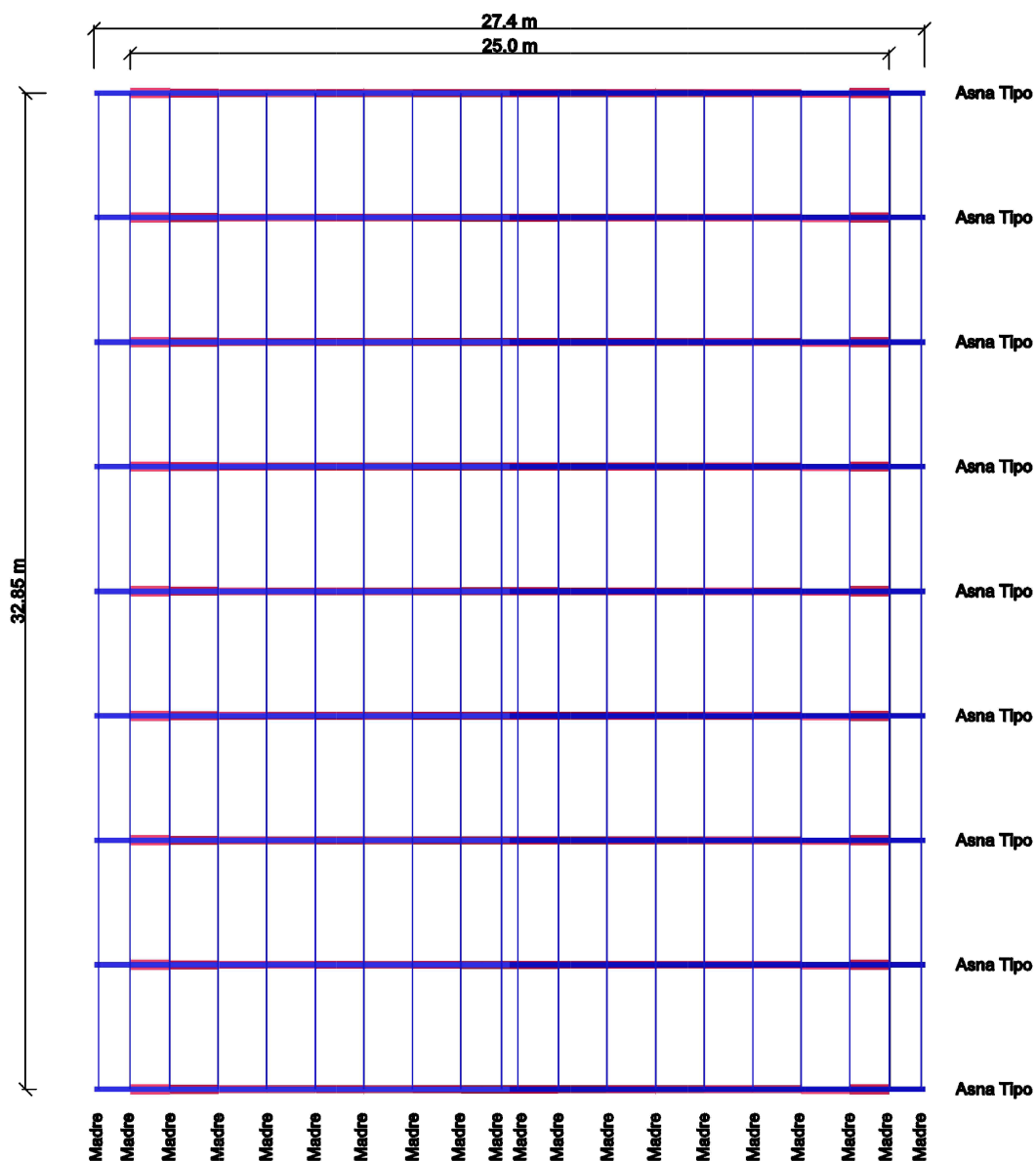


Figura 2.24 Planta das madres da cobertura - módulo tipo.

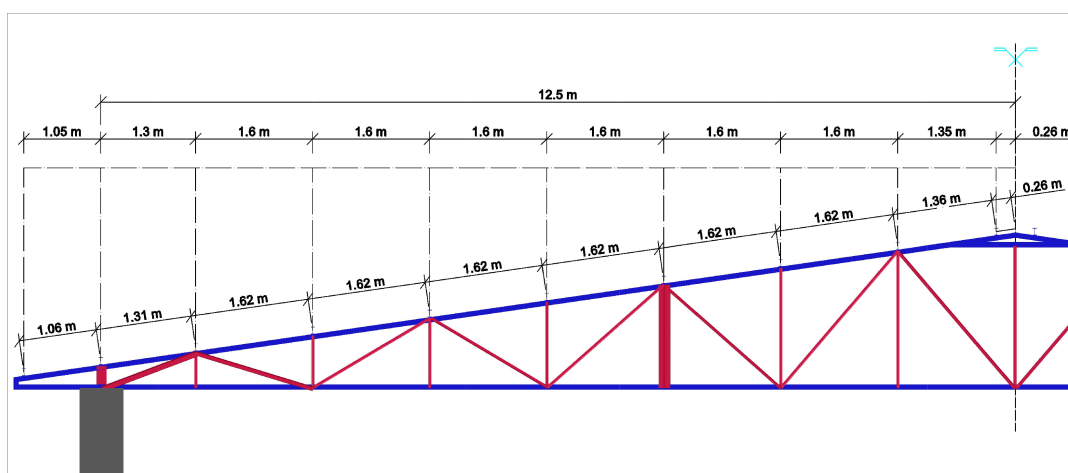


Figura 2.25 Posição das madres de cobertura nas asnas.

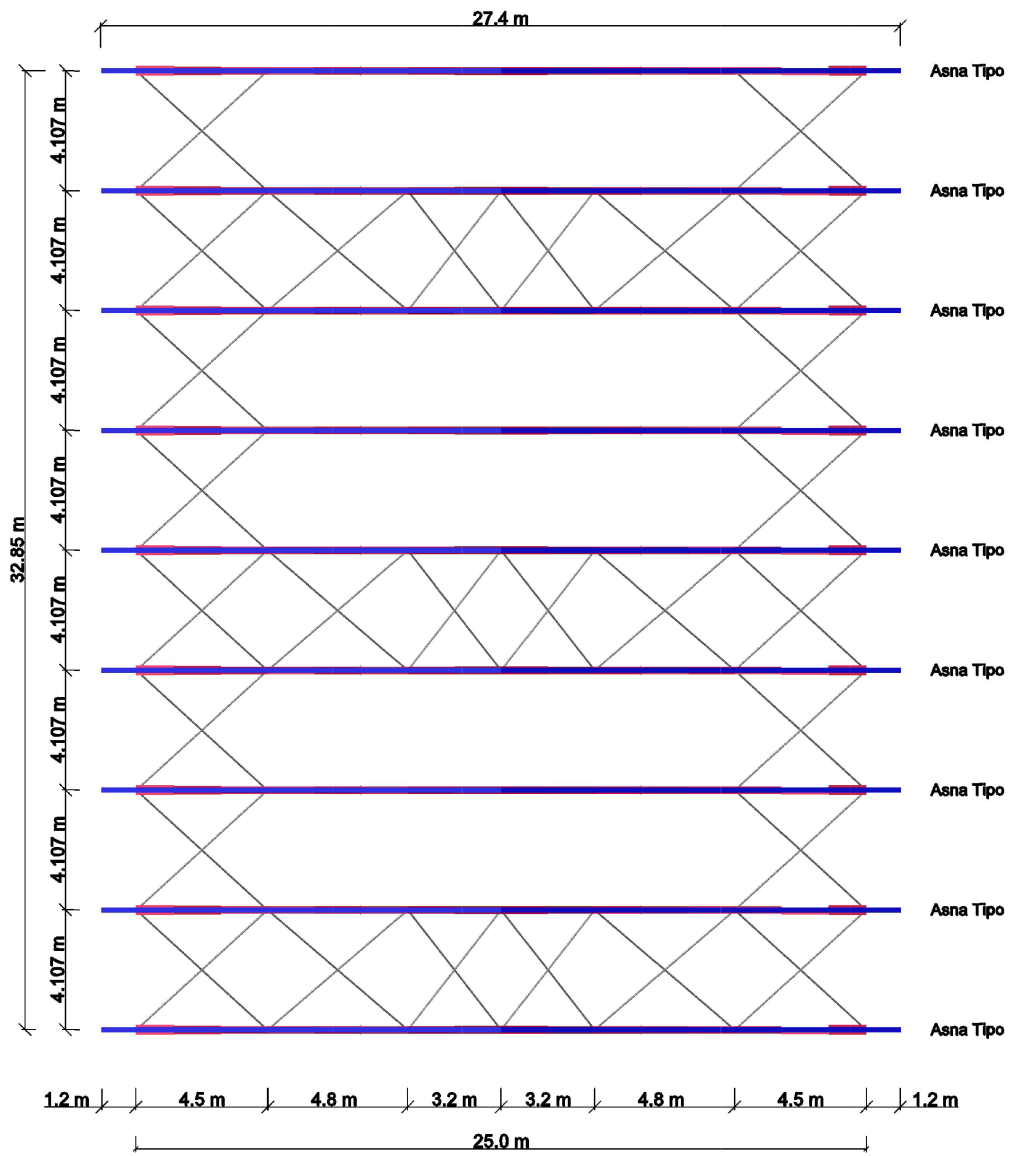


Figura 2.26 Planta de travamentos ao nível das cordas inferiores das asnas - Módulo tipo.

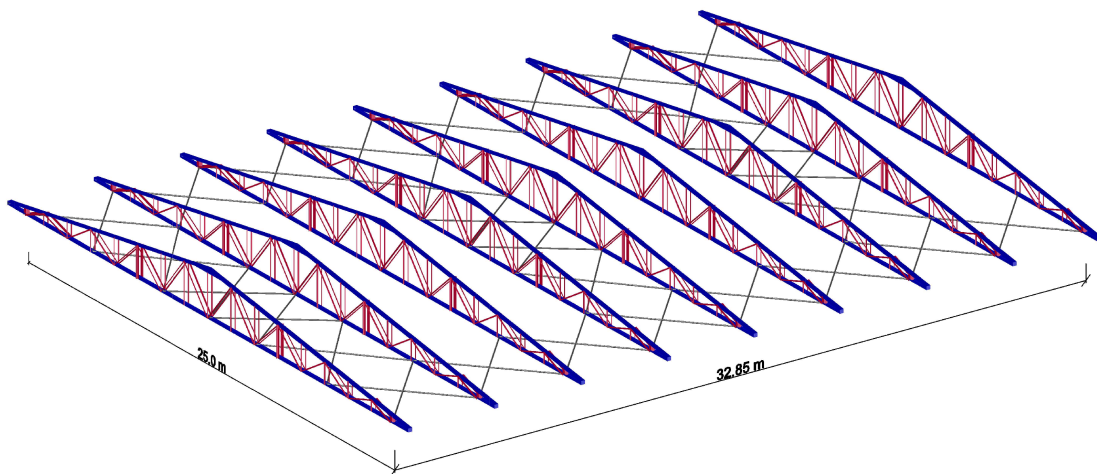


Figura 2.27 Perspetiva dos travamentos ao nível das cordas inferiores - Módulo tipo.

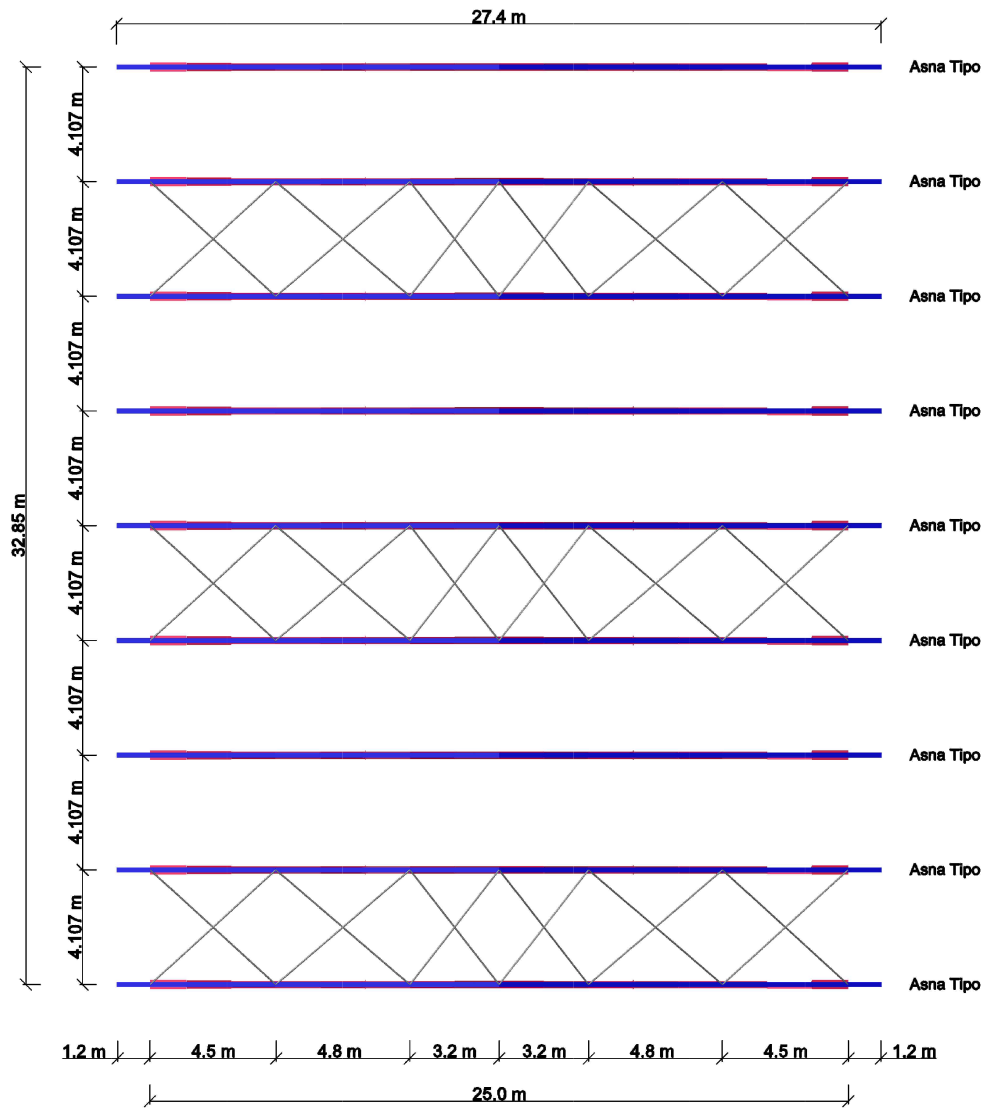


Figura 2.28 Planta de travamentos ao nível das águas da cobertura - Módulo tipo.

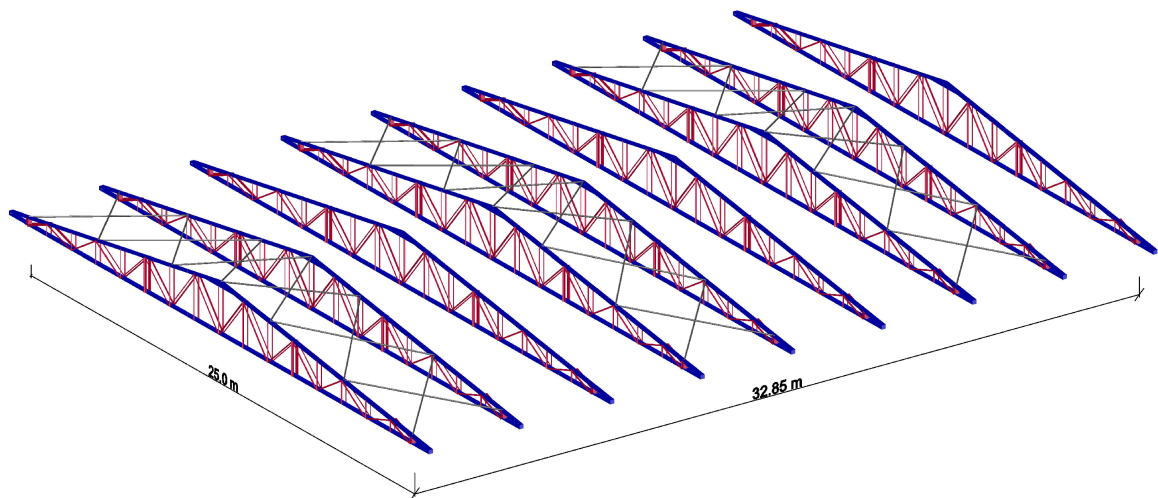


Figura 2.29 Vista dos travamentos ao nível das águas da cobertura.

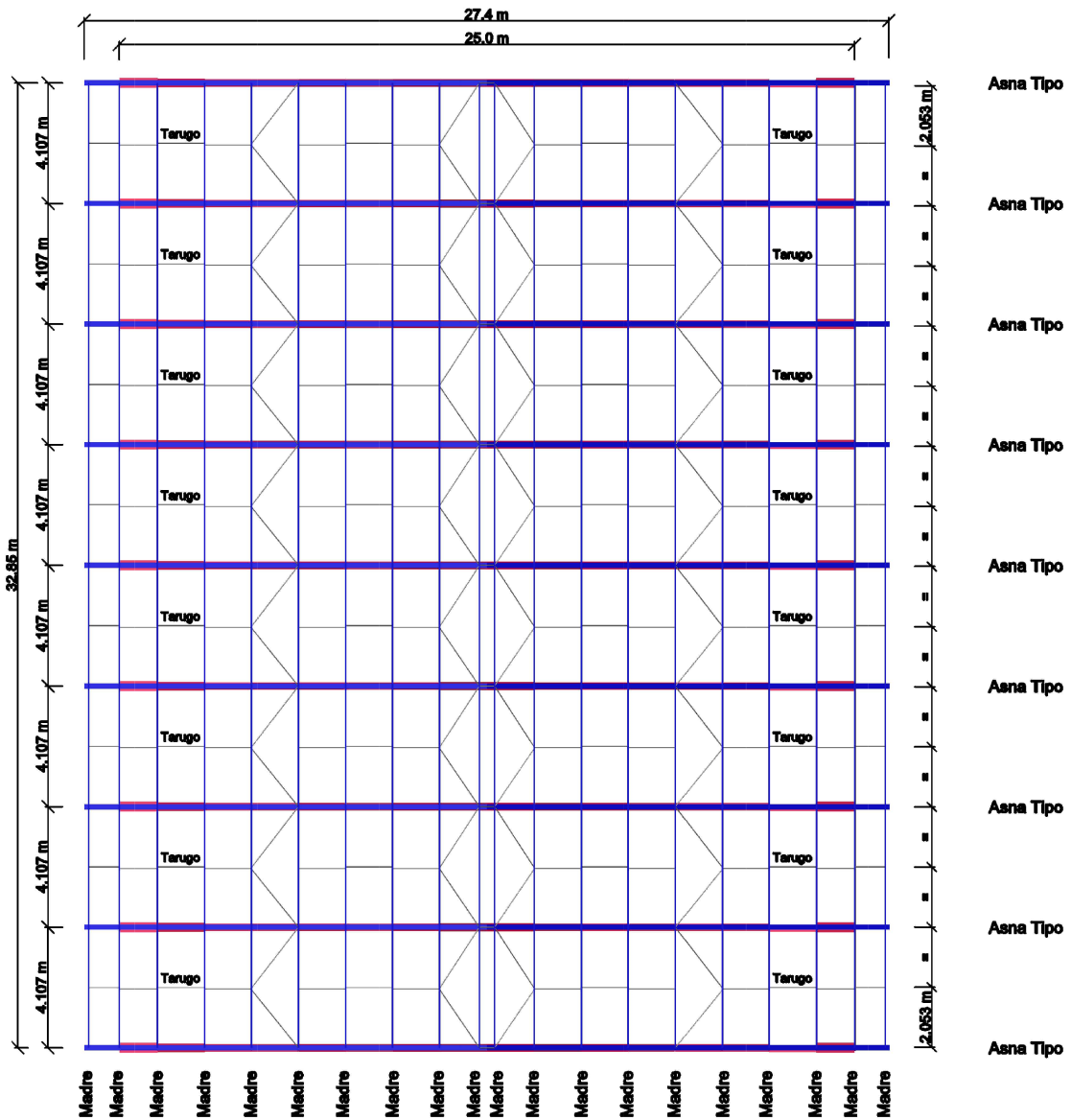


Figura 2.30 Planta de tarugos - módulo tipo.

As madres dos alçados têm como função servir de apoio às chapas dos revestimentos exteriores, e são constituídas por perfis UNP conforme mostram as figuras 2.31 a 2.33.

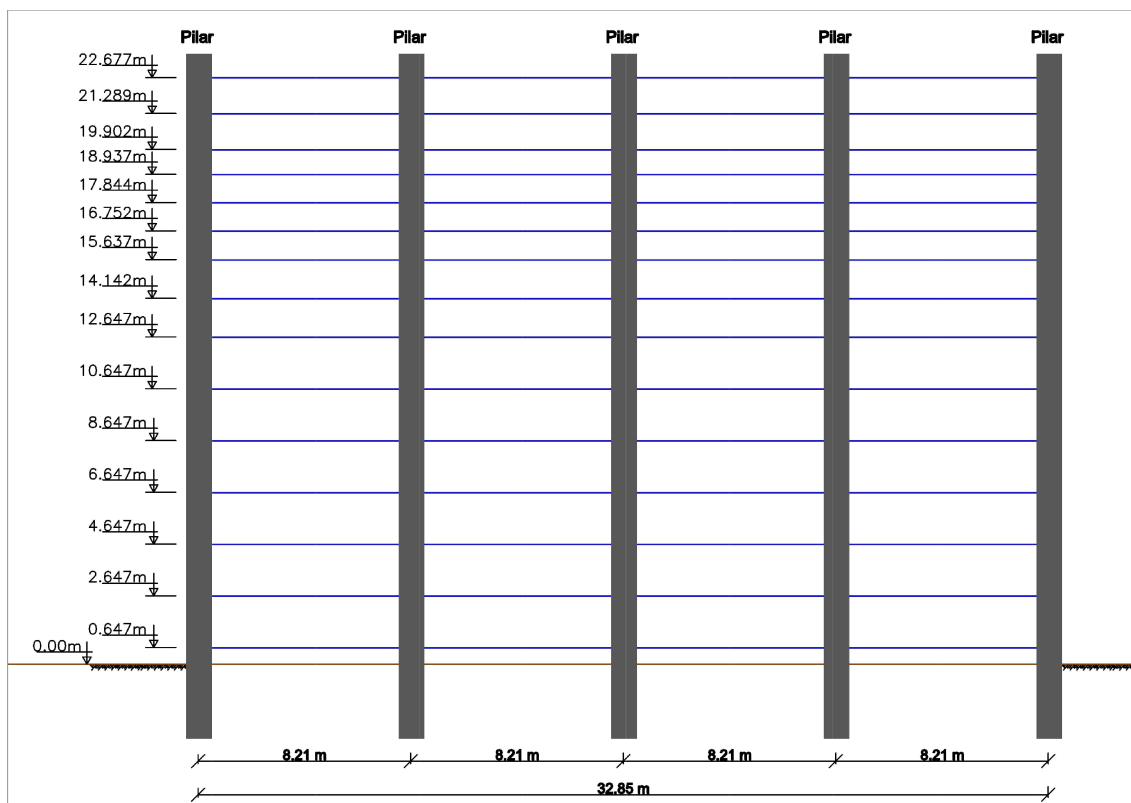


Figura 2.31 Madres do alçado nascente - Módulo tipo.

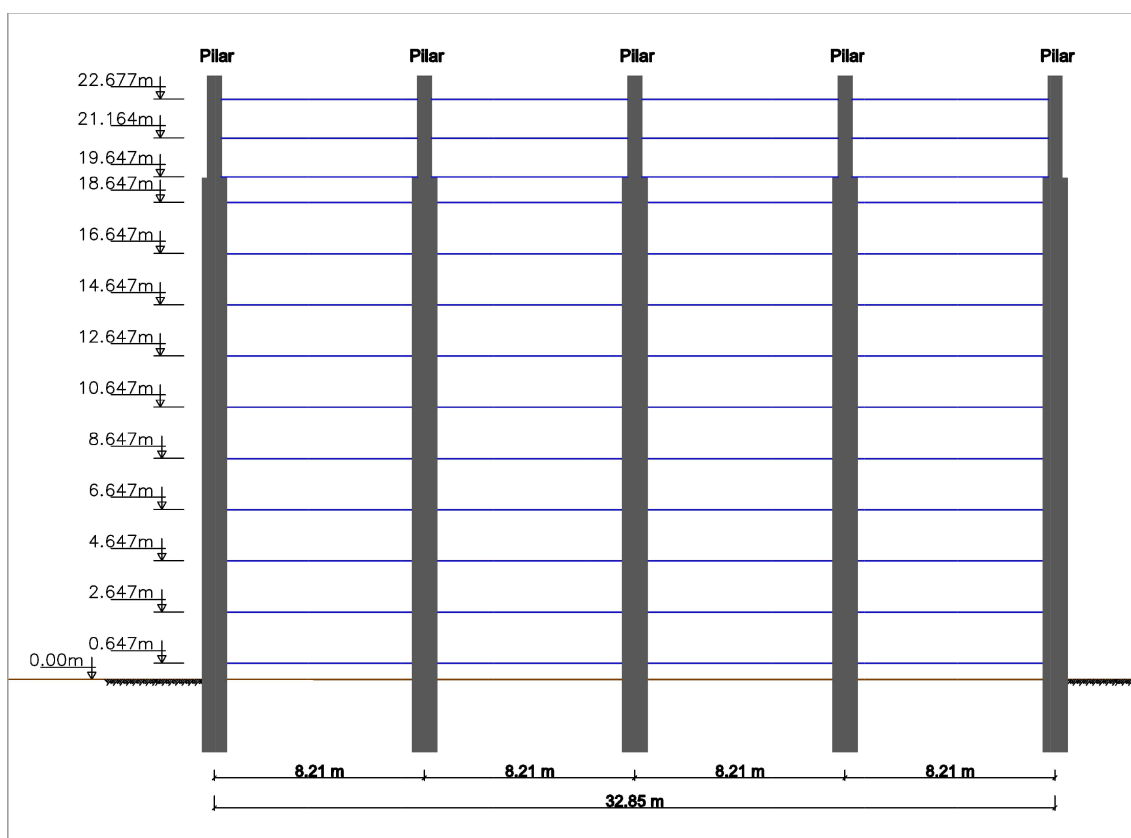


Figura 2.32 Madres do alçado poente - Módulo tipo.

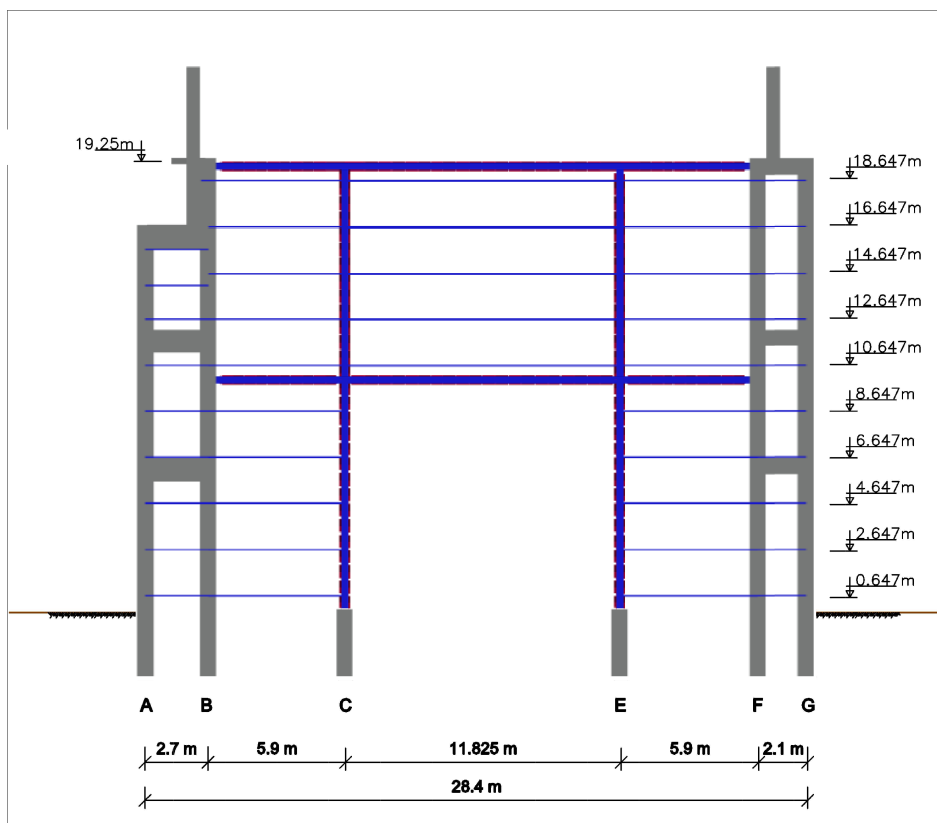


Figura 2.33 Madres do alçado norte.

Nota: As madres do alçado sul encontram-se às mesmas cotas das madres do alçado norte.

Capítulo 3

Materiais

3.1 Estruturas metálicas

As características do aço utilizado no presente projeto encontram-se indicadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 Classes de Resistência dos Aços.

Elementos estruturais	Classe de resistência
Perfis e chapas	S 275 JR
Parafusos	8.8 e 10.9 (ISO 272, ISO 7411)
Porcas	10 (DIN6915)
Anilhas	10 (DIN6916)

Tabela 3.2 Características do Aço.

Aço S275 JR	
f_y	275 MPa
f_u	430 MPa
E_s	210 GPa
G	81 GPa
ν_s	0,3
α	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
γ	78,5 kN/m ³

3.2 Estruturas de betão armado

O betão a utilizar neste projeto é da classe C30/37 e respeita todas as condições impostas pela NP EN 206-1:2007. As características do betão estão indicadas nas tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 Betão a utilizar.

Elementos estruturais	Classe de exposição	Classe de resistência	Máxima razão A/C	Dosagem mín. de cimento (kg/m^3)	D_{max} (mm)	Recobrim. (cm)
Pilares, vigas, lajes	XC4	C30/37	0,65	260	20	3
Maciços de encabeçamento	XC2	C30/37	0,65	260	20	5
Estacas	XC2	C30/37	0,6	280	20	5

Tabela 3.4 Características do betão.

Betão C30/37	
f_{ck} (MPa)	30
f_{cd} (MPa)	20
f_{ctm} (MPa)	2,9
E_{cm} (GPa)	33
ν	0,2

No caso das armaduras ordinárias, considerou-se aço A500 NR cujas características constam na tabela 3.5.

Tabela 3.5 Principais características do aço das armaduras ordinárias.

Aço A500 NR	
f_{yk} (MPa)	500
f_{yd} (MPa)	435
f_u (MPa)	550
E_s (GPa)	200
ε_{yd}	0,00218

Capítulo 4

Ações

As ações consideradas no cálculo das estruturas da cobertura incluem:

- permanentes
- variáveis

4.1 Ações Permanentes

As ações permanentes definem-se com valores constantes ao longo do período de vida útil da estrutura e compreendem:

- peso próprio da estrutura (PP);
- restantes cargas permanentes (RCP).

A regulamentação para estas ações consta na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Regulamentação aplicada às Ações Permanentes.

Tipo de Ação Permanente	Regulamentação
Peso Próprio (PP)	NP EN 1991-1-1:2009
Restantes Cargas Permanentes (RCP)	NP EN 1991-1-1:2009

4.1.1 Peso Próprio

A ação devido ao peso próprio das estruturas é determinada com base nos pesos específicos indicados na NP EN 1991-1-1 – Ações em Estruturas, e também para os perfis metálicos, recorrendo a tabelas que indicam as características geométricas e elásticas dos perfis e chapas fornecidas pelos fabricantes siderúrgicos.

4.1.2 Restantes Cargas Permanentes

As restantes cargas permanentes compreendem o peso de todos os elementos não estruturais que formam a cobertura, tais como revestimentos, acessórios de ligação, aparelhos de iluminação e de suspensão de cargas.

4.2 Ações Variáveis

As ações variáveis são as que variam no tempo e no espaço ao longo do período de vida útil da construção. São consideradas nesta categoria as seguintes ações:

- sobrecargas (SC);
- ação térmica (T);

- ação do vento (W);
- ação sísmica (E);
- equipamentos mecânicos (MAQ).

A regulamentação aplicada a cada tipo de ação variável é a indicada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Regulamentação aplicada às Ações Variáveis

Tipo de Ação Variável	Regulamentação
Sobrecarga (SC)	NP EN 1991-1-1:2009
Ação Térmica (T)	NP EN 1991-1-5:2009
Ação do Vento (W)	NP EN 1991-1-4:2010
Ação Sísmica (E)	NP EN 1998-1:2010

4.2.1 Sobrecargas

As sobrecargas na cobertura do hangar devem-se essencialmente à acumulação do pó de cimento e de clínquer.

4.2.2 Ação Térmica

As ações térmicas em edifícios resultam de variações de temperatura, de natureza climática ou operacional, e devem ser consideradas no seu cálculo por forma a evitar esforços adicionais resultantes de variações de volume dos seus elementos estruturais. De referir, também, que esses esforços apenas surgem em estruturas hiperestáticas perante a impossibilidade das mesmas dilatarem livremente.

A intensidade da ação térmica depende de um conjunto de fatores como, por exemplo, condições atmosféricas locais, orientação da estrutura, massa total da estrutura, revestimentos, etc.

Segundo a norma EN 1991-1-5 as variações de temperatura numa determinada estrutura podem ser classificadas da seguinte forma:

- Variação uniforme de temperatura, ΔT_u - corresponde às variações sazonais que ocorrem entre o Verão e o Inverno;
- Variação diferencial de temperatura, ΔT_M - corresponde às variações térmicas diárias.

Neste projeto, visto tratar-se de um edifício industrial em que o revestimento térmico não tem grande influência, apenas se considera a variação uniforme de temperatura, que, de acordo com o EC1-5, pode ser determinada a partir da expressão:

$$\Delta T_u = T - T_0 \quad (4.1)$$

em que:

T temperatura média de um elemento estrutural resultante das temperaturas climáticas no Inverno ou no Verão ;

T_0 temperatura inicial do elemento.

A temperatura média, T , pode ser determinada a partir da média das temperaturas interiores (T_{in}) e exteriores (T_{out}), ou seja, através da expressão 4.2:

$$T = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (4.2)$$

Tendo em consideração que o efeito do revestimento térmico não tem influência, sabe-se que as temperaturas interiores e exteriores são equivalentes ($T_{in} = T_{out}$). Assim, as variações uniformes de temperatura máxima negativas que ocorrem no Inverno (ΔT_u^-), e de temperatura máxima positiva que ocorre no Verão (ΔT_u^+), são determinadas, respetivamente, a partir das expressões 4.3 e 4.4:

$$\Delta T_u^- = T(I) - T_0 \quad (4.3)$$

$$\Delta T_u^+ = T(V) - T_0 \quad (4.4)$$

em que:

$T(I)$ temperatura média de um elemento estrutural resultante das temperaturas climáticas no Inverno;

$T(V)$ temperatura média de um elemento estrutural resultante das temperaturas climáticas no Verão.

4.2.3 Ação do Vento

As alterações climáticas afetam todas as regiões do mundo e os fenómenos extremos resultantes dessas alterações são cada vez mais frequentes. O aumento do número de ocorrências de precipitação intensa, ventos fortes, ou a combinação de ambos pode provocar danos severos numa determinada estrutura, caso a mesma não se encontre devidamente preparada para resistir às ações provocadas pelos seus efeitos.

A ação dinâmica do vento desenvolve especial importância em construções leves de grandes vãos livres, tais como coberturas de estádios, pavilhões industriais e hangares, em edifícios altos e pontes suspensas.

A quantificação da ação do vento pode ser determinada a partir da metodologia proposta pela NP EN 1991-1-4:2010 – Ação do Vento. Esta metodologia assume que, apesar do caráter dinâmico da ação do vento, esta pode ser quantificada de forma simplificada por meio de carregamentos estáticos equivalentes com base na equação de Bernoulli. A equação de Bernoulli, expressa na equação 4.5, permite determinar a força F a que um corpo fica sujeito quando imerso num fluido com velocidade v :

$$F = \frac{1}{2} \times c \times \rho \times v^2 \times A \quad (4.5)$$

onde:

- c - coeficiente de forma ou coeficiente aerodinâmico;
- ρ - massa específica;
- v - velocidade de escoamento;
- A - área de referência (projeção do corpo no plano perpendicular à velocidade do fluido).

De acordo com o EC1-1-4, as ações do vento variam em função do tempo e atuam na forma de pressões sobre as superfícies exteriores e interiores das construções, gerando forças perpendiculares a estas superfícies ou aos elementos de revestimento individuais. De referir, também, que quando o vento varre grandes áreas de construções, podem desenvolver-se forças de atrito que atuam tangencialmente à superfície das construções.

Resumidamente, as forças exercidas pelo vento (F_w) sobre o conjunto da construção podem ser determinadas das seguintes formas:

1. A partir de pressões nas superfícies;

Caso se pretenda calcular a força (F_w) a partir das pressões nas superfícies, esta pode ser determinada através da soma vetorial das forças exteriores ($F_{w,e}$), interiores ($F_{w,i}$) e de atrito (F_{fr}), de acordo com as expressões 4.6, 4.7 e 4.8, indicadas em seguida.

- Forças exteriores

$$F_{w,e} = c_s c_d \times \sum_{\text{superfícies}} w_e \times A_{ref} \quad (4.6)$$

- Forças interiores

$$F_{w,i} = \sum_{\text{superfícies}} w_i \times A_{ref} \quad (4.7)$$

- Forças de atrito

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr} \quad (4.8)$$

Relativamente às forças de atrito F_{fr} , destaca-se que o fato destas forças apenas existirem na direção das componentes do vento paralelas às superfícies exteriores. Além disso, é de referir também, tal como indicado na cláusula 5.3 (4) do EC1-1-4, que quando a área total de todas as superfícies paralelas (ou pouco inclinadas) em relação ao vento é igual ou inferior a quatro vezes a área total de todas as superfícies exteriores perpendiculares ao vento, os efeitos do atrito do vento sobre a superfície podem ser desprezados.

2. A partir de coeficientes de força apropriados.

Na hipótese da força do vento (F_w) ser calculada com recurso a coeficientes de força, a mesma pode ser determinada a partir da expressão:

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z_e) \times A_{ref} \quad (4.9)$$

No caso concreto do presente projeto, a metodologia adotada para o cálculo de F_w segue as diretrizes respeitantes à primeira via, ou seja, a partir das pressões nas superfícies, sendo que, para o seu cálculo é necessário a determinação dos seguintes parâmetros:

- pressão dinâmica de pico, q_p ;
- pressões exercidas sobre as superfícies, w ;
- coeficientes de pressão exterior, interior e de atrito (c_{pe} , c_{pi} , c_{fr});

- áreas de referência (A_{ref} , A_{fr});
- coeficiente estrutural, $c_s c_d$.

O estudo da ação do vento na construção consistiu pois na determinação das forças exercidas pelo vento nas paredes verticais e coberturas dos módulos cujo efeito é mais prejudicial, ou seja, nos módulos das extremidades. Dado que os módulos correspondentes aos alçados Norte e Sul são idênticos, tendo em conta a simetria da estrutura, optou-se por determinar o efeito das ações no vento no módulo Norte.

Neste sentido, são estudadas as componentes segundo as direções x e y, nos sentidos negativo e positivo, correspondentes às direções mais prejudiciais. A figura 4.1 mostra as situações em que a ação do vento gera os carregamentos mais desfavoráveis na estrutura.

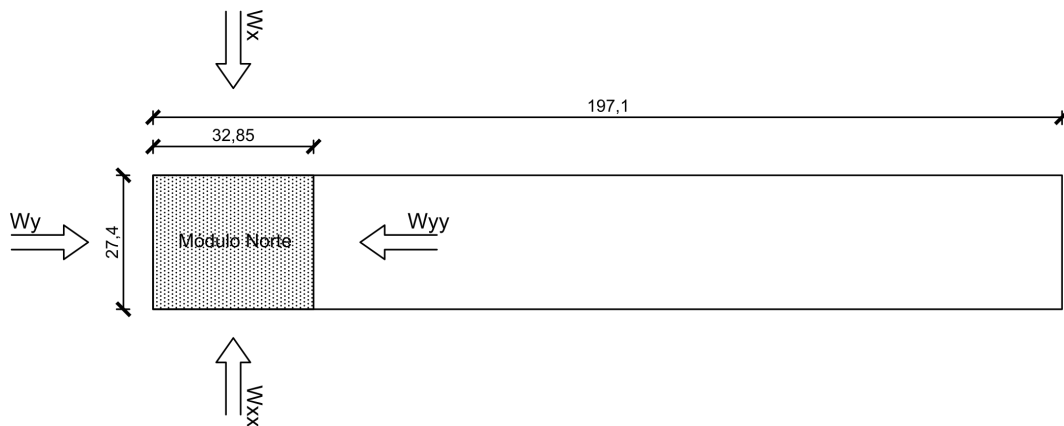


Figura 4.1 Direções do vento.

Verifica-se que as condições mais adversas ocorrem quando o vento incide perpendicularmente nas superfícies da construção, resultando nas seguintes componentes:

- W_x - Vento segundo x no sentido positivo
- W_{xx} - Vento segundo x no sentido negativo
- W_y - Vento segundo y no sentido positivo
- W_{yy} - Vento segundo y no sentido negativo

Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico é a pressão resultante da velocidade média, e inclui a contribuição da componente relacionada com a velocidade de pico, ou de rajada, que considera as flutuações de curta duração do vento características do regime turbulento. A pressão dinâmica de pico, q_p , a uma altura z acima do solo, é calculada através de:

$$q_p(z_e) = [1 + 7 \times I_v(z_e)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z_e) \quad (4.10)$$

em que:

- ρ massa volúmica do ar ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$);
- z_e altura de referência;
- $v_m(z)$ velocidade média do vento à altura z_e ;
- $I_v(z)$ intensidade de turbulência à altura z_e .

Vento médio

A velocidade média do vento, v_m , a uma altura z_e acima do solo é determinada por:

$$v_m(z_e) = c_r(z_e) \times c_o(z_e) \times v_b \quad (4.11)$$

onde:

- $c_r(z_e)$ coeficiente de rugosidade;
- $c_o(z_e)$ coeficiente de orografia;
- v_b valor de referência da velocidade do vento.

O cálculo da componente média do vento deve respeitar a metodologia proposta nos pontos seguintes:

1. Determinação da altura de referência, z_e

A altura de referência relaciona-se diretamente com as características geométricas da construção ou do elemento da construção que se pretende estudar. No caso do presente projeto, as alturas de referência a adotar para efeitos de contabilização da ação do vento da estrutura são as indicadas na figura 6.9.

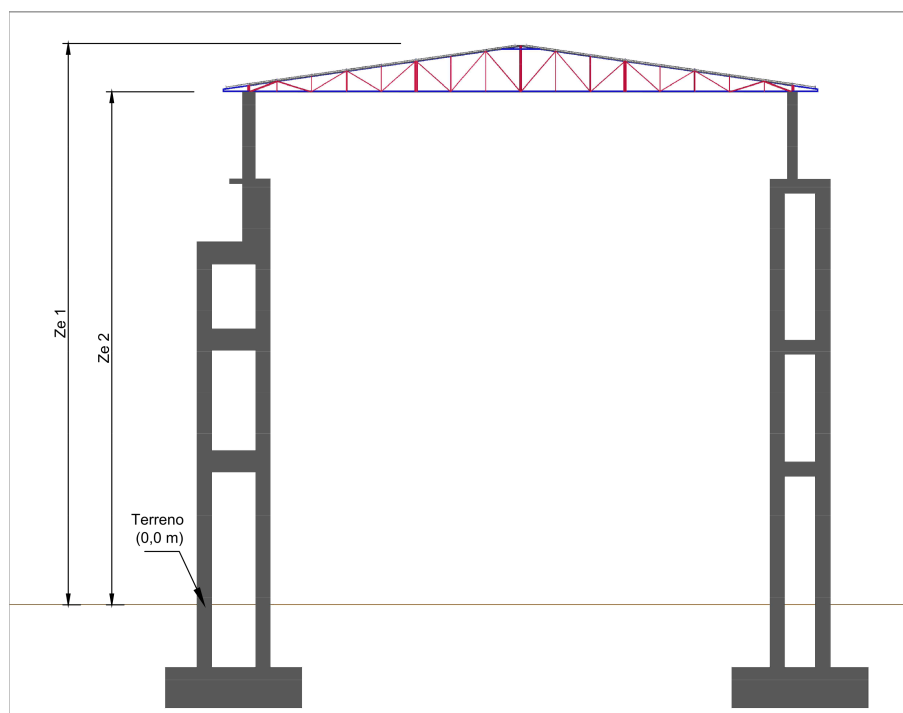


Figura 4.2 Alturas de referência.

2. Cálculo do valor de referência da velocidade do vento, v_b .

Este parâmetro pode ser determinado a partir de:

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} \quad (4.12)$$

em que:

- c_{dir} coeficiente de direção;
- c_{season} coeficiente de sazão;
- $v_{b,0}$ valor básico da velocidade de referência do vento.

(a) **Valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$**

Para a quantificação deste parâmetro, considera-se o País dividido em duas zonas:

- Zona A - a generalidade do território exceto as regiões pertencentes à zona B;
- Zona B - os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.

O zonamento definido no EC1-1-4 encontra-se estipulado para os Países aderentes a esta mesma normativa. Como tal, torna-se evidente a necessidade de adaptar esse zonamento ao lugar, em Moçambique, onde o Hangar se localiza. De referir que o valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, em função da zona, pode ser determinado conforme a tabela 4.3, presente no EC1-1-4, no Anexo Nacional na cláusula NA-4.2(1)P, Nota2.

Tabela 4.3 Valor básico da velocidade de referência do vento.

Zona	$v_{b,0}$ (m/s)
A	27
B	30

(b) **Coefficiente de direção, c_{dir}**

De acordo com o descrito em Anexo Nacional na cláusula NA-4.2(2)P, Nota2 do EC1-1-4, o valor a adotar para o coeficiente de direção é geralmente igual a 1,0, salvo em situações às quais estejam associadas uma direção particular e que a esta correspondam velocidades claramente inferiores às máximas no local. Nestes casos, pode ser considerada uma redução na velocidade de referência, mas limitada a 15 % do seu valor básico, ou seja, $c_{dir} \geq 0,85$.

(c) **Coefficiente de sazão, c_{season}**

Tendo em conta o descrito em Anexo Nacional na cláusula NA- 4.2(2)P, Nota 3 do EC1-1-4, o valor a adotar para o coeficiente de sazão, c_{season} , pode ser considerado igual a 1,0.

3. **Coefficiente de rugosidade, $c_r(z_e)$**

O coeficiente de rugosidade tem em conta a variação da velocidade média do vento no local da construção, em função da altura acima do nível do solo (z_e) e da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direção considerada. O seu valor pode ser calculado a partir de:

$$\begin{aligned} c_r(z_e) &= k_r \times \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) && \text{para } z_{min} \leq z_e \leq 200 \\ c_r(z_e) &= c_r(z_{min}) && \text{para } z_e \leq z_{min} \end{aligned} \quad (4.13)$$

em que:

- k_r coeficiente de terreno;
- z_0 comprimento de rugosidade;
- z_{min} altura mínima.

(a) **Comprimento de rugosidade, z_0 e altura mínima, z_{min}**

O comprimento de rugosidade e a altura mínima são parâmetros que dependem da categoria de terreno no local de construção. Deste modo, de forma a quantificar estes dois parâmetros, o EC1-1-4 define quatro categorias que estão relacionadas com a presença de obstáculos no terreno e que, naturalmente, alteram o perfil de velocidades do fluido em movimento. Destacam-se as seguintes categorias:

- Categoria I - Zona costeira exposta aos ventos de mar;
- Categoria II - Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura;
- Categoria III - Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes);
- Categoria IV - Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m.

Através das indicações na figura 4.3 é possível obter uma melhor percepção sobre cada uma das categorias de terreno.

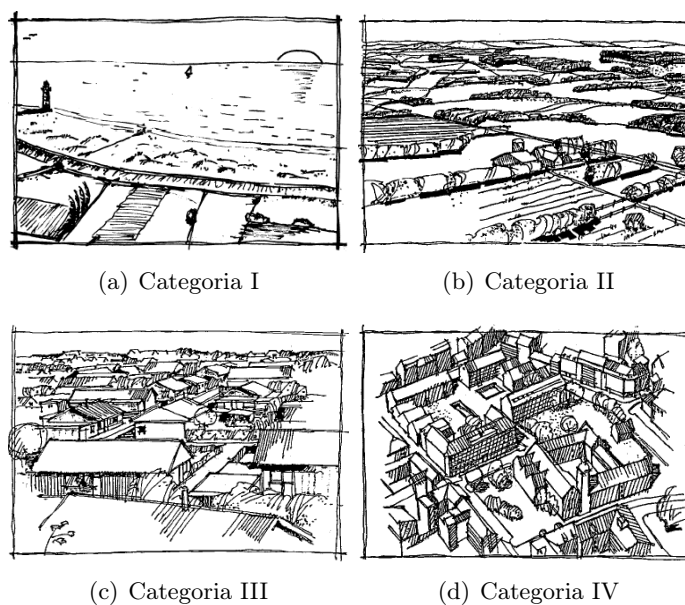


Figura 4.3 Categorias de terreno.

Os valores recomendados para z_0 e z_{min} , em função da categoria de terreno podem ser consultados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Os valores recomendados para z_0 e z_{min} .

Categoria de Terreno	z_0	z_{min}
I	0,005	1
II	0,05	3
III	0,3	8
IV	1	15

(b) **Coefficiente de terreno, k_r**

O coeficiente de terreno é calculado com recurso à expressão:

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4.14)$$

em que:

$z_{0,II}$ comprimento de rugosidade para uma categoria de terreno II.

4. **Coefficiente de orografia, c_o**

De modo geral, atribui-se valor unitário ao coeficiente de orografia. Contudo, nos casos em que a presença de colinas e falésias signifique um aumento em mais de 5 % da velocidade do vento, os efeitos da orografia deverão ser contabilizados com base no procedimento descrito no Anexo A.3 do EC1-1-4.

Intensidade de turbulência

A intensidade de turbulência é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, e é calculada por:

$$I_v(z_e) = \frac{\sigma_v}{v_m(z_e)} = \frac{k_I}{c_o(z) \times \ln(z_e/z_0)} \quad \text{para } z_{min} \leq z_e \leq 200 \quad (4.15)$$

$$I_v(z_e) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z_e \leq z_{min}$$

em que:

σ_v desvio padrão da turbulência do vento ;

k_I coeficiente de turbulência (considerado igual a 1,0).

Por sua vez o desvio padrão da turbulência do vento é determinado pela equação 4.16:

$$\sigma_v = k_r \times v_b \times k_I \quad (4.16)$$

Pressões exercidas sobre as superfícies

A pressão exercida numa determinada superfície resulta da diferença de pressões que atuam sobre as faces opostas de uma parede, cobertura ou elemento de construção. Na contabilização da pressão resultante deve-se ter em conta os seus sinais, sendo que as pressões exercidas contra uma superfície são consideradas positivas (sobrepessão), enquanto que, as pressões que atuam em sentido contrário são consideradas negativas (sucção), tal como se mostra nos exemplos presentes na figura 4.4.

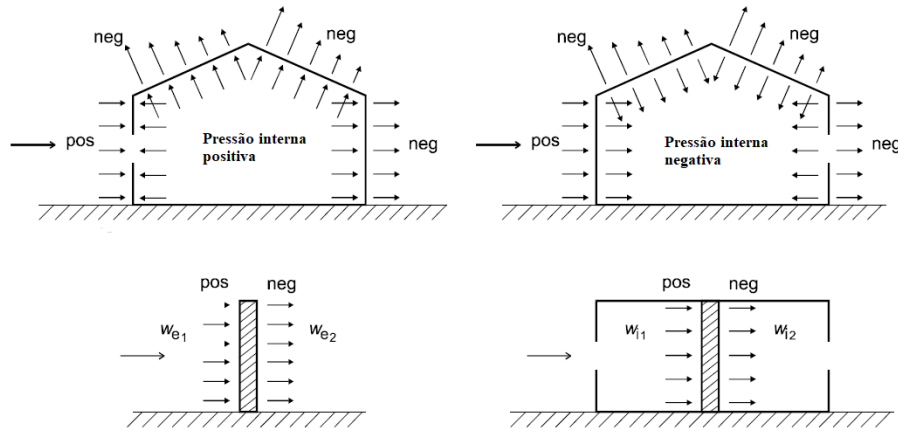


Figura 4.4 Pressões exercidas sobre superfícies.

A pressão exercida sobre as superfícies exteriores, w_e , pode ser determinada pela equação 4.17:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (4.17)$$

em que:

- $q_p(z_e)$ Pressão dinâmica de pico à altura de referência z_e ;
- z_e Altura de referência exterior;
- c_{pe} Coeficiente de pressão exterior.

A pressão exercida sobre as superfícies interiores de uma construção, w_i , calcula-se com recurso a:

$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (4.18)$$

em que:

- $q_p(z_i)$ pressão dinâmica de pico à altura de referência z_i ;
- z_i altura de referência interior;
- c_{pi} coeficiente de pressão interior.

Coeficientes de pressão exterior, interior e de atrito

Os coeficientes de pressão têm em consideração o efeito do vento sobre as superfícies dos edifícios e dividem-se em coeficientes de pressão exterior e em coeficientes de pressão interior.

Coeficientes de pressão exterior

Os coeficientes de pressão exterior, c_{pe} , dependem das dimensões da área carregada, A , e são calculados através de coeficientes locais, $c_{pe,1}$, e de coeficientes globais, $c_{pe,10}$. Os valores de $c_{pe,1}$, são definidos para o cálculo de elementos de pequena dimensão e de ligações com uma área igual ou inferior a $1m^2$. Os valores de $c_{pe,10}$ são definidos para superfícies carregadas com área superior a $10m^2$.

Quando a superfície carregada tem uma área compreendida entre $1m^2$ e $10m^2$, o procedimento recomendado pelo EC1-1-4 consiste na aplicação da interpolação apresentada na equação 4.19.

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \times \log_{10} A \quad (4.19)$$

Neste projeto, consideraram-se coeficientes de pressão exterior distintos, consoante o elemento da construção. Neste sentido, foram definidos coeficientes de pressão exterior para as paredes do hangar e para a cobertura.

1. Determinação dos coeficientes de pressão exterior nas paredes do hangar

A determinação dos valores de c_{pe} em paredes baseou-se na aplicação do procedimento recomendado pelo EC1-1-4 para paredes verticais de edifícios de planta retangular.

A altura de referência, z_e , nas paredes verticais depende da relação h/b , em que h corresponde à altura das paredes e b corresponde à largura do edifício na direção perpendicular ao vento.

Na determinação da altura de referência devem ser considerados os três casos seguintes:

- Caso 1 - Quando um edifício tem uma altura h inferior a b deve considerar-se como tendo uma única parte. Neste caso, a altura de referência e o respetivo perfil de pressão dinâmica são os indicados na figura 4.5.

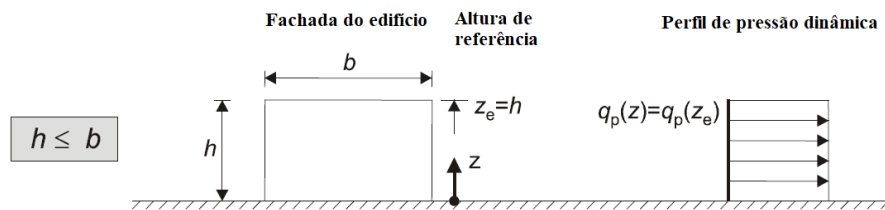


Figura 4.5 Caso 1 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.

- Caso 2 - Quando um edifício possui uma altura h superior a b mas inferior a $2b$, considera-se que o mesmo é constituído por duas partes, tal como se indica na figura 4.6.

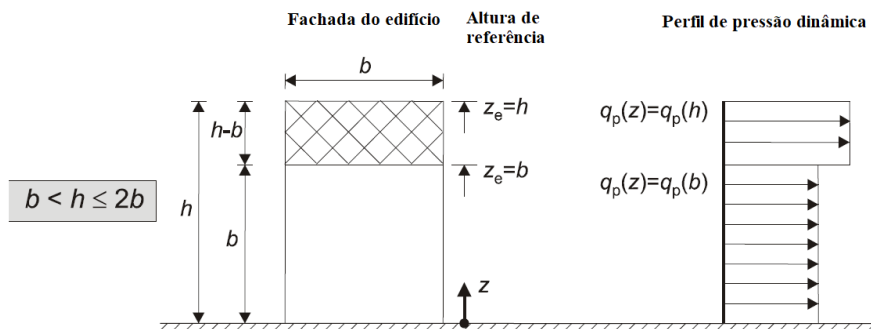


Figura 4.6 Caso 2 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.

- Caso 3 - No caso de um edifício possuir uma altura h superior a $2b$ considera-se que o mesmo é constituído por diversas partes, compreendendo: uma parte inferior que se prolonga desde o solo até uma altura igual a b ; uma parte superior que se estende desde o topo, numa altura igual a b ; e uma zona intermédia que pode ser dividida em faixas horizontais com uma altura igual a h_{strip} , conforme indicado na figura 4.7.

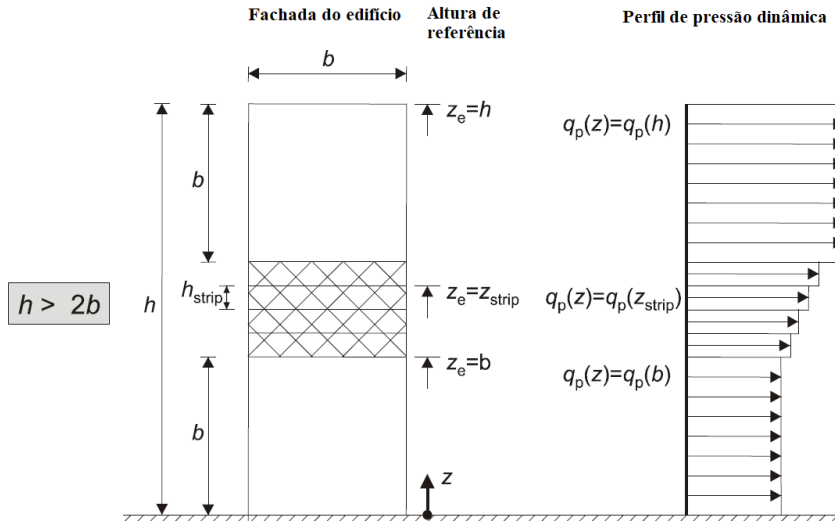


Figura 4.7 Caso 3 - Altura de referência e respetivo perfil de pressão dinâmica.

As paredes verticais podem ser divididas em cinco zonas (A, B, C, D e E), sendo que a zona D corresponde a parede de barlavento (de onde provém o vento) e a zona E corresponde a parede de sotavento (lado oposto). As dimensões das zonas A, B e C são definidas pelo parâmetro “e”, que é o menor valor entre b e $2h$. As zonas que se incluem em paredes verticais, em função do parâmetro “e”, encontram-se indicadas na figura 4.8.

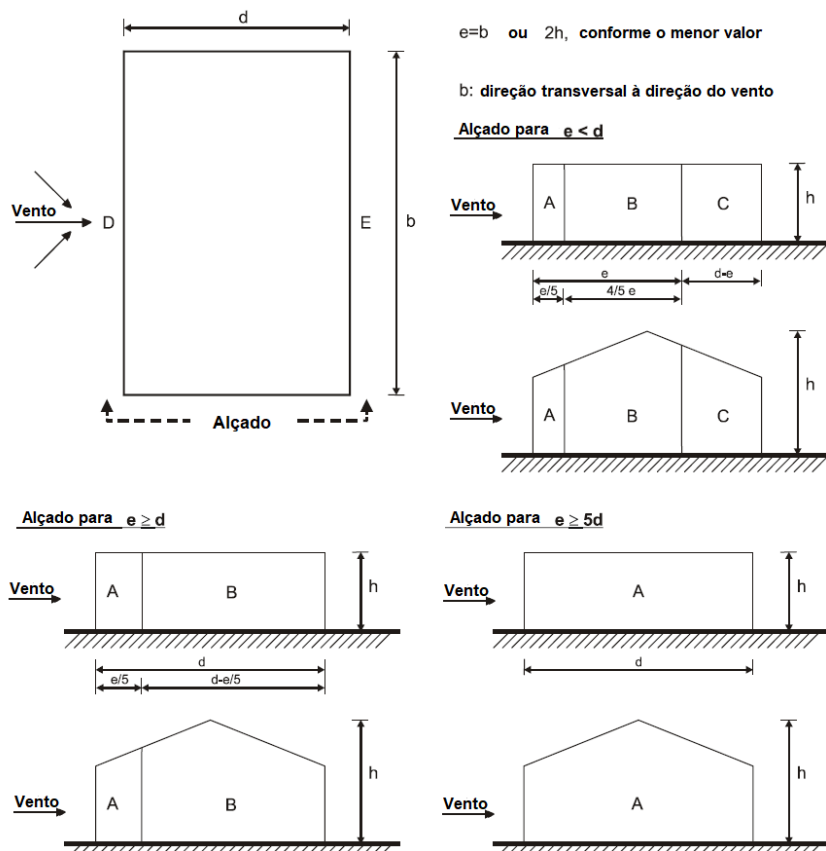


Figura 4.8 Zonas a considerar em paredes verticais.

Os valores recomendados de $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ para paredes verticais em função da relação h/b , constam no quadro indicado na figura 4.9. Para valores intermédios de h/b pode efetuar-se uma interpolação linear.

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Figura 4.9 Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais.

2. Determinação dos coeficientes de pressão exterior na cobertura do hangar

A determinação dos valores de c_{pe} considerados na cobertura do hangar baseou-se na aplicação do procedimento recomendado pelo EC1-1-4 para coberturas de duas vertentes.

Os valores de $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ neste tipo de coberturas variam conforme o ângulo de inclinação α e a zona da cobertura.

À semelhança do procedimento adotado na determinação dos coeficientes de pressão exteriores para paredes verticais, as dimensões das zonas da cobertura são igualmente definidas pelo parâmetro "e", sendo este o menor dos valores entre b e $2h$, em que b corresponde à largura do edifício na direção perpendicular ao vento, e h corresponde à altura, medida na vertical, desde a cota de soleira até à cumeeira. As zonas da cobertura e respetivas dimensões, segundo as direções x ($\theta = 0^\circ$) e y ($\theta = 90^\circ$), em função do parâmetro "e", encontram-se indicadas na figura 4.10.

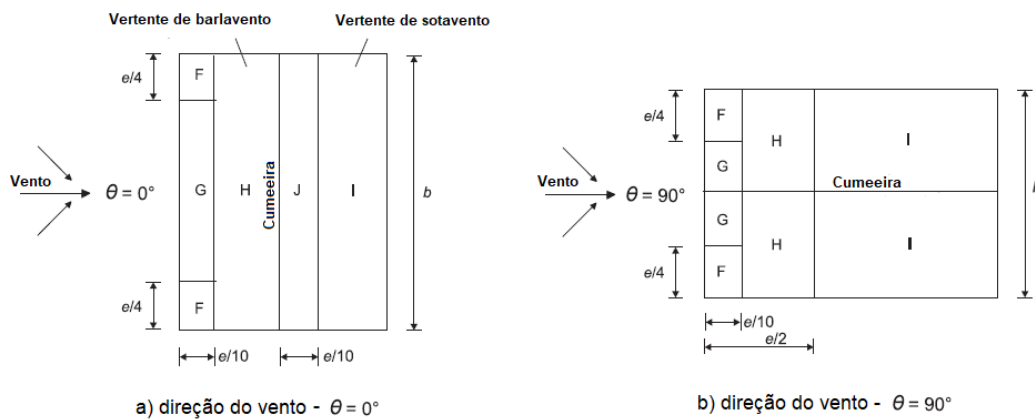


Figura 4.10 Zonas em coberturas de duas vertentes, segundo $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

Através das figuras 4.11 e 4.12 podem ser determinados, respetivamente, os valores de $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ para cada uma das zonas da cobertura, nas direções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, em função do ângulo de inclinação α .

Ângulo de inclinação α	Zona: Direcção do vento $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

NOTA 1 : Com $\theta = 0^\circ$ e para inclinações entre $\alpha = -5^\circ$ e $\alpha = +45^\circ$, a pressão varia rapidamente entre valores positivos e negativos na vertente virada a barlavento, razão pela qual são fornecidos valores positivos e negativos. Para estas coberturas deverão ser considerados quatro casos, em que os valores maiores ou menores em todas as áreas F, G e H são combinados com os valores maiores ou menores nas áreas I e J. Não é permitida a mistura, numa mesma vertente, de valores positivos com valores negativos.

NOTA 2: Para ângulos de inclinação intermédios entre ângulos com o mesmo sinal, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre valores com o mesmo sinal. (Não efectuar interpolação entre $\alpha = +5^\circ$ e $\alpha = -5^\circ$, mas antes utilizar os valores relativos às coberturas em terraço indicados em 7.2.3). Os valores iguais a 0,0 são fornecidos para efeitos de interpolação.

Figura 4.11 Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes segundo $\theta = 0^\circ$.

Ângulo de inclinação α	Zona: Direcção do vento $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2		-0,6
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2		-0,5
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2		-0,5
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2		-0,5
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0		-0,5
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0		-0,5

Figura 4.12 Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes segundo $\theta = 90^\circ$.

Coeficientes de pressão interior

O coeficiente de pressão interior c_{pi} depende da dimensão e da distribuição das aberturas na envolvente do edifício. Essas aberturas incluem aberturas de pequena dimensão, tais como janelas, ventiladores, chaminés, entre outras. Além disso, podem também existir permeabilidades secundárias associadas a passagens de ar no contorno de portas, janelas ou equipamentos instalados.

Para o cálculo do coeficiente de pressão interior deve ser efectuada uma análise por forma a averiguar a existência de faces do edifício que possam ser consideradas predominantes.

Uma face do edifício pode ser considerada como predominante quando a área das aberturas nessa face é igual a pelo menos o dobro da área das aberturas e de outras vias de passagem de ar nas restantes faces do edifício.

No caso de existir uma face predominante, o valor do coeficiente de pressão interior, pode ser calculado mediante as seguintes situações:

- Quando a área das aberturas na face predominante é igual ao dobro da área das aberturas nas restantes faces, o valor de c_{pi} deve ser calculado por:

$$c_{pi} = 0,75 \times c_{pe} \quad (4.20)$$

- Quando a área das aberturas na face predominante é igual a pelo menos três vezes a área das aberturas nas restantes faces, o valor de c_{pi} deve ser determinado através da expressão 4.21.

$$c_{pi} = 0,90 \times c_{pe} \quad (4.21)$$

em que c_{pe} é o valor do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante.

Nos casos em que não exista uma face predominante, o valor de c_{pi} deverá ser obtido com base na figura 4.13, em função da relação h/d e do índice de aberturas μ , para cada uma das direções do vento.

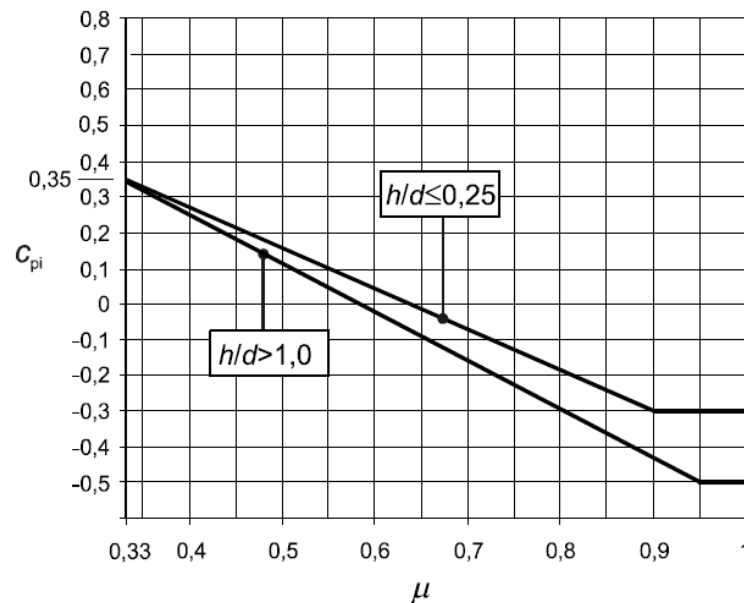


Figura 4.13 Coeficientes de pressão interior para edifícios sem face predominante.

O valor de μ é determinado a partir de:

$$\mu = \frac{\sum \text{área das aberturas em que } c_{pe} \text{ é negativo ou } -0,0}{\sum \text{área de todas as aberturas}} \quad (4.22)$$

Quando não seja possível calcular o valor do índice de aberturas, ou nos casos em que este cálculo não se considere justificado, o valor de c_{pi} a adotar deverá ser o mais gravoso dos valores compreendidos entre +0,2 e -0,3.

Coefficientes de atrito

Conforme anteriormente referido, sempre que as forças do vento F_w sejam determinadas por meio de pressões nas superfícies, como é o caso, há que determinar a componente relativa às forças de atrito nas superfícies exteriores F_{fr} . Para tal é necessário a determinação de coeficientes de atrito apropriados.

De acordo com a cláusula 7.5 (2) do EC1-1-4 os valores recomendados dos coeficientes de atrito c_{fr} , a considerar para as paredes e cobertura do hangar encontram-se indicados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 Valores recomendados para os coeficientes de atrito.

Superfície	Exemplos	Coef. de atrito c_{fr}
Lisa	Aço, betão liso	0,01
Rugosa	Betão rugoso, placas betumadas	0,02
Muito rugosa	Superf. com ondulações, nervuras, dobras	0,04

Coefficiente estrutural

O coeficiente estrutural $C_s C_d$ procura a integração na contabilização das forças exercidas pelo vento F_w , de uma componente redutora, resultante da não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície (C_s), e de uma componente amplificadora, derivada do efeito das vibrações da estrutura devidas à turbulência (C_d). O coeficiente estrutural pode ser calculado através do produto do coeficiente de dimensão C_s (componente redutora) pelo coeficiente dinâmico C_d (componente amplificadora).

Segundo a cláusula 6.2 (1) do EC1-1-4 existem certos casos onde o coeficiente estrutural pode assumir o valor unitário. Os casos envolvidos pela norma são os seguintes:

- Edifícios de altura inferior a 15 m;
- Elementos de fachada e de cobertura cuja frequência própria seja superior a 5 Hz;
- Edifícios de estrutura porticada que contenham paredes resistentes e cuja altura seja inferior a 100 m e a 4 vezes a dimensão do edifício na direção do vento;
- Chaminés de secções transversais circulares e com uma altura inferior a 60 m e a 6,5 vezes o seu diâmetro.

Caso as características da estrutura em causa não se identifiquem com as situações acima enunciadas, recomenda-se para o cálculo de $C_s C_d$, o procedimento descrito na cláusula 6.3.1 do EC1-1-4, em que:

- $C_s C_d$ é dado pela expressão 4.23;

$$C_s C_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (4.23)$$

onde:

- k_p fator de pico;
- z_s altura de referência para determinação do coeficiente estrutural;
- I_v intensidade de turbulência;
- B^2 coeficiente de resposta quase-estática;
- R^2 coeficiente de resposta em ressonância.

- O coeficiente de dimensão (C_s) é determinado por:

$$C_s = \frac{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (4.24)$$

- O coeficiente dinâmico (C_d) pode ser calculado a partir de:

$$C_s = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} \quad (4.25)$$

- A construção deve corresponder a uma das formas gerais representadas na figura 4.14.

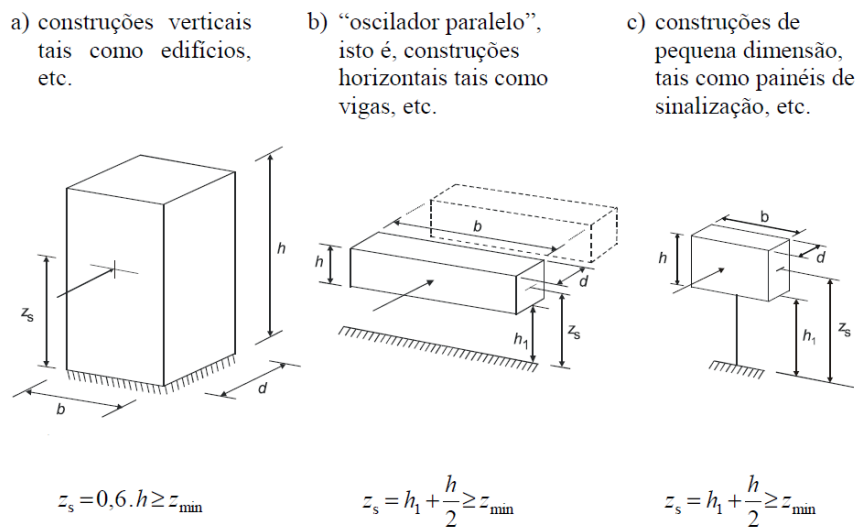


Figura 4.14 Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo.

- Só são significativas as vibrações na direção do vento segundo o modo fundamental, sendo que a configuração deste modo tem um sinal constante.

Nota: caso as condições apresentadas na cláusula 6.3.1 do EC1-1-4 sejam respeitadas, aplica-se o procedimento 1, presente no Anexo B do EC1-1-4, para a determinação de todos os parâmetros necessários ao cálculo do coeficiente estrutural.

Este procedimento baseia-se na determinação dos seguintes parâmetros:

1. Determinação do coeficiente de resposta quase-estática, B^2

O coeficiente de resposta quase-estática traduz a falta de correlação das pressões na superfície da construção e pode ser calculado através da equação 4.26.

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (4.26)$$

em que:

- b largura da construção;
- h altura da construção;
- $L(z_s)$ escala de turbulência à altura de referência z_s .

(a) Escala de turbulência $L(z_s)$

A escala de turbulência $L(z_s)$ representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural. Para alturas z inferiores a 200 m este parâmetro pode ser determinado através da expressão 4.27:

$$\begin{aligned} L(z_s) &= L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha & \text{para } z \geq z_{min} \\ L(z_s) &= L(z_{min}) & \text{para } z < z_{min} \end{aligned} \quad (4.27)$$

onde:

- z_t altura de referência de valor igual a 200 m;
- L_t escala de referência de valor igual a 300 m;
- α variável adimensional calculada através da expressão 4.28.

em que:

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln z_0 \quad (4.28)$$

2. Determinação do coeficiente de resposta em ressonância R^2

O coeficiente de resposta em ressonância considera o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração da estrutura e é calculado pela equação 4.29.

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (4.29)$$

em que:

- S_L função de densidade espectral de potência adimensional;
- R_h, R_b funções de admitância aerodinâmica;
- δ decremento logarítmico total de amortecimento.

(a) Função de densidade espectral de potência adimensional S_L ;

A distribuição da energia do vento em frequência é expressa pela função de densidade espectral de potência adimensional $S_L(z_s, n_{1,x})$, e é determinada a partir da equação:

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x}))^{5/3}} \quad (4.30)$$

em que $f_L(z_s, n_{1,x})$ é obtido pela expressão 4.31, sendo $n_{1,x}$ a frequência própria da estrutura em Hz e $v_m(z_s)$ a velocidade média do vento.

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad (4.31)$$

(b) Funções de admitância aerodinâmica R_h, R_b

As funções de admitância aerodinâmica R_h e R_b podem ser estimadas a partir das equações 4.32 e 4.33.

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad \text{com} \quad \eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (4.32)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) \quad \text{com} \quad \eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (4.33)$$

(c) Decremento logarítmico total de amortecimento δ

O decremento logarítmico total de amortecimento δ resulta da soma de três tipos de amortecimentos (δ_s , δ_a e δ_d):

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (4.34)$$

em que:

- δ_s decremento logarítmico de amortecimento estrutural;
- δ_a decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico;
- δ_d decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais.

Para a determinação destes três parâmetros recomenda-se o procedimento indicado no Anexo F.5 do EC1-1-4.

3. Determinação do fator de pico k_p

O fator de pico pode ser calculado pela expressão 4.35, tendo em conta o maior dos valores:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \quad \text{ou} \quad k_p = 3 \quad (4.35)$$

em que:

- ν frequência de passagens ascendentes;
- T duração de integração da velocidade média do vento, $T=600$ s.

(a) Frequência de passagens ascendentes ν

A frequência de passagens ascendentes pode ser obtida a partir das expressões.

$$\begin{aligned} L(z_s) &= L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha & \text{para } z \geq z_{min} \\ L(z_s) &= L(z_{min}) & \text{para } z < z_{min} \end{aligned} \quad (4.36)$$

4.2.4 Ação Sísmica

Durante a ocorrência dos sismos geram-se ondas de energia que se propagam a grande velocidade provocando vibrações na crosta terrestre. Essas vibrações são transmitidas às estruturas existentes, gerando movimentos na base das mesmas, capazes de induzir em altura forças de inércia resultantes do movimento da massa das estruturas.

A ação sísmica é quantificada nos países da comunidade europeia através da aplicação da normativa NP EN 1998-1 que foi também adaptada a Moçambique. De acordo com a cláusula 2.1 do EC8-1 o emprego desta norma permite dimensionar as estruturas de modo a não colapsarem parcial ou totalmente nos Estados Limites Últimos, e minimizarem-se os danos para os Estados Limites de Utilização.

A determinação desta ação tem por base uma metodologia linear que estabelece que os efeitos do sismo numa determinada estrutura podem ser estimados por meio de uma análise modal por espectros de resposta. Este método considera que todos os modos de vibração que contribuam significativamente para a resposta global da estrutura devem ser considerados. Neste sentido, é necessário salvaguardar que pelo menos uma das seguintes condições seja verificada:

- A soma das massas dos modos de vibração considerados deve corresponder a pelo menos 90% da massa total da estrutura;
- Todos os modos de vibração com massas superiores a 5% da massa total da estrutura devem ser considerados.

A quantificação da ação sísmica pode definir-se a partir de espectros de resposta elástica $S_e(T)$, por forma a representar o comportamento linear de uma estrutura, quando solicitada por uma determinada ação sísmica. Não obstante, uma análise em regime linear desconsidera a capacidade que as estruturas têm para resistir à ação sísmica em regime não linear. Esta capacidade advém do comportamento dúctil dos elementos estruturais, e deve ser introduzida na quantificação da ação sísmica, por forma a simular a resposta não linear de uma estrutura que, na verdade, apresenta resultados mais próximos da realidade quando comparados com os resultados obtidos numa análise linear.

A resposta não linear da estrutura pode ser definida através de um espectro de cálculo, $S_d(T)$, em que se inclui o coeficiente de comportamento, q , associado à classe de ductilidade da estrutura, obtendo-se assim, a resposta da estrutura tendo em conta a sua capacidade de dissipar energia.

Em termos regulamentares, a representação da ação sísmica surge no EC8-1 associada a dois tipos de ação sísmica, às quais correspondem distintas configurações espectrais. Os dois tipos de ação sísmica apontados pela referida regulamentação são os seguintes:

- Ação sísmica tipo 1 - sismo com epicentro entre as placas tectónicas Africana e Euro-Asiática caracterizado por uma magnitude elevada, maior duração, baixa frequência e grande distância epicentral;
- Ação sísmica tipo 2 - sismo com epicentro em território nacional, de curta duração, magnitude moderada, alta frequência e pequena distância epicentral.

Quantificação da ação sísmica

A quantificação da ação sísmica consiste na elaboração de um espectro de resposta elástico e de um espectro de cálculo, relativo aos dois tipos de ação sísmica, sendo que, para efeitos de projeto se considera o espectro de cálculo, uma vez que para além de apresentar resultados mais exatos, conduz ainda a um dimensionamento mais económico.

A determinação dos espectros referidos desenvolve-se de acordo com o procedimento descrito em seguida:

1. Determinação do tipo de terreno

As propriedades do solo de fundação influenciam diretamente a resposta da estrutura quando solicitada pelo sismo. Como tal, o EC8-1 define diferentes categorias de terreno consoante o tipo de solo onde a estrutura se encontra fundada. As categorias de terreno são as seguintes:

- Categoria A - Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície;
- Categoria B - Depósitos de areia muito compacta de seixo ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade;
- Categoria C - Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e "muitas" centenas de metros;
- Categoria D - Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média, ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole e dura;
- Categoria E - Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de ν_s do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $\nu_s > 800m/s$.

2. Valores recomendados dos parâmetros que descrevem o espectro de resposta elástica para a ação sísmica do tipo 1 e do tipo 2.

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores recomendados dos parâmetros que definem os espectros de resposta para os sismos tipo 1 e tipo 2 em cada categoria de terreno.

Tabela 4.6 Parâmetros dos espectros de resposta para a ação sísmica tipo 1.

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

Tabela 4.7 Parâmetros dos espectros de resposta para a ação sísmica tipo 2.

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

3. Zonamento sísmico

Considerando o descrito no anexo nacional N.A.I, o EC8-1 define o zonamento sísmico em Portugal Continental, para cada tipo de ação sísmica, de acordo com a figura 4.15.

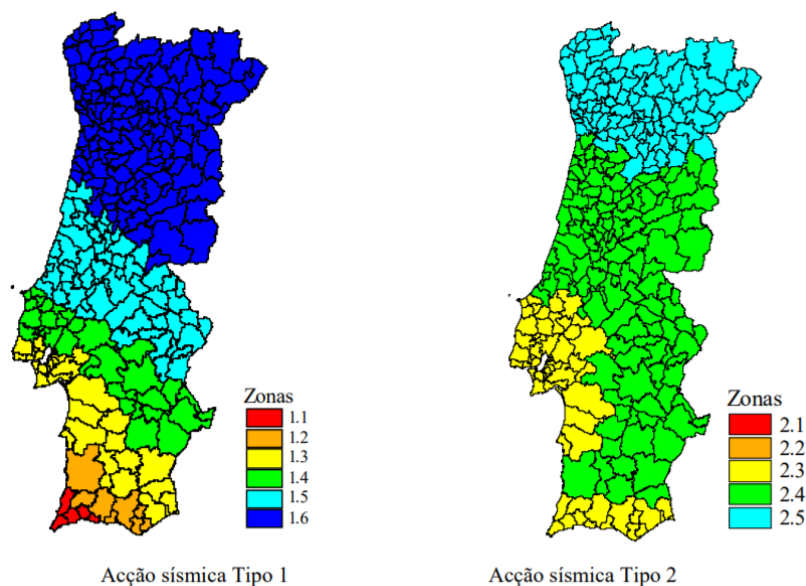


Figura 4.15 Zonamento sísmico em Portugal Continental

Tendo em consideração que um dos principais objetivos do presente trabalho consiste na adaptação dos Eurocódigos Estruturais ao local onde se encontra o edificado, estabelece-se, por analogia, um local do território nacional semelhante à zona onde o hangar se encontra.

Por forma a que o referido pressuposto seja satisfeito, considera-se que o edificado se encontra na zona de Loulé. A tabela 4.8 indica, em função das várias zonas sísmicas, os valores recomendados para a aceleração máxima de referência a_{gR} .

Tabela 4.8 Aceleração máxima de referência para os dois tipos de ação sísmica.

Acção sísmica tipo 1		Acção sísmica tipo 2	
Zona sísmica	$a_{gR}(m/s^2)$	Zona sísmica	$a_{gR}(m/s^2)$
1.1	2,5	2.1	2,5
1.2	2,0	2.2	2
1.3	1,5	2.3	1,7
1.4	1,0	2.4	1,1
1.5	0,6	2.5	0,8
1.6	0,35	-	-

4. Classe de importância

Em caso de ruína parcial ou total, o EC8-1 estabelece quatro classes de importância a atribuir às estruturas em função dos seguintes critérios:

- Perda de vidas humanas;
- Importância para a segurança pública e para a proteção civil imediatamente após o sismo;
- Consequências sociais e económicas do colapso.

As classes de importância a considerar para a contabilização da ação sísmica são as seguintes:

- Classe I - Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc;
- Classe II - Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias;
- Classe III - Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, tais como escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc;
- Classe IV - Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a proteção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais elétricas, etc.

5. Coeficiente de importância, γ_I

A cada classe de importância corresponde um determinado coeficiente de importância, γ_I , cujos valores recomendados podem ser consultados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 Valores dos coeficientes de importância recomendados.

Classe de Importância	Ação sísmica Tipo 1	Ação sísmica Tipo 2 - Continente	Ação sísmica Tipo 2 - Açores
I	0,65	0,75	0,8
II	1,0	1,0	1,0
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,5	1,35

6. Valor de cálculo da aceleração à superfície para um solo do tipo A, a_g

O valor de cálculo da aceleração à superfície para um solo do tipo A é determinado através do produto do valor de referência da aceleração máxima à superfície, pelo respetivo coeficiente de importância, ou seja, através da expressão:

$$a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I \quad (4.37)$$

7. Coeficiente de solo, S

O coeficiente de solo pode ser determinado recorrendo à equação 4.38:

$$\begin{aligned}
 S &= S_{max} && \text{se } a_g \leq 1m/s^2 \\
 S &= S_{max} - \frac{S_{max} - 1}{3}(a_g - 1) && \text{se } 1m/s^2 < a_g < 4m/s^2 \\
 S &= 1,0 && \text{se } a_g \geq 4m/s^2
 \end{aligned} \quad (4.38)$$

8. Coeficiente de correção do amortecimento, η

O valor do coeficiente de correção do amortecimento determina-se a partir da expressão:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0,55 \quad (4.39)$$

em que:

η amortecimento viscoso, expresso em percentagem, sendo o valor recomendado 5 %.

9. Espectro de resposta elástica horizontal, $S_e(T)$

Uma vez determinados todos os parâmetros necessários para a construção do espectro de resposta elástica, este é definido a partir das equações 4.40 a 4.43:

$$0 \leq T \leq T_B \quad : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (4.40)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (4.41)$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (4.42)$$

$$T_D \leq T \leq 4s \quad : \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (4.43)$$

em que:

$S_e(T)$	espectro de resposta elástico horizontal;
T	período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade;
a_g	valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno no tipo A;
T_B	limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;
T_C	limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;
T_D	valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;
S	coeficiente de solo ;
η	coeficiente de correção do amortecimento.

A figura 4.16 mostra a forma expectável de um espectro de resposta elástico.

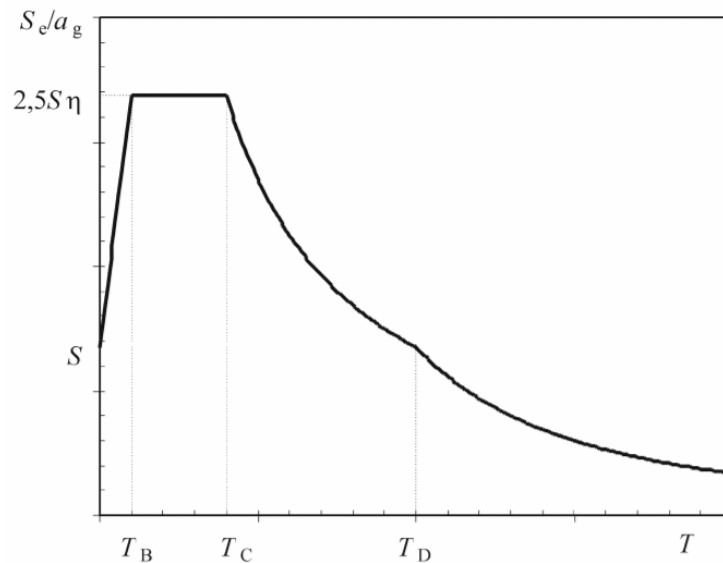


Figura 4.16 Forma do espectro de resposta elástico.

10. Classes de ductilidade

Como anteriormente referido o projeto de estruturas resistentes à ação sísmica, de acordo com o EC8-1, tem em consideração a capacidade das estruturas para dissipar a energia proveniente do sismo, fundamentando, para o efeito, que essa mesma capacidade se encontra relacionada com a classe de ductilidade da estrutura. Neste sentido, definem-se três classes de ductilidade (DCL, DCM e DCH) cujas características se encontram descritas em seguida:

- Classe de ductilidade baixa (DCL) - classe em que a resposta da estrutura ocorre predominantemente em regime elástico devido à fraca capacidade de dissipação de energia por parte dos seus elementos estruturais;
- Classe de ductilidade média (DCM) - classe de ductilidade associada a estruturas com boa capacidade de dissipação de energia e cuja resposta ocorre em regime elasto-plástico. O comportamento dúctil dos seus elementos estruturais é assegurado por um conjunto de prescrições de dimensionamento e pormenorização;
- Classe de ductilidade alta (DCH) - classe de ductilidade com maior grau de plasticidade que a classe anterior, em que o comportamento dúctil dos seus elementos estruturais é garantido por um conjunto requisitos mais rigorosos.

11. Coeficiente de comportamento, q

O coeficiente de comportamento encontra-se associado à classe de ductilidade em que o edifício se insere, e é o parâmetro responsável por estabelecer o compromisso entre a resistência e a capacidade de dissipação de energia da estrutura. Neste caso, considerou-se que a estrutura apresenta “Comportamento estrutural de baixa dissipação” conduzindo, assim, a um coeficiente de comportamento q igual a 1,5 para um amortecimento viscoso de 5%.

12. Espectro de cálculo horizontal, $S_d(T)$

O espectro de cálculo horizontal é definido a partir das equações 4.44 a 4.47:

$$0 \leq T \leq T_B \quad : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (4.44)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (4.45)$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad : \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (4.46)$$

$$T_D \leq T \quad : \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (4.47)$$

em que:

- $S_d(T)$ espectro de resposta de cálculo horizontal;
- q coeficiente de comportamento;
- β coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de cálculo horizontal.

4.2.5 Equipamentos mecânicos - Ponte Rolante

A movimentação dos inertes no interior do hangar é feita não só com recurso a pás carregadoras, mas também, a uma ponte rolante tipo biviga cujos carris assentam em duas vigas metálicas com secção em caixão, que funcionam entre carris apoiados em vigas de betão de grande inércia, tal mostra a figura 4.17. Os eixos dos carris dos caminhos de rolamento correspondem aos alinhamentos B e F.

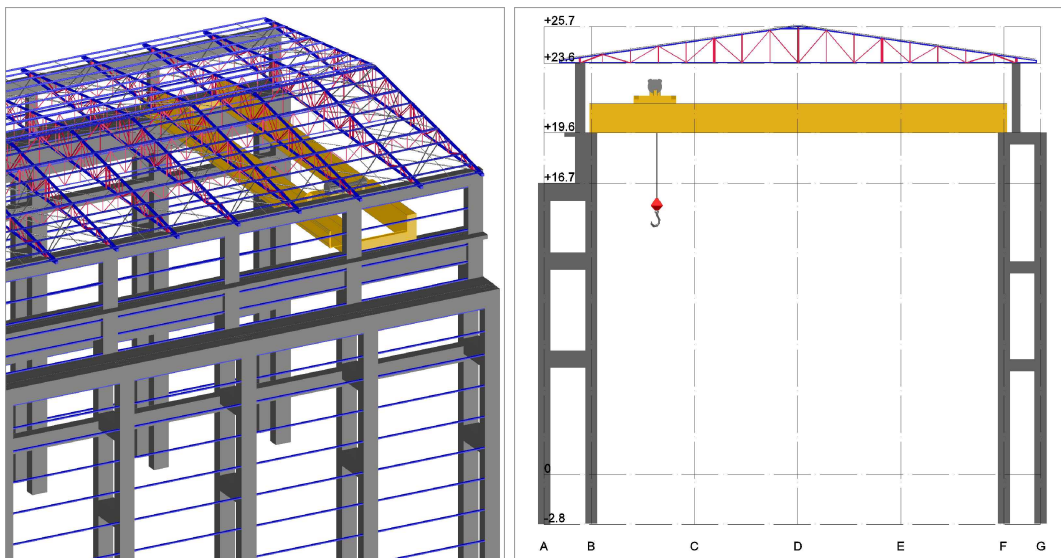


Figura 4.17 Ponte rolante.

O equipamento da ponte rolante representa uma das ações mais importantes pois tem a si associados elevados valores de cargas permanentes e sobrecargas.

As cargas permanentes resultam do peso próprio da estrutura da ponte rolante, dos equipamentos de elevação e dos carris, enquanto que as sobrecargas resultam do material transportado. Além disso, há ainda que considerar forças provenientes do funcionamento da ponte (cargas de frenagem e de lacete.)

Capítulo 5

Combinações de Ações

As combinações de ações são determinadas de acordo com a NP EN 1990 – Bases para o Projeto de Estruturas, que define os coeficientes parciais de segurança, γ , e os coeficientes reduzidos, ψ , para os estados limites últimos e de utilização.

Os Estados Limites Últimos (ELU) estão associados ao colapso ou a outras formas semelhantes de ruína estrutural que podem comprometer a segurança das pessoas e das estruturas.

Os Estados Limites de Utilização (ELS) são estados associados ao funcionamento da estrutura ou dos seus elementos estruturais em condições normais de utilização, incluindo também o conforto das pessoas e o aspeto da construção.

Nas combinações de ações correspondentes aos ELU e ELS a NP EN 1990 impõe a utilização de coeficientes reduzidos, ψ , associados às ações variáveis.

Os valores dos coeficientes reduzidos para cada ação variável encontram-se indicados na tabela 5.1 para o presente projeto.

Tabela 5.1 Valores reduzidos

Ação variável	ψ_0	ψ_1	ψ_2
SC Cobertura	0	0	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Vento	0,6	0,2	0
Ponte rolante	0,8	0,5	0,3

5.1 Estados Limites Últimos

Neste projeto consideram-se os seguintes estados limites últimos:

- STR - Rotura ou deformação excessiva da estrutura ou dos elementos estruturais;
- GEO - Rotura ou deformação excessiva do terreno em que as características resistentes do solo ou da rocha são significativas para a resistência da estrutura.

A verificação aos Estados Limites Últimos STR/GEO deve ser feita com base na condição 5.1:

$$E_d \leq R_d \quad (5.1)$$

em que:

E_d valor de cálculo do efeito das ações;

R_d valor de cálculo da resistência correspondente.

Os valores de cálculo do efeito das diversas ações podem ser determinados a partir da Combinação Fundamental (equação 5.2) e da Combinação Sísmica (equação 5.3).

• **Estados Limites Últimos - Combinação Fundamental**

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ “+” } \gamma_P P \text{ “+” } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ “+” } \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.2)$$

em que:

γ_G coeficientes parciais de segurança das ações permanentes;

$G_{k,j}$ ações permanentes;

γ_P coeficientes parciais de segurança das ações de pré-esforço;

P ação de pré-esforço;

γ_Q coeficientes parciais de segurança das ações variáveis;

$Q_{k,1}$ ação variável base;

$\psi_{0,i}$ coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;

$Q_{k,i}$ restantes ações variáveis;

“+” a combinar com.

• **Estados Limites Últimos - Combinação Sísmica**

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ “+” } P \text{ “+” } A_{Ed} \text{ “+” } \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.3)$$

em que:

$G_{k,j}$ ações permanentes;

P ação de pré-esforço;

A_{Ed} valor de cálculo de uma ação sísmica;

$\psi_{2,i}$ coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;

$Q_{k,i}$ restantes ações variáveis;

“+” a combinar com.

5.2 Estados Limites de Utilização

A verificação aos Estados Limites Últimos de Utilização deve ser feita a partir da condição 5.4.

$$E_d \leq C_d \quad (5.4)$$

em que:

E_d valor de cálculo do efeito das ações;

C_d valor de cálculo correspondente ao valor limite do critério de utilização.

Relativamente aos Estados Limites Últimos de Utilização considera-se que os efeitos das ações neste projeto são obtidos a partir da Combinação Característica descrita na equação 5.5.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ “+” } P \text{ “+” } Q_{k,1} \text{ “+” } \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.5)$$

em que:

$G_{k,j}$ ações permanentes;

P ação de pré-esforço;

$Q_{k,1}$ ação variável base;

$\psi_{0,i}$ coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;

$Q_{k,i}$ restantes ações variáveis;

“+” a combinar com.

Nota: Os quadros referentes às combinações de ações consideradas na elaboração deste projeto encontram-se apresentados no Anexo III.

Capítulo 6

Critérios Gerais de Dimensionamento

6.1 Elementos metálicos

A verificação da segurança dos elementos metálicos foi realizada a partir de uma folha de cálculo em Excel, desenvolvida a partir das expressões de dimensionamento de secções e elementos segundo a NP EN 1993-1-1:2010. Os resultados obtidos nos ficheiros de resultados dos *softwares* de cálculo (“SAP2000”, “LTBeamN” e “SemiComp+”) são analisados e comparados com os obtidos na folha de cálculo “Excel” como forma de validação.

A tabela 6.1 mostra os coeficientes parciais de segurança considerados no dimensionamento das secções e elementos, de acordo com a referida norma.

Tabela 6.1 Coeficientes Parciais de Segurança.

Coeficiente	Descrição	Valores
γ_{M0}	Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe.	1,0
γ_{M1}	Coeficiente parcial de segurança para a resistência de elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento.	1,0
γ_{M2}	Coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação.	1,25

Nos elementos metálicos o dimensionamento referente aos Estados Limites Últimos e aos Estados Limites de Utilização foi efetuado segundo os critérios seguintes:

- Estados Limites Últimos - Determinação da resistência das secções transversais, elementos (encurvadura) e ligações;
- Estados Limites de Utilização - Determinação dos limites admissíveis dos deslocamentos horizontais e verticais.

6.1.1 Estados Limites Últimos

As expressões de dimensionamento, definidas a partir da NP EN 1993-1-1:2010, referentes à resistência das secções e elementos constam dos fluxogramas das figuras seguintes.

Resistência das secções transversais

- Esforço Axial de Tração ($N > 0$)

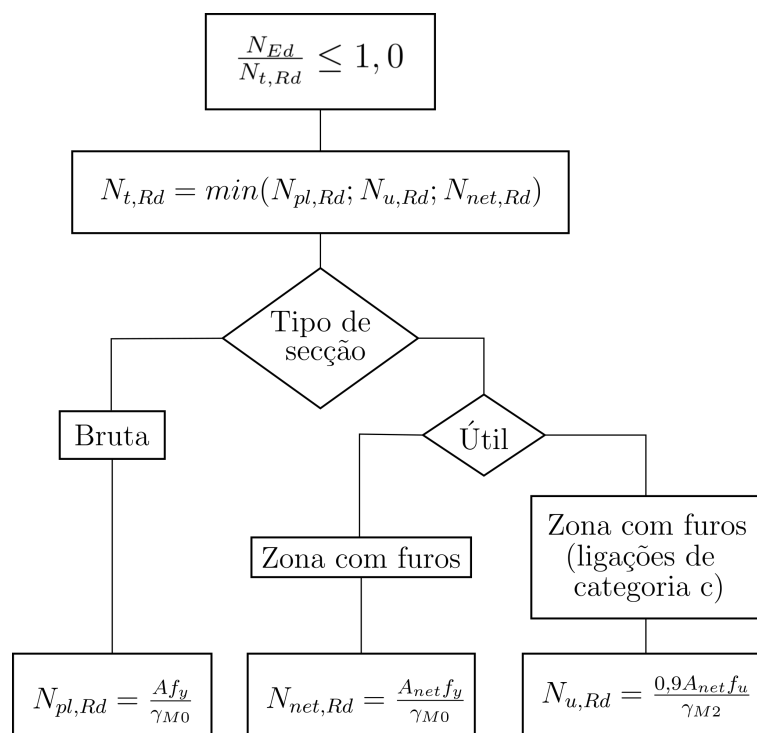


Figura 6.1 Fluxograma de dimensionamento de secções à tração.

Em que:

- N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de tração atuante de cálculo;
- $N_{t,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente de tração;
- $N_{pl,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta;
- $N_{u,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil;
- $N_{net,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de tração da secção transversal útil;
- $N_{u,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil;
- A área da secção transversal de um elemento;
- A_{net} área útil de uma secção transversal.

- Esforço Axial de Compressão ($N < 0$)

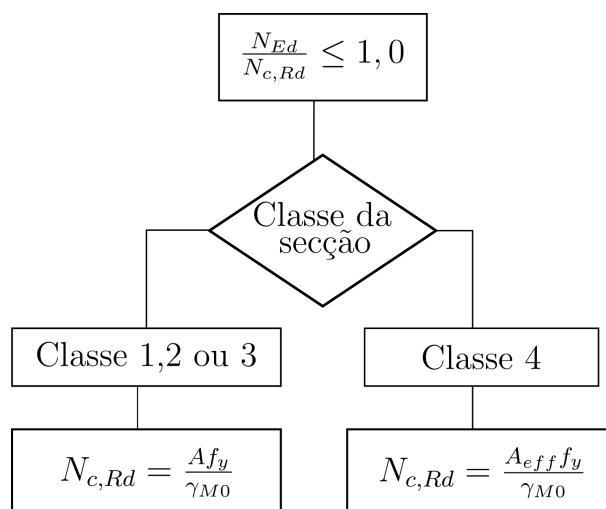


Figura 6.2 Fluxograma de dimensionamento de secções à compressão.

Em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de compressão atuante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente de compressão;

A área da secção transversal de um elemento;

A_{eff} área efetiva de uma secção da classe 4.

- Momento Fletor (M)

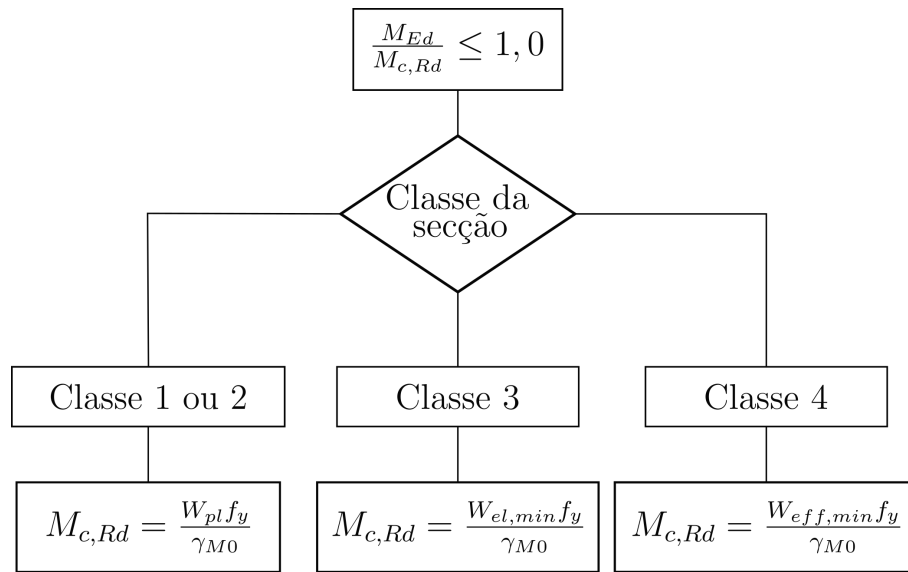


Figura 6.3 Fluxograma de dimensionamento de secções à flexão simples.

Em que:

- M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;
- $M_{c,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{pl,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{el,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente elástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- W_{pl} módulo de flexão plástico de uma secção transversal;
- $W_{el,min}$ módulo de flexão elástico mínimo de uma secção transversal;
- $W_{eff,min}$ módulo elástico de flexão efetivo mínimo.

- Esforço Transverso (V)

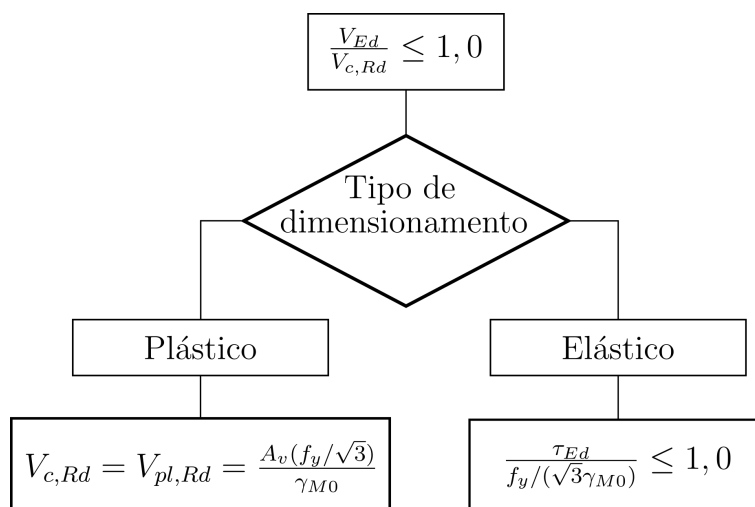


Figura 6.4 Fluxograma de dimensionamento de secções ao esforço transverso.

Em que:

V_{Ed} valor de cálculo do esforço transverso atuante;

$V_{c,Rd}$ valor de cálculo do esforço transverso resistente;

$V_{pl,Rd}$ valor de cálculo do esforço transverso plástico resistente;

A_v área resistente ao esforço transverso.

τ_{Ed} valor de cálculo da tensão tangencial máxima atuante.

• Flexão com Esforço Transverso (M+V)

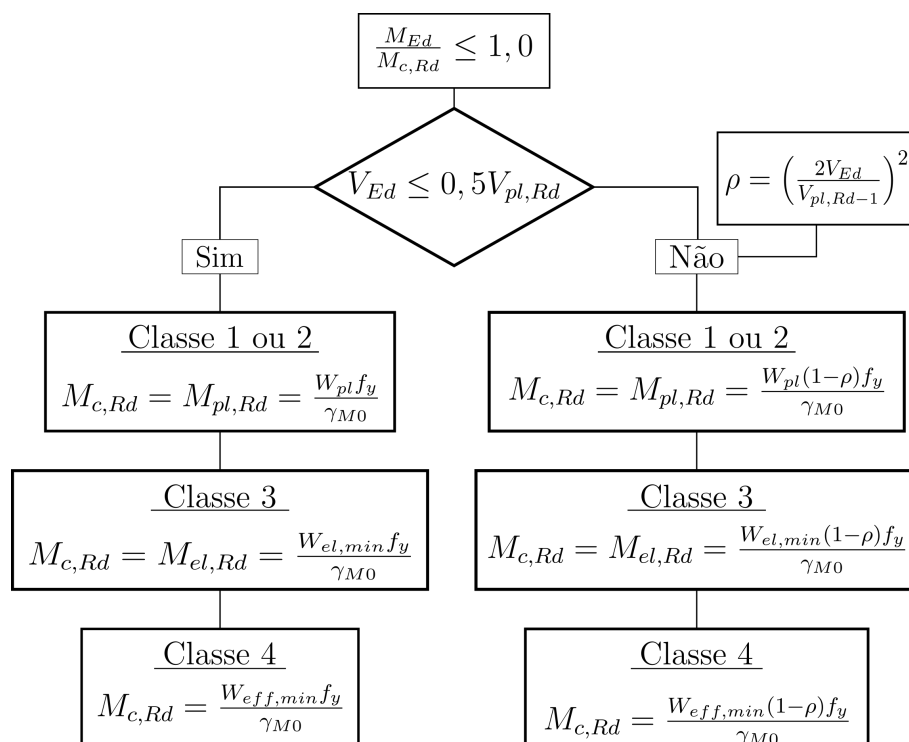


Figura 6.5 Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas a flexão com esforço transverso.

Em que:

- V_{Ed} valor de cálculo do esforço transverso atuante;
- $V_{pl,Rd}$ valor de cálculo do esforço transverso plástico resistente;
- M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;
- $M_{c,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{pl,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{el,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente elástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- W_{pl} módulo de flexão plástico de uma secção transversal;
- $W_{el,min}$ módulo de flexão elástico mínimo de uma secção transversal;
- $W_{eff,min}$ módulo elástico de flexão efetivo mínimo.

• Flexão Composta (M+N)

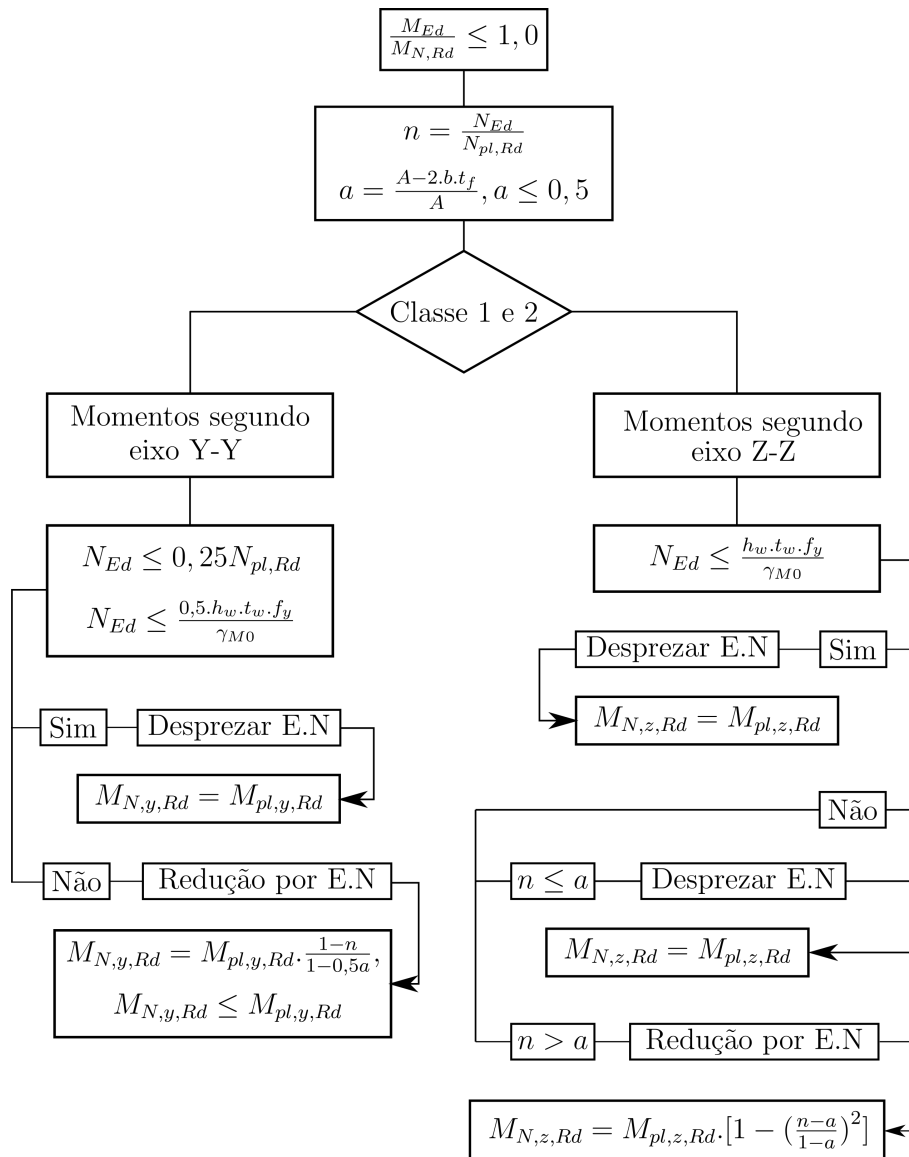


Figura 6.6 Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas à flexão com esforço axial.

Em que:

- M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;
- $M_{N,Rd}$ valores de cálculo dos momentos fletores resistentes reduzidos pela interação com o esforço normal;
- N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de tração atuante de cálculo;
- $N_{pl,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta;
- A área da secção transversal de um elemento;

b	largura da secção transversal;
t_f	espessura do banzo da secção;
h_w	altura da alma da secção;
t_w	espessura da alma da secção;
$M_{N,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com o esforço normal em relação ao eixo y-y;
$M_{N,z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com o esforço normal em relação ao eixo z-z;
$M_{pl,y,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico em relação ao eixo yy;
$M_{pl,z,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico em relação ao eixo zz.

• Flexão Composta com Esforço Transverso (M+N+V)

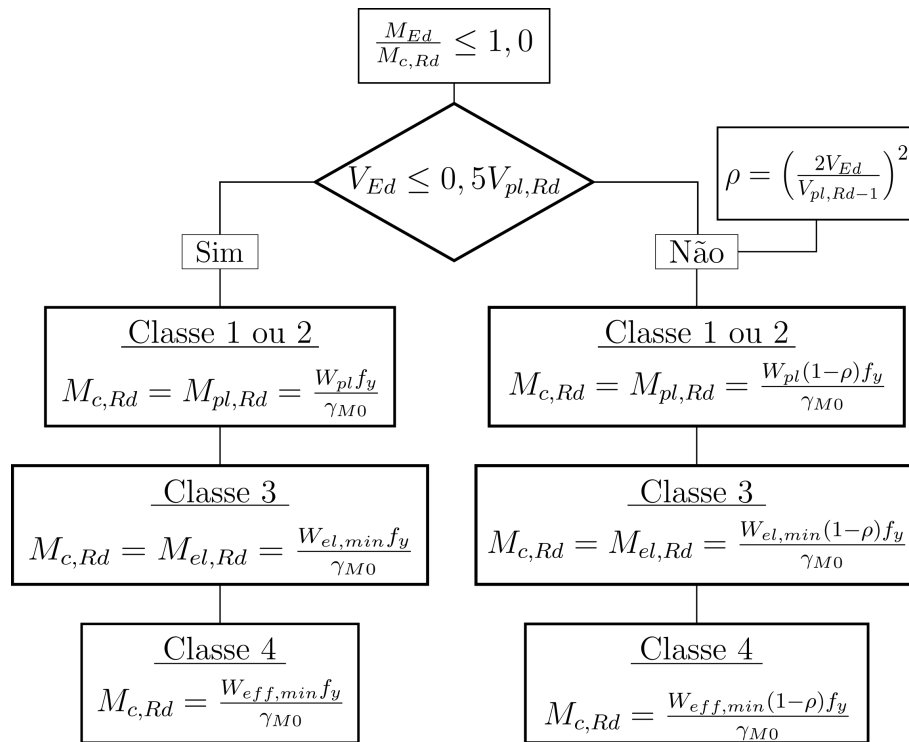


Figura 6.7 Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas a flexão com esforço transverso.

Em que:

- V_{Ed} valor de cálculo do esforço transverso atuante;
- $V_{pl,Rd}$ valor de cálculo do esforço transverso plástico resistente;
- M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;
- $M_{c,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{pl,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- $M_{el,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente elástico em relação a um eixo principal de uma secção transversal;
- W_{pl} módulo de flexão plástico de uma secção transversal;
- $W_{el,min}$ módulo de flexão elástico mínimo de uma secção transversal;
- $W_{eff,min}$ módulo elástico de flexão efetivo mínimo.

• Flexão Composta Desviada ($M_y + M_z + N$)

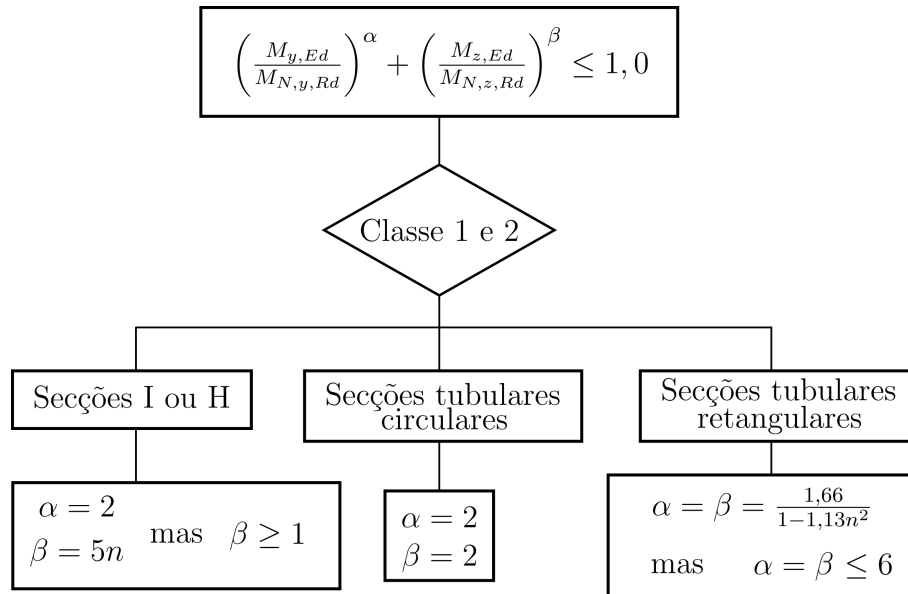


Figura 6.8 Fluxograma de dimensionamento de secções sujeitas à flexão desviada com esforço axial.

Nota: para outras secções α e β assumem o valor unitário.

Em que:

$M_{y,Ed}$ valor de cálculo do momento fletor atuante em relação ao eixo y-y da secção transversal;

$M_{z,Ed}$ valor de cálculo do momento fletor atuante em relação ao eixo z-z da secção transversal;

$M_{N,y,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com o esforço normal, em relação ao eixo y-y;

$M_{N,z,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente reduzido pela interação com o esforço normal, em relação ao eixo z-z;

α, β parâmetros que têm em consideração o efeito da flexão desviada e que variam em função do tipo de secção.

Resistência dos elementos à encurvadura (Colunas, Vigas e Colunas - Viga)

A encurvadura é um fenómeno de instabilidade que se caracteriza pela ocorrência de “grandes deformações transversais” em elementos sujeitos a esforços axiais (colunas), momentos fletores (vigas) e momentos fletores na presença de esforço axial (colunas-viga).

Devido à elevada resistência do aço, os elementos utilizados na construção metálica apresentam em geral esbeltezas elevadas, o que faz com que este fenómeno de instabilidade assumam particular importância no dimensionamento de estruturas metálicas.

• **Elementos Uniformes Comprimidos (Colunas)**

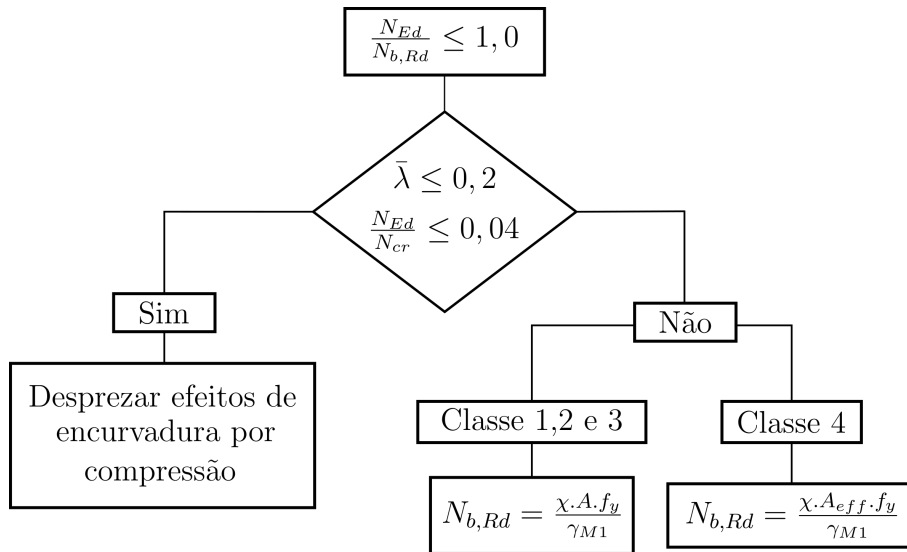


Figura 6.9 Fluxograma para a verificação da resistência à encurvadura de elementos comprimidos.

Com:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ mas } \chi \leq 1 \tag{6.1}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \tag{6.2}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A f_y / N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ para secções das classes 1, 2 ou 3} \tag{6.3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A_{eff} f_y / N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{\sqrt{A_{eff} / A}}{\lambda_1}, \text{ para secções da classe 4} \tag{6.4}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{E / f_y} = 93,9\epsilon \tag{6.5}$$

$$\epsilon = \sqrt{235 / f_y} \tag{6.6}$$

Em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de tração atuante de cálculo;

$N_{b,Rd}$ valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido;

$\bar{\lambda}$ esbelteza normalizada;

N_{cr} carga crítica elástica relativa ao plano mais condicionante para a encurvadura;

χ coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado;

A_{eff} área efetiva de uma secção transversal.

α fator de imperfeição associado à curva de encurvadura a adotar;

L_{cr} comprimento de encurvadura de um determinado elemento;

i raio de giração da secção para o eixo considerado.

• **Elementos Uniformes em Flexão (Vigas)**

O dimensionamento de elementos submetidos a flexão pode ser condicionado pela encurvadura lateral. Este fenómeno, designado por bambeamento, consiste na deformação lateral da parte comprimida de uma secção de um elemento sujeito a flexão em torno do eixo de maior inércia da secção, acompanhada pela torção das secções do elemento. Neste caso, a parte comprimida comporta-se como um elemento linear, continuamente restringido pela parte tracionada que, por seu lado, não apresenta tendência para se deslocar lateralmente.

A verificação da resistência dos elementos à encurvadura lateral é efetuada conforme o fluxograma apresentado na figura 6.10.

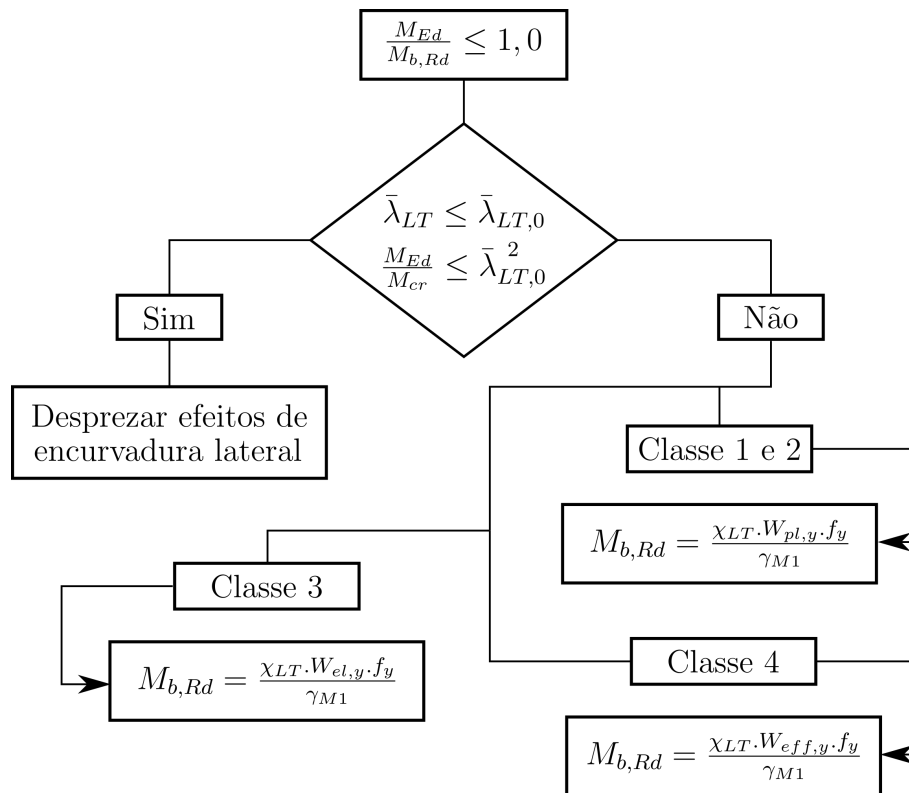


Figura 6.10 Fluxograma de verificação da resistência à encurvadura de elementos à flexão.

Com:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1 \tag{6.7}$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \tag{6.8}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}, \text{ para secções das classes 1 ou 2} \tag{6.9}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} f_y}{M_{cr}}}, \text{ para secções da classe 3} \tag{6.10}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} f_y}{M_{cr}}}, \quad \text{para secções da classe 4} \quad (6.11)$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_W}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g) \right\} (*) \quad (6.12)$$

Em que:

- $M_{b,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral por flexão-torção;
- $\bar{\lambda}_{LT}$ esbelteza normalizada para a encurvadura lateral;
- $\bar{\lambda}_{LT,0}$ comprimento do patamar das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes;
- χ_{LT} coeficiente de redução para a encurvadura lateral;
- $W_{pl,y}$ módulo de flexão plástico de uma secção transversal em relação ao eixo y-y;
- $W_{el,y}$ módulo de flexão elástico da secção transversal em relação ao eixo y-y;
- $W_{eff,y}$ módulo de flexão da secção transversal efetiva em relação ao eixo y-y;
- M_{cr} momento crítico elástico de encurvadura lateral;
- L comprimento entre secções da viga contraventadas lateralmente;
- C_1, C_2 coeficientes que dependem da forma do diagrama de momentos fletores e das condições de ligação da viga ao exterior;
- k_z fator referente às rotações nas secções extremas, em torno do eixo de menor inércia, e que pode assumir os valores de 0,5 (rotações impedidas), 0,7 (rotação livre numa extremidade e impedida na outra) e 1,0 (rotações livres em ambas as extremidades);
- k_w fator referente à restrição ao empenamento nas extremidades. Conservativamente pode utilizar-se $k_w = 1,0$;
- I_W constante de empenamento;
- I_T constante de torção uniforme;
- z_g distância do ponto de aplicação da carga ao centro de corte, determinado através de $z_g = z_a - z_s$, em que z_a e z_s são as coordenadas do ponto de aplicação da carga e do centro de corte em relação ao centro de gravidade da secção.

(*) - Expressão válida quando o centro de gravidade coincide com o centro de corte.

• **Elementos Uniformes em Flexão Composta com Compressão (Colunas - Viga)**

A instabilidade de um elemento sujeito a flexão composta com compressão deve-se à encurvadura por flexão, à encurvadura lateral, ou a uma combinação desses dois fenómenos. Como tal, o EC3-1-1 na cláusula 6.3.3.(1) distingue dois tipos de elementos:

- Elementos não suscetíveis à deformação por torção, de que são exemplo os elementos compostos por secções tubulares ou por secções abertas restringidas lateralmente. Nestes elementos, o modo de instabilidade relevante é a flexão.
- Elementos suscetíveis à deformação por torção, em que se incluem os elementos constituídos por secções abertas não restringidas lateralmente em que, conseqüentemente, a encurvadura lateral é apontada como o principal fenómeno de instabilidade.

O EC3-1-1 apresenta dois métodos para o cálculo dos fatores de interação k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} , necessários para a verificação da resistência à encurvadura de Elementos solicitados à flexão composta com compressão: o Método 1 (Anexo A) e o Método 2 (Anexo B). No presente projeto optou-se pela utilização do Método 2, cuja metodologia se encontra explicada no fluxograma da figura 6.11.

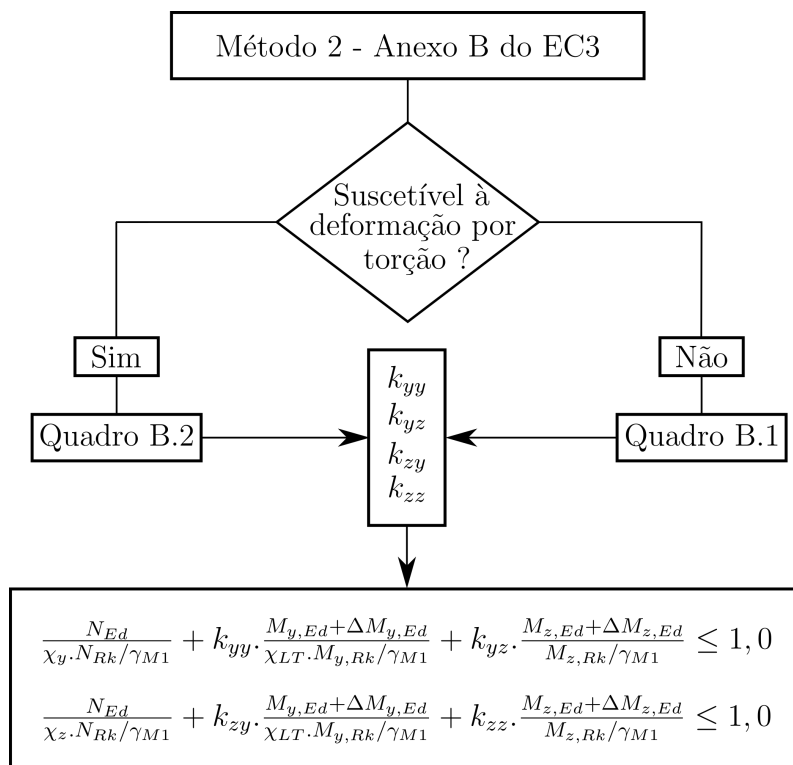


Figura 6.11 Fluxograma de verificação da resistência à encurvadura de elementos sujeitos à flexão composta com compressão.

Em que:

- N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de compressão;
- $M_{y,Ed}$ valor máximo do momento fletor no elemento em relação ao eixo y-y;
- $M_{z,Ed}$ valor máximo do momento fletor no elemento em relação ao eixo z-z;
- χ_y e χ_z fatores de redução devido à encurvadura por flexão em torno dos eixos y-y e z-z, respetivamente.
- $\Delta M_{y,Ed}$ acréscimo de momento fletor em torno do eixo y-y, devido à variação do centro de gravidade em secções da classe 4;
- $\Delta M_{z,Ed}$ acréscimo de momento fletor em torno do eixo z-z, devido à variação do centro de gravidade em secções da classe 4;
- χ_{LT} coeficiente de redução para a encurvadura lateral.

Nota: Os valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$ podem ser determinados recorrendo à tabela 6.2.

Tabela 6.2 Valores para o cálculo de N_{Rk} , $M_{i,Rk}$ e $\Delta M_{i,Ed}$.

Classes	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

6.1.2 Estados Limites de Utiliza o

Conforme referido no capítulo 5.2 deste documento a verifica o aos Estados Limites últimos de Utiliza o deve ser feita a partir da condi o:

$$E_d \leq C_d \quad (6.13)$$

Segundo o estabelecido na sec o 6 e no Anexo A1 da NP EN 1990 o valor de E_d deverá ser determinado para a equa o característica, mencionada no capítulo 5.2.

Os valores limites para C_d , devem ser acordados entre o projetista e o dono de obra. No entanto, caso esses valores não sejam previamente definidos, o Anexo Nacional do EC3-1-1 estabelece valores para a verifica o dos estados limites de utiliza o. Neste sentido, para as deforma es verticais em vigas, os valores máximos a considerar para os deslocamentos são determinados a partir da equa o 6.14, com base base na figura 6.12.

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0 \quad (6.14)$$

Em que:

- δ_{max} flecha no estado final em rela o   linha reta que une os apoios;
- δ_0 contra flecha da viga no estado não carregado;
- δ_1 varia o da flecha da viga devida às a es permanentes imediatamente após a sua aplica o;
- δ_2 varia o da flecha da viga devida   aço variável de base associada aos valores de combina o das restantes a es variáveis.

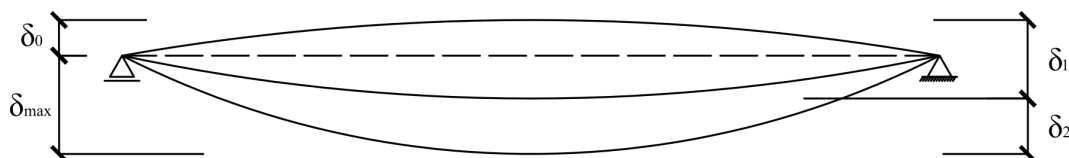


Figura 6.12 Defini o dos deslocamentos verticais em vigas.

A tabela 6.3 mostra os valores recomendados dos limites dos deslocamentos verticais.

Tabela 6.3 Valores recomendados para os limites máximos dos deslocamentos.

Condi�es	δ_{max}	δ_2
Coberturas em geral.	L/200	L/250
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas, para além do pessoal da manuten�o.	L/250	L/300
Pavimentos em geral.	L/250	L/300
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos ou outros acabamentos frágeis ou divisórias não flexíveis.	L/250	L/350
Pavimentos que suportem pilares (a não ser que o deslocamento tenha sido incluído na análise global para o estado limite último).	L/400	L/500
Quando δ_{max} possa afetar o aspeto do edifício.	L/250	-

Nota: No caso geral, L representa o v o da viga. No caso de vigas em consola, L representa duas vezes o v o real da consola.

No que respeita às deformações horizontais, o Anexo Nacional da NP EN 1993-1-1, define que os deslocamentos máximos admissíveis no topo dos pilares não devem ser superiores aos indicados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 Valores recomendados para os limites dos deslocamentos horizontais.

Tipo de pórtico	Características	Limites
Pórticos de 1 piso	Sem aparelhos de elevação	$h_i/150$
Pórticos de 1 piso	Outros edifícios	$h_i/300$
Pórticos de vários pisos	Em cada piso	$h_i/300$
Pórticos de vários pisos	Globalmente	$h/500$

Em que:

h_i altura do pilar ou do piso;

h altura total da estrutura.

6.2 Ligações metálicas

Na maior parte dos casos as ligações entre os elementos metálicos de uma estrutura são estabelecidas por meio de ligações soldadas ou aparafusadas, processo utilizado também no presente projeto. Deste modo recorreu-se à NP EN 1993-1-8, onde se indicam os procedimentos necessários ao dimensionamento das ligações metálicas.

6.2.1 Ligações aparafusadas

Nas ligações aparafusadas é necessário garantir a resistência dos parafusos bem como dos restantes elementos constituintes da ligação. Em geral, podem ser utilizados parafusos de qualquer classe, contudo, as classes mais utilizadas nas estruturas metálicas são as indicadas na tabela 6.5.

A tabela 6.5 apresenta os valores nominais da tensão de cedência f_{yb} e da tensão de rotura à tração f_{ub} das classes de parafusos mais utilizadas na construção metálica.

Tabela 6.5 Valores nominais da tensão de cedência f_{yb} e da tensão de rotura à tração f_{ub} para as classes correntes.

Classes	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm^2)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm^2)	400	400	500	500	600	800	1000

A denominação do parafuso é estabelecida a partir do diâmetro d (em milímetros) do parafuso na zona lisa, por exemplo, um parafuso de diâmetro igual a 20 milímetros é denominado por M20.

Por exemplo, a figura 6.13 mostra as partes que compõem um parafuso e onde se inclui também a anilha e a porca.

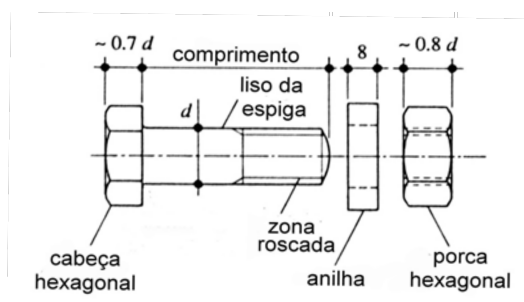


Figura 6.13 Principais elementos de uma ligação aparafusada.

A tabela 6.6 inclui as principais características geométricas dos parafusos mais utilizados.

Tabela 6.6 Principais características geométricas dos parafusos.

Parafuso	M12	M16	M20	M24	M30
Diâmetro nominal (mm)	12	16	20	24	30
Diâmetro do furo (mm)	13	18	22	26	33
Maior dimensão da cabeça (mm)	20.3	26.75	33.53	39.98	50.85
Menor dimensão da cabeça (mm)	18	24	30	36	46
Área transversal bruta (mm^2)	113	201	314	452.2	706.5
Área útil (mm^2)	84.3	157	245	353	561

Segundo a NP EN 1993-1-8 as ligações aparafusadas são divididas em 5 categorias classificadas de A a E, e distinguidas conforme se indica em seguida.

Ligações aparafusadas sujeitas ao corte

- Categoria A - Ligações aparafusadas correntes

Para este tipo de ligações podem utilizar-se parafusos correntes (fabricados com aço de baixo teor de carbono), ou parafusos de alta resistência desde a classe 4.6 até à classe 10.9. Dispensa pré-esforço bem como qualquer tipo de preparação especial das superfícies de contacto.

- Categoria B - Ligações resistentes ao escorregamento no estado limite de utilização
Nas ligações desta categoria utilizam-se parafusos de alta resistência pré-esforçados com aperto controlado. Não ocorre escorregamento no estado limite de utilização.
- Categoria C - Ligações resistentes ao escorregamento no Estado Limite Último
Nas ligações desta categoria, utilizam-se parafusos de alta resistência pré-esforçados com aperto controlado. Não ocorre escorregamento no estado limite último.

Ligações aparafusadas sujeitas à tração

- Categoria D - Ligações com parafusos não pré-esforçados

Nas ligações desta categoria utilizam-se parafusos correntes ou parafusos de alta resistência até à classe 10.9. Não é necessário qualquer pré-esforço.

- Categoria E - Ligações com parafusos de alta resistência pré-esforçados

Nestas ligações usam-se parafusos de alta resistência pré-esforçados com aperto controlado.

As tabelas 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam os critérios de dimensionamento para as diferentes categorias de ligações aparafusadas referidas anteriormente.

Tabela 6.7 Categorias e critérios de dimensionamento de Ligações Aparafusadas.

Categorias	Tipos	Critérios	Opções
A Corte e Esmagamento	Ligações ao corte	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Utilizar parafusos das Classes 4.6 a 10.9
B Escorregamento no Estado Limite de Utilização	Ligações ao corte	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Necessária a utilização de parafusos pré-esforçados das Classes 8.8 ou 10.9
C Escorregamento no Estado Limite Último	Ligações ao corte	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Necessária a utilização de parafusos pré-esforçados das Classes 8.8 ou 10.9
D Não pré-esforçada	Ligações à tração	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Utilizar parafusos das classes 4.6 a 10.9
E Pré-esforçada	Ligações à tração	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Parafusos pré-esforçados das Classes 8.8 ou 10.9

Tabela 6.8 Critérios para o cálculo da resistência em elementos de ligação ao corte.

Categoria	Resistência	Verificações
A	Corte por plano de corte	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$
A	Esmagamento	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1, 0 \right\}$
B	Escorregamento no E.L.S	$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,C}$ $F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$
B	Esmagamento no E.L.U	$F_{v,Rd} \geq F_{v,Ed}$ e $F_{b,Rd} \geq F_{v,Ed}$ $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$
C	Escorregamento no E.L.U	$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$
C	Esmagamento no E.L.U	$F_{v,Rd} \geq F_{v,Ed}$ e $F_{b,Rd} \geq F_{v,Ed}$

Tabela 6.9 Critérios para o cálculo da resistência em elementos de liga o   traço.

Categoria	Resistência	Verifica�es
D+E	Traço	$F_{t,Rd} = \frac{0.9f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}}$
D+E	Pun�amento	$B_{p,Rd} = \frac{0.6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$

Tabela 6.10 Critérios para o cálculo da resistência em elementos de liga o sujeitos a esforços combinados de corte e traço.

Categoria	Resistência	Verifica�es
B	Traço + Corte	$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu (F_{p,Cd} - 0,8F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}}$
C	Traço + Corte	$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,Cd} - 0,8F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}$
A-E	Condi�o adicional	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1,0$

Em que:

- $F_{v,Ed}$ valor de cálculo da força de corte por parafuso para o E.L.U;
- $F_{v,Rd}$ valor de cálculo da resist ncia ao corte por parafuso;
- $F_{b,Rd}$ valor de cálculo da resist ncia ao esmagamento por parafuso;
- $F_{s,Rd,ser}$ valor de cálculo da resist ncia ao escorregamento de um parafuso de alta resist ncia pr -esforçado no E.L.S;
- $F_{s,Rd}$ valor de cálculo da resist ncia ao escorregamento de um parafuso de alta resist ncia pr -esforçado;
- $F_{t,Ed}$ valor de cálculo da força de tra o por parafuso para o E.L.U;
- $F_{t,Rd}$ valor de cálculo da resist ncia   tra o por parafuso;
- $B_{p,Rd}$ resist ncia ao pun amento da cabeça do parafuso e da porca;
- f_{ub} tensão última do a o do parafuso;
- A  rea da sec o lisa do parafuso;
- f_u tensão última do a o da chapa;
- d di metro do parafuso;
- t espessura da chapa mais fina da liga o;
- e_1 distância ao topo na dire o da transmissão do esforço, desde o centro do parafuso até ao topo adjacente de qualquer das peças da liga o;

p_1	distância entre centros de parafusos na direção da transmissão do esforço;
d_0	diâmetro do furo do parafuso;
t	espessura da “chapa” mais fina da ligação;
k_s	variável que pode variar entre os valores 1 e 0.63;
n	número de planos de escorregamento;
μ	coeficiente de atrito;
$F_{p,C}$	valor de cálculo do pré-esforço no caso de parafusos das classes 8.8 e 10.9;
A_s	área da secção resistente do parafuso;
$F_{t,Ed,ser}$	valor de cálculo da força de tração por parafuso para o E.L.S;
γ_{M2}	coeficiente parcial de segurança de valor 1,25, associado à resistência dos parafusos;
γ_{M3}	coeficiente parcial de segurança de valor 1,25, associado à resistência ao esmagamento em estado limite último;
$\gamma_{M3,ser}$	coeficiente parcial de segurança de valor 1,10, associado à resistência ao esmagamento em estado limite de serviço.

6.2.2 Ligações soldadas

As soldaduras mais utilizadas na construção metálica são as soldaduras de ângulo e de topo. As dimensões características de um cordão de soldadura são a espessura e o comprimento, cujas geometrias necessitam ser calculadas, por forma a garantir a resistência aos esforços de cálculo.

No presente projeto o dimensionamento dos cordões de soldadura é efetuado a partir do Método Simplificado que consta da Parte 1-8 do EC3. Segundo a referida normativa, o valor de cálculo da tensão resistente ao corte da soldadura é determinado a partir de :

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} a \quad (6.15)$$

Em que:

$F_{w,Rd}$	valor de cálculo da tensão resistente da soldadura;
f_u	tensão última;
β_w	fator de correlação;
a	espessura do cordão de soldadura;
γ_{M2}	coeficiente parcial de segurança de valor 1,25 associado à resistência das soldaduras.

6.3 Elementos em Betão Armado

Os elementos em betão armado que constituem este projeto são as fundações, as vigas e os pilares do edifício. O dimensionamento das vigas e dos pilares foi efetuado com base na NP EN 1992, enquanto que as fundações cumprem também os requisitos da NP EN 1997.

A tabela 6.11 mostra os coeficientes parciais relativos aos materiais definidos para os estados limites últimos.

Tabela 6.11 Coeficientes Parciais de Segurança de Resistência.

Situações de projeto	γ_c - betão	γ_s - aço
Persistentes transitórias	1,5	1,15

6.3.1 Vigas

Estados Limites Últimos - Resistência à flexão

1. Área de armadura longitudinal

A área de armadura longitudinal foi calculada pela expressão:

$$A_s = \frac{\omega b_t d f_{cd}}{f_{yd}} \quad (6.16)$$

Com:

$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (6.17)$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b d^2 f_{cd}} \quad (6.18)$$

Em que:

A_s área de armadura longitudinal;

ω percentagem mecânica das armaduras de flexão;

b_t largura média da zona tracionada;

d altura útil de uma secção transversal;

f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão;

f_{yd} valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras;

μ momento fletor reduzido.

2. Área de armadura longitudinal mínima

A área mínima de armadura longitudinal foi calculada por:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \quad (\geq 0,0013 b_t d) \quad (6.19)$$

Em que:

f_{ctm} valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples;

f_{yk} valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras.

3. Área de armadura longitudinal máxima

A área da armadura longitudinal máxima não pode ultrapassar:

$$A_{s,max} = 0,04 A_c \quad (6.20)$$

Em que:

A_c Área da secção transversal de betão;

Estados Limites Últimos - Resistência ao Esforço Transverso

1. Determinação do Esforço Transverso resistente

Para elementos com armaduras de esforço transverso constituídos por estribos verticais, como é o caso neste projeto, o valor de cálculo do esforço transverso resistente, V_{Rd} , corresponde ao menor dos valores determinados com base nas equações:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (6.21)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (6.22)$$

Em que:

A_{sw} área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;

s espaçamento dos estribos;

z braço do binário calculado através de $0,9d$;

f_{ywd} valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;

θ ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga;

α_{cw} coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido;

b_w largura da alma do elemento;

v_1 coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso;

f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

2. Área das armaduras de Esforço Transverso

A área das armaduras de Esforço Transverso foi calculada pela expressão 6.23.

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} \cot(\theta)} \quad (6.23)$$

Em que:

- A_{sw} área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;
- s espaçamento dos estribos;
- V_{Ed} valor do esforço transverso atuante;
- z braço do binário calculado através de $0,9d$;
- f_{ywd} valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;
- θ ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga.

3. Área mínima das armaduras de esforço transverso

O cálculo da área mínima das armaduras de esforço transverso foi realizado com base na equação 6.24.

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = \rho_{w,min} b_w \sin(\alpha) \quad (6.24)$$

Com:

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (6.25)$$

Em que:

- A_{sw} área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;
- s espaçamento dos estribos;
- $\rho_{w,min}$ taxa mínima de armadura de esforço transverso;
- b_w largura da alma do elemento;
- α ângulo formado pelas armaduras de esforço transverso e o eixo longitudinal;
- f_{ck} valor característico da tensão de rotura do betão à compressão;
- f_{yk} valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras;

4. Área máxima das armaduras de esforço transverso

A área máxima das armaduras de Esforço Transverso pode ser determinada por:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{max} = 0,5 \alpha_{cw} b_w v_1 \frac{f_{cd}}{f_{ywd}} \quad (6.26)$$

Em que:

- A_{sw} área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;
- s espaçamento dos estribos;
- α_{cw} coeficiente que tem em conta o estado de tensão no banzo comprimido;
- b_w largura da alma do elemento;
- v_1 coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso;
- f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão;
- f_{ywd} valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso.

5. Espaçamento longitudinal máximo

O espaçamento longitudinal máximo entre armaduras de esforço transverso não deve ser superior a $s_{l,max}$:

$$s_{l,max} = 0,75 d (1 + \cot \alpha) \quad (6.27)$$

6. Espaçamento transversal entre ramos

O espaçamento transversal entre os ramos de estribos não deverá ser superior ao valor determinado a partir da expressão 6.28.

$$s_{t,max} = 0,75 d \leq (600mm) \quad (6.28)$$

Estados Limites de Utilização

1. Controlo da Fendilhação

O controlo da fendilhação foi efetuado com recurso ao *software* “Gala Reinforcement” para o cálculo da abertura de fendas, comparando os valores obtidos com os limites máximos admissíveis regulamentares.

2. Controlo da Deformação

Por forma a verificar o estado limite de deformação nas vigas, respeitou-se o pressuposto indicado na Cláusula 7.4.1 (4) da EN 1992. Por conseguinte, a flecha máxima das vigas deve ser inferior a $L/250$, em que L representa o vão.

6.3.2 Pilares

Estados Limites de Últimos - Resistência à Flexão Composta Desviada

1. Determinação da Resistência à Flexão Composta Desviada

Conforme a Cláusula 5.8.9 (4) da NP 1992-1-1 é possível dimensionar de forma simplificada secções à flexão composta desviada recorrendo à expressão 6.29.

$$\left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^a + \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^a \leq 1,0 \quad (6.29)$$

O parâmetro “a” deve ser determinado por meio de interpolação linear com base na tabela 6.12 que se aplica a secções retangulares.

Tabela 6.12 Parâmetro “a”.

N_{Ed}/N_{Rd}	0,1	0,7	1,0
a	1,0	1,5	2,0

Em que:

$M_{Ed,z}/M_{Ed,z}$ valor de cálculo do momento fletor no eixo considerado;

$M_{Rd,z}/M_{Rd,z}$ valor do momento fletor resistente no eixo considerado;

a expoente.

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal;

N_{Rd} valor do esforço normal resistente da secção.

2. Armaduras mínimas longitudinais

Segundo a Cláusula 9.5.2 (2), a área total de armadura longitudinal não deve ser inferior a $A_{s,min}$, calculada a partir de:

$$A_{s,min} = \frac{0,10 N_{Ed}}{f_{yd}} \quad \text{ou} \quad 0,002 A_c \quad \text{se este valor for superior} \quad (6.30)$$

em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de compressão;

f_{yd} valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras;

A_c área da secção de betão.

3. Armaduras máximas longitudinais

A área da armadura longitudinal não deve ser superior a $A_{s,max}$, sendo o valor recomendado igual a $0,04 A_c$ fora das zonas de emendas por sobreposição, e igual a $0,08 A_c$ nas zonas de emendas por sobreposição.

Estados Limites de Últimos - Resistência ao Esforço Transverso**1. Armadura transversal**

As armaduras transversais necessárias podem ser determinadas por:

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} \cot(\theta)} \quad (6.31)$$

Em que:

A_{sw} área da secção transversal das armaduras de esforço transverso;

s espaçamento dos estribos;

V_{Ed} valor do esforço transverso atuante;

z braço do binário calculado através de $0,9d$;

f_{ywd} valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso;

θ ângulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da viga

2. Espaçamento das armaduras transversais

O espaçamento das armaduras transversais ao longo da altura do pilar não deve exceder $s_{cl,max}$.

$$s_{cl,max} = \min\left\{20\phi_{min}; b; 400mm\right\} \quad (6.32)$$

Em que:

ϕ_{min} diâmetro mínimo dos varões longitudinais;

b menor dimensão do pilar.

Estados Limites de Utilização

Os critérios utilizados para a verificação dos estados limites de utilização são idênticos aos considerados no dimensionamento das vigas.

6.3.3 Fundações

Maciços de encabeçamento das estacas

Os maciços de encabeçamento das estacas são os elementos encarregues de fazer a ligação entre os pilares da estrutura e as estacas, e foram calculados com base nos esforços condicionantes dos Estados Limites Últimos. Com os esforços obtidos no programa “SAP2000” recorreu-se ao *software* “Gala Reinforcement” para efetuar o dimensionamento das armaduras, com base na geometria e armaduras previamente arbitradas.

Estacas

As estacas foram modeladas com base no modelo de “Winkler”, através de um conjunto de molas independentes com comportamento elástico e linear, que definem as condições de ligação com os diferentes estratos de solo atravessados. Neste caso, foram consideradas molas horizontais espaçadas a 1 metro ao longo do comprimento das estacas.

Na figura 6.14 encontra-se representado o modelo utilizado no estudo das estacas do hangar.

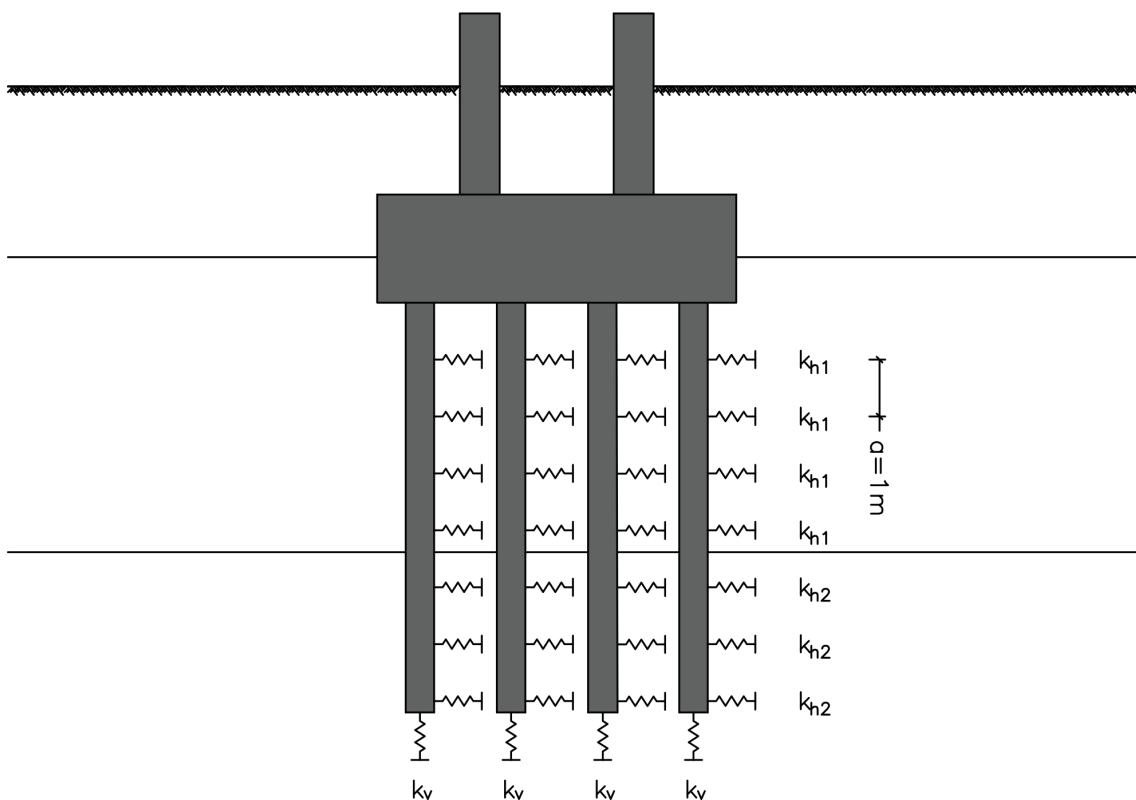


Figura 6.14 Modelação das estacas.

A rigidez horizontal das molas k_h foi calculada por:

$$k_h = 0,65 \times \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_e I_e}} \times \frac{E_s}{1 - \nu^2} \times a \times D \quad (6.33)$$

Em que:

E_s módulo de deformabilidade do solo;

D diâmetro da estaca;

E_e módulo de elasticidade da estaca;

I_e inércia da secção da estaca;

ν_s coeficiente de poisson do solo;

a afastamento entre molas.

A rigidez vertical das molas obteve-se a partir das expressões 6.34 e 6.35.

$$W_1 = \frac{0,35 \times N \times D}{A_e \times E_e} \quad (6.34)$$

$$k_v = \frac{N}{W_1} \quad (6.35)$$

Em que:

W_1 assentamento unitário provocado por uma carga unitária;

N esforço axial unitário;

D diâmetro da estaca;

A_e área da estaca;

E_e módulo de elasticidade da estaca;

k_v rigidez vertical da mola.

a) E.L.U de Capacidade Resistente do Terreno

O estado limite último de rutura do terreno foi efetuado a partir da Abordagem de Cálculo 1 da NP EN 1997-1 que estabelece as seguintes combinações:

- Combinação 1: A1 “+” M1 “+” R1 ;
- Combinação 2: A2 “+” M1 ou M2 “+” R4 .

em que “+” significa “combinado com” .

Esta metodologia assenta na aplicação de coeficientes parciais de segurança, por forma a determinar a pior condição do dimensionamento. O emprego dos coeficientes parciais de segurança é efetuado de modo a que se tenha em consideração:

- Majoração das ações (A);
- Minoração das propriedades resistentes dos materiais (M);

Tabela 6.13 Coeficientes de segurança parciais para as combinações 1 e 2.

		Símbolo	Comb. 1	Comb. 2
Ação Permanente	Desfavorável	$\gamma_{G,Desf.}$	1,35	1,0
	Favorável	$\gamma_{G,Fav.}$	1,0	1,0
Ação Variável	Desfavorável	$\gamma_{Q,Desf.}$	1,5	1,3
	Favorável	$\gamma_{Q,Fav.}$	0,0	0,0
Materiais	Ângulo de atrito interno	γ_{ϕ}	1,0	1,0
	Coesão	$\gamma_{c'}$	1,0	1,0
	Peso volúmico	γ_{γ}	1,0	1,0
Resistência do terreno	Ponta	γ_b	1,25	1,6
	Lateral	γ_s	1,0	1,3
	Total	γ_t	1,15	1,5

- Minoração da capacidade resistente das estacas (R).

Na tabela 6.13 indicam-se os coeficientes parciais de segurança utilizados.

A capacidade resistente da fundação com recurso a estacas foi calculada a partir de ensaios dos solos de fundação, tendo-se recorrido à metodologia proposta na cláusula 7.6.2.3 da NP EN 1997-1.

A verificação da segurança é efetuada a partir da condição 6.36.

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad (6.36)$$

Em que:

$F_{c,d}$ valor de cálculo da carga axial de compressão numa estaca ou grupo de estacas;

$R_{c,d}$ capacidade resistente de cálculo do terreno no contacto com uma estaca à compressão, no estado limite último.

O valor de cálculo da força axial atuante é determinado a partir de:

$$F_{c,d} = F_G \gamma_{G,desf} + F_Q \gamma_{Q,desf} \quad (6.37)$$

Em que:

F_G valor das cargas permanentes;

F_Q valor das cargas variáveis.

O valor de cálculo da capacidade resistente à compressão de uma estaca, $R_{c,d}$, pode ser calculado pela expressão 6.38.

$$R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d} \quad (6.38)$$

Em que:

$R_{b,d}$ valor de cálculo da capacidade resistente de ponta numa estaca;

$R_{s,d}$ valor de cálculo da capacidade resistente lateral numa estaca;

Os valores de $R_{b;d}$ e $R_{s;d}$ podem, respetivamente, ser determinados pelas expressões 6.39 e 6.40.

$$R_{b;d} = R_{b;k} / \gamma_b \quad (6.39)$$

$$R_{s;d} = R_{s;k} / \gamma_s \quad (6.40)$$

Em que:

$R_{b;k}$ valor característico da resistência de ponta numa estaca;

$R_{s;k}$ valor característico da resistência lateral numa estaca;

$R_{b;k}$ e $R_{s;k}$ foram determinados por:

$$R_{b;k} = q_b A_b \quad (6.41)$$

$$R_{s;k} = q_s A_s \quad (6.42)$$

Em que:

q_b valor característico da capacidade resistente na ponta, por unidade de área;

q_s valor característico da resistência lateral nos vários estratos, por unidade de área;

A_b área da ponta da estaca;

A_s área lateral da estaca.

O valor de cálculo da capacidade resistente à compressão de um grupo de estacas, $R_{c;d grupo}$, deve ser multiplicado por n_1 e n_2 que representam respetivamente, o número de estacas em cada direção e, também, pelo fator de eficiência de grupo η_g .

$$R_{c;d grupo} = R_{c;d} n_1 n_2 \eta_g \quad (6.43)$$

b) E.L.U de Resistência à Flexão Composta

A determinação das armaduras necessárias foi realizada a partir de um modelo de elementos finitos com recurso ao software “Gala Reinforcement”. A tabela 6.14 mostra ainda as disposições construtivas consideradas para o cálculo das áreas mínimas de armaduras longitudinais em estacas moldadas (Cláusula 9.8.5 (3) do EC2).

Tabela 6.14 Área mínima de armaduras longitudinais em estacas moldadas.

Secção da estaca A_c	Área mínima de armaduras longitudinais $A_{s,bpmin}$
$A_c \leq 0,5m^2$	$A_s > 0,005A_c$
$0,5m^2 < A_c \leq 1,0m^2$	$A_s \geq 25cm^2$
$A_c > 1,0m^2$	$A_s \geq 0,0025 A_c$

c) **E.L.U de Resistência ao Esforço Transverso**

O procedimento de cálculo utilizado nas cintas das estacas é idêntico ao dos pilares.

d) **E.L.S de Fendilhação**

O procedimento de controlo de fendilhação foi similar ao utilizado nos pilares.

A - PEÇAS ESCRITAS
II- MEMÓRIA JUSTIFICATIVA

Conteúdo

7	Quantificação das ações	91
7.1	Peso Próprio (PP)	91
7.2	Restantes Cargas Permanentes (RCP)	91
7.2.1	Restante Carga Permanente na cobertura	92
7.2.2	Restante Carga Permanente nos alçados	93
7.3	Sobrecargas (SC)	97
7.3.1	Sobrecarga na cobertura	97
7.3.2	Sobrecarga nas lajes de Betão Armado	97
7.4	Ação da Temperatura (T)	97
7.5	Ação do Vento (W)	98
7.5.1	Cálculo da Pressão Dinâmica de Pico	98
7.5.2	Cálculo dos Coeficientes de Pressão na cobertura	98
7.5.3	Cálculo dos Coeficientes de Pressão nos alçados	104
7.5.4	Cálculo do Coeficiente Estrutural	108
7.5.5	Cálculo das ações do vento F_w nas madres da cobertura	109
7.5.6	Cálculo das forças do vento F_w nas madres dos alçados laterais	125
7.5.7	Cálculo das forças do vento F_w nas madres do alçado de topo C	132
7.5.8	Aplicação das forças do vento ao modelo “SAP2000”	134
7.6	Ação Sísmica (E)	135
7.7	Ação da Ponte Rolante	138
7.7.1	Definição do veículo tipo	140
7.7.2	Obtenção da envolvente dos momentos M3	141
8	Pré-Dimensionamento	145
8.1	Elementos em Betão Armado	145
8.1.1	Pré-dimensionamento das vigas de travamento dos pórticos	145
8.1.2	Pré-dimensionamento das vigas de suporte da ponte rolante	145
8.1.3	Pré-dimensionamento das lajes	148
8.1.4	Pré-dimensionamento dos pilares dos pórticos	149
8.2	Estruturas Metálicas	150
8.2.1	Pré-dimensionamento das asnas da cobertura	152
8.2.2	Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 1	156
8.2.3	Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 2	159
8.2.4	Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 3	162
8.2.5	Pré-dimensionamento das madres de cobertura	165
8.2.6	Pré-dimensionamento das madres dos alçados	166
8.2.7	Pré-dimensionamento dos pilares dos alçados de topo	167

9	Dimensionamento	171
9.1	Dimensionamento dos Elementos Metálicos	171
9.1.1	Dimensionamento das asnas da cobertura	172
9.1.2	Dimensionamento da viga de travamento 1	196
9.1.3	Dimensionamento da viga de travamento Tipo 2	203
9.1.4	Dimensionamento da viga de travamento tipo 3	210
9.1.5	Dimensionamento das madres da cobertura	216
9.1.6	Dimensionamento dos travamentos ao nível dos cordões inferiores das asnas	227
9.1.7	Dimensionamento dos travamentos ao nível dos cordões superiores das asnas	231
9.1.8	Dimensionamento das diagonais das madres dos alçados laterais. . .	235
9.1.9	Dimensionamento dos tarugos das madres dos alçados laterais. . .	237
9.1.10	Dimensionamento das diagonais das madres dos alçados de topo . .	238
9.1.11	Dimensionamento dos tarugos das madres dos alçados de topo . . .	240
9.1.12	Dimensionamento das Madres dos Alçados Laterais	243
9.1.13	Dimensionamento das Madres dos Alçados de Topo	249
9.1.14	Dimensionamento das cordas dos Pilares dos Alçados de Topo . . .	263
9.1.15	Dimensionamento das cordas das Vigas Treliçadas	271
9.1.16	Dimensionamento das diagonais dos Pilares Treliçados	279
9.1.17	Dimensionamento das diagonais das vigas treliçadas	281
9.2	Ligações Metálicas	283
9.2.1	Ligações Soldadas	283
9.2.2	Ligações Aparafusadas	287
9.3	Dimensionamento dos Elementos de Betão Armado	293
9.3.1	Pilares	293
9.3.2	Vigas	299
9.3.3	Lajes	310
9.3.4	Maciços de encabeçamento das estacas	326
9.3.5	Estacas	327
9.3.6	Plintos	333

Lista de Figuras

7.1	Materiais no “SAP2000”.	91
7.2	Numeração das asnas e madres de cobertura (Vista em planta).	92
7.3	Alçados A e B - Módulo tipo.	93
7.4	Madres do alçado A e respetivas cotas altimétricas - Módulo tipo.	94
7.5	Madres do alçado B e respetivas cotas altimétricas - Módulo tipo.	94
7.6	Madres do alçado C e cotas respetivas - Módulo Norte.	96
7.7	Zonamento da cobertura devido ao vento W_x e W_{xx} .	99
7.8	Zonamento da cobertura devido ao vento W_x e W_{xx} .	99
7.9	Coefficientes de pressão exteriores segundo W_x .	100
7.10	Zonamento da cobertura segundo W_y e W_{yy} .	101
7.11	Zonamento da cobertura do módulo estudado segundo W_y e W_{yy} .	102
7.12	Coefficientes de pressão exteriores segundo W_y e W_{yy} .	102
7.13	Coefficiente de atrito na cobertura segundo W_y e W_{yy} .	103
7.14	Coefficientes de pressão exterior segundo W_y e W_{yy} .	104
7.15	Coefficientes de pressão exteriores nos alçados laterais segundo W_y .	105
7.16	Coefficientes de pressão exteriores nos alçados laterais segundo W_{yy} .	105
7.17	Coefficientes de pressão exterior nos alçados de topo segundo W_x e W_{xx} .	106
7.18	Coefficientes de pressão exteriores nos alçados C e D segundo W_x .	107
7.19	Coefficientes de pressão exteriores nos alçados C e D segundo W_{xx} .	107
7.20	Identificação das asnas, madres e vãos.	109
7.21	Madres do alçado A.	125
7.22	Madres do alçado B.	126
7.23	Madres do alçado C.	132
7.24	Espectros de resposta de cálculo para as Ações Sísmicas Tipos 1 e 2 ($\xi=5\%$).	135
7.25	1º Modo de vibração.	136
7.26	3º Modo de vibração.	137
7.27	2º Modo de vibração.	137
7.28	Esquema estrutural considerado para o cálculo da carga máxima nas rodas.	138
7.29	Valores das reações R1 e R2.	138
7.30	Comboio tipo.	139
7.31	Modelo estrutural e comboio tipo considerado.	139
7.32	Definição do veículo tipo - “SAP2000”.	140
7.33	Definição do veículo tipo - “Ftool”.	140
7.34	Envoltente dos momentos M3 e localização da secção mais solicitada.	141
7.35	Envoltente dos momentos M3 e localização da secção mais solicitada.	141
7.36	Linha de influência do momento fletor na secção 2,84 m viga.	142
7.37	Posições consideradas para colocação do veículo tipo.	143
7.38	Veículo tipo na posição PR1A.	143
7.39	Veículo tipo na posição PR1B.	143
7.40	Veículo tipo na posição PR2A.	143

8.1	Modelo estrutural e ações consideradas no pré-dimensionamento das vigas da ponte rolante.	146
8.2	Envolvente dos momentos M_y	146
8.3	Envolvente do esforço transversal V_z	146
8.4	Treliça do tipo Warren de altura variável.	150
8.5	Treliça do tipo Warren de altura constante.	150
8.6	Modelo de pré-dimensionamento das asnas da cobertura.	150
8.7	Modelo de pré-dimensionamento das vigas de travamento entre asnas.	151
8.8	Esforços máximos na treliça.	151
8.9	Diagrama de momentos fletores e esforço transversal na viga.	152
8.10	Ábacos de Pré-dimensionamento dos Cordões (Eixo y-y).	153
8.11	Ábacos de Pré-dimensionamento dos Cordões (Eixo z-z).	154
8.12	Ábacos de Resistência à Encurvadura de Cantoneiras (Aço S275).	155
8.13	Diagrama de momentos fletores e esforço transversal.	156
8.14	Ábacos de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).	157
8.15	Ábacos de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).	157
8.16	Ábaco de Pré-dimensionamento das barras interiores.	158
8.17	Diagrama de momentos fletores e esforço transversal.	159
8.18	Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).	160
8.19	Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).	160
8.20	Ábacos de Pré-dimensionamento dos prumos e diagonais.	161
8.21	Diagrama de momentos fletores e esforço transversal.	162
8.22	Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).	163
8.23	Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).	163
8.24	Ábacos de Pré-dimensionamento dos montantes e diagonais.	164
8.25	Ábaco de pré-dimensionamento.	166
8.26	Ábaco de pré-dimensionamento.	167
8.27	Ábaco de pré-dimensionamento dos pilares dos alçados de topo.	169
9.1	Identificação das asnas da cobertura.	172
9.2	Numeração adotada nas barras das asnas da cobertura.	172
9.3	Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do "SAP2000".	179
9.4	Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do "SAP2000".	183
9.5	Esbeltezas nos prumos das asnas - solução ótima.	187
9.6	Rácios obtidos nos prumos das asnas - solução ótima.	187
9.7	Verificação da resistência das secções e encurvadura no "SAP2000".	189
9.8	Esbeltezas nas diagonais das asnas - solução ótima.	191
9.9	Rácios obtidos nas diagonais das asnas - solução ótima.	191
9.10	Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do "SAP2000".	193
9.11	Identificação dos nós.	194
9.12	Flechas verticais máximas.	195
9.13	Numeração das barras da viga de travamento 1.	196
9.14	Esbeltezas das barras da viga VT1.	199
9.15	Rácios das barras da viga VT1.	199
9.16	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 3 (Frame 1139).	199
9.17	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 5 (Frame 1178).	200
9.18	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 7 (Frame 1146).	200
9.19	Identificação do nó 1.	201
9.20	Flecha absoluta no "SAP2000".	201
9.21	Deformada da viga.	202
9.22	Identificação das barras da viga.	203
9.23	Esbeltezas obtidas nas barras da viga VT2.	206

9.24	Rácios obtidos nas barras da viga VT2.	206
9.25	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 1 (Frame 955).	207
9.26	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 9 (Frame 1023).	207
9.27	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 12 (Frame 1019).	208
9.28	Identificação do nó 1.	208
9.29	Flecha relativa no “SAP2000” para as vigas VT2.	209
9.30	Identificação das barras da viga.	210
9.31	Esbeltezas obtidas nas barras.	212
9.32	Rácios obtidos nas barras.	212
9.33	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 5 (Frame 708).	213
9.34	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 9 (Frame 783).	213
9.35	Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 12 (Frame 779).	214
9.36	Vão da viga e posição do nó 1.	214
9.37	Flechas relativas no “SAP2000”.	215
9.38	Diagramas de momentos fletores M_y	216
9.39	Diagramas de momentos fletores M_z	216
9.40	Madres de cobertura mais esforçadas.	217
9.41	Posição dos tarugos nas madres.	217
9.42	Verificação da resistência da secção transversal da barra 1316 através do “SemiComp+”.	219
9.43	Diagramas de esforço transversal (V_z) e momento fletor (M_y).	221
9.44	Valores dos factores C1, C2 e C3 e valores correspondentes do factor K.	222
9.45	Cálculo do momento crítico no <i>software</i> “LTBeam” e deformada 3D.	223
9.46	Resistência à encurvadura lateral no <i>software</i> “A3C 2.93”.	223
9.47	Resistência do elemento à encurvadura lateral a partir do “SemiComp+”.	224
9.48	Flecha vertical na madre 1316.	225
9.49	Identificação das barras dos travamentos inferiores.	227
9.50	Identificação dos grupos de barras.	228
9.51	Verificação da segurança na barra 2410.	230
9.52	Verificação da segurança na barra 2337.	230
9.53	Identificação das barras dos travamentos.	231
9.54	Identificação dos grupos de barras.	232
9.55	Verificação da segurança na barra 1222.	234
9.56	Verificação da segurança na barra 1228.	234
9.57	Identificação da barra mais solicitada.	235
9.58	Dimensionamento da barra mais solicitada.	236
9.59	Identificação do tarugo mais esforçado.	237
9.60	Verificação da segurança na barra 6385.	238
9.61	Barras mais esforçadas.	238
9.62	Verificação da segurança na barra 5061.	239
9.63	Identificação das barras mais esforçadas.	240
9.64	Verificação da segurança na barra 5123.	241
9.65	Verificação da segurança na barra 5072.	242
9.66	Vista das madres dos alçados laterais.	243
9.67	Diagramas de momentos fletores M_y	244
9.68	Identificação da madre mais esforçada.	244
9.69	Diagrama de esforço transversal V_z	245
9.70	Diagrama de momento fletor M_y	245
9.71	Diagrama de esforço transversal V_y	245
9.72	Diagramas de momento fletor M_z	245
9.73	Flecha máxima horizontal observada nas madres dos alçados.	247

9.74	Controlo da flecha máxima vertical (plano yz)	248
9.75	Madres do alçado de topo Norte.	249
9.76	Identificação dos grupos de madres de topo.	250
9.77	Madre mais solicitada.	251
9.78	Diagrama de esforço transverso V_z para a combinação condicionante na barra 5051.	251
9.79	Diagrama de momentos fletores M_y para a combinação condicionante na barra 5051.	251
9.80	Diagrama de esforço transverso V_y para a combinação condicionante na barra 5051.	252
9.81	Diagrama de momentos fletores M_z para a combinação condicionante na barra 5051.	252
9.82	Diagrama de momentos fletores M_y nas madres do grupo 2.	253
9.83	Identificação das barras da madre.	254
9.84	Diagrama de esforço transverso V_z	254
9.85	Diagrama de momentos fletores M_y	254
9.86	Diagrama de esforço transverso V_y	254
9.87	Diagrama de momentos fletores M_z	254
9.88	Diagrama de momentos fletores M_y nas madres do grupo 3.	256
9.89	Identificação das barras da madre mais solicitada.	256
9.90	Diagrama de esforço transverso V_z	257
9.91	Diagrama de momentos fletores M_y	257
9.92	Diagrama de esforço transverso V_y	257
9.93	Diagrama de momentos fletores M_z	257
9.94	Flechas máximas horizontais devido à combinação condicionante.	259
9.95	Flechas máximas verticais devido à combinação condicionante.	259
9.96	Flechas máximas horizontais.	260
9.97	Flechas máximas horizontais.	261
9.98	Flechas máximas horizontais.	261
9.99	Flechas máximas verticais devido à combinação condicionante.	262
9.100	Cordão mais esforçado.	263
9.101	Cordão mais esforçado.	264
9.102	Determinação do momento crítico.	265
9.103	Verificação da resistência da secção mais solicitada dos pilares treliçados.	267
9.104	Flechas máximas horizontais no plano xz.	269
9.105	Flechas máximas horizontais no plano yz.	270
9.106	Cordão mais esforçado.	271
9.107	Diagramas de esforços.	273
9.108	Determinação do momento crítico a partir do <i>software</i> “LTBeamN”.	274
9.109	Flecha horizontal máxima devido à combinação condicionante.	277
9.110	Flecha vertical máxima devido à combinação condicionante.	278
9.111	Diagonais dos pilares treliçados.	279
9.112	Verificação da resistência da barra 5478 aos ELU a partir do <i>software</i> “SAP2000”.	280
9.113	Diagonais das vigas treliçadas.	281
9.114	Verificação da resistência da barra 1193 aos ELU a partir do <i>software</i> “SAP2000”.	282
9.115	Ábaco de dimensionamento dos cordões de soldadura.	283
9.116	Numeração das barras das asnas da cobertura.	285
9.117	Numeração dos nós nas asnas da cobertura.	286

9.118	Ligações soldadas das diagonais e prumos aos goussets das asnas e das vigas de travamento.	287
9.119	Ligações soldadas das diagonais e prumos aos gousset das vigas treliçadas.	287
9.120	Ligação Viga-Pilar.	288
9.121	Verificação da resistência da ligação aos Estados Limites Últimos.	288
9.122	Ligação Viga-Pilar.	289
9.123	Verificação da resistência da ligação aos Estados Limites Últimos.	289
9.124	Ligação dos pilares aos plintos de betão.	290
9.125	Verificação da ligação aos Estados Limites Últimos.	290
9.126	Ligações aparafusadas nos elementos contraventamento das madres.	291
9.127	Pormenores das ligações das madres aos pilares.	291
9.128	Pormenor das ligações dos travamentos das cordas.	292
9.129	Pormenor das ligações dos travamentos das cordas.	292
9.130	Identificação das secções dos pilares.	293
9.131	Ábacos de flexão composta com compressão / tração.	294
9.132	Ábacos de flexão composta com compressão / tração - Secções P2 AB.	295
9.133	Ábacos de flexão composta com compressão / tração - secções P3 AB.	296
9.134	Ábacos de flexão composta com compressão / tração - secções P2 FG.	297
9.135	Controlo da Fendilhação nas Secções P1.	298
9.136	Controlo da Fendilhação nas Secções P2 AB.	298
9.137	Controlo da Fendilhação nas Secções P3 AB.	298
9.138	Controlo da Fendilhação nas Secções P2 FG.	298
9.139	Identificação das vigas e secções.	299
9.140	Ábacos de flexão composta.	302
9.141	Ábacos de flexão composta.	303
9.142	Diagramas dos Momentos Fletores M3 em função da posição da ponte rolante.	304
9.143	Armaduras longitudinais na viga V3B e respetivo ábaco de dimensionamento.	305
9.144	Armaduras longitudinais na viga V3F e ábaco de dimensionamento.	305
9.145	Controlo da fendilhação nas Vigas V1B.	307
9.146	Controlo da fendilhação nas Vigas V1A.	307
9.147	Controlo da fendilhação nas Vigas V2B.	307
9.148	Controlo da fendilhação nas Vigas V3B.	307
9.149	Controlo da fendilhação nas Vigas V4B.	307
9.150	Controlo da fendilhação nas Vigas V1F.	307
9.151	Controlo da fendilhação nas Vigas V2F.	307
9.152	Controlo da fendilhação nas Vigas V3F.	308
9.153	Controlo da fendilhação nas Vigas V1G.	308
9.154	Controlo da fendilhação nas Vigas V4F.	308
9.155	Controlo da fendilhação nas Vigas V1AB.	308
9.156	Controlo da fendilhação nas Vigas V2AB.	308
9.157	Controlo da fendilhação nas Vigas V3AB.	308
9.158	Controlo da fendilhação nas Vigas V1FG.	308
9.159	Controlo da fendilhação nas Vigas V2FG.	308
9.160	Controlo da fendilhação nas Vigas V3FG.	308
9.161	Perspetiva tridimensional das lajes.	310
9.162	Identificação das Lajes L1 AB.	311
9.163	Esquema extrudido das lajes L1 AB no <i>software</i> "SAP2000".	311
9.164	Identificação dos eixos locais da laje.	311
9.165	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11}	312
9.166	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22}	312
9.167	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12}	313

9.168	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .	313
9.169	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .	314
9.170	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .	314
9.171	Identificação das lajes L2 AB.	315
9.172	Esquema extrudido das lajes L2 AB.	315
9.173	Identificação dos eixos locais das lajes.	315
9.174	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11} .	316
9.175	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22} .	316
9.176	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12} .	317
9.177	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .	317
9.178	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .	318
9.179	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .	318
9.180	Identificação das Lajes L1 FG.	319
9.181	Esquema extrudido das lajes.	319
9.182	Identificação dos eixos locais.	319
9.183	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11} .	320
9.184	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22} .	320
9.185	Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12} .	321
9.186	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .	321
9.187	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .	322
9.188	Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .	322
9.189	Controlo da fendilhação nas Lajes L1 AB.	323
9.190	Controlo da fendilhação nas Lajes L2 AB.	323
9.191	Controlo da fendilhação nas Lajes L2 FG.	323
9.192	Deformações verticais máximas nas lajes L1 AB.	324
9.193	Deformações verticais máximas nas lajes L2 AB.	324
9.194	Deformações verticais máximas nas lajes L1 FG.	325
9.195	Maciços de Encabeçamento e Estacas.	326
9.196	Geometria dos maciços.	326
9.197	Controlo da fendilhação nos maciços.	327
9.198	Diagrama de esforços axiais.	330
9.199	Diagrama dos momentos M_3 ao longo das estacas.	331
9.200	Ábaco de flexão composta das Estacas - Secções de 0 a 6m.	331
9.201	Ábaco de flexão composta das Estacas - Secções de 6 a 29m.	332
9.202	Controlo da Fendilhação nas Estacas.	333
9.203	Plintos.	333
9.204	Ábacos de dimensionamento dos plintos.	334
9.205	Controlo da Fendilhação nos Plintos.	334

Lista de Tabelas

7.1	Ações nas madres de cobertura devido à restante carga permanente.	93
7.2	Cotas altimétricas das madres dos alçados laterais A e B.	95
7.3	Ações nas madres dos alçados A e B devido à restante carga permanente. . .	95
7.4	Ações nas madres do alçado C devido à restante carga permanente.	96
7.5	Ações nas madres de cobertura.	97
7.6	Parâmetros utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico.	98
7.7	Cálculo da pressão dinâmica de pico na cobertura e alçados.	98
7.8	Valores de referência utilizados nas forças de atrito.	103
7.9	Cálculo do Coeficiente Estrutural.	108
7.10	Forças resultantes de pressão interna positiva ($c_{pi} = +0,2$).	110
7.11	Forças resultantes de pressão interna negativa ($c_{pi} = -0,3$).	110
7.12	Forças exteriores - Caso 1.	111
7.13	Caso 1a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	111
7.14	Forças exteriores - Caso 1.	112
7.15	Caso 1b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	112
7.16	Forças exteriores - Caso 2.	113
7.17	Caso 2a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	113
7.18	Forças exteriores - Caso 2.	114
7.19	Caso 2b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	114
7.20	Forças exteriores - Caso 3.	115
7.21	Caso 3a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	115
7.22	Forças exteriores - Caso 3.	116
7.23	Caso 3b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	116
7.24	Forças exteriores - Caso 4.	117
7.25	Caso 4a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	117
7.26	Forças exteriores - Caso 4.	118
7.27	Caso 4b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.	118
7.28	Resultados para cada um dos casos estudados.	119
7.29	Forças exteriores nas madres de cobertura - W_y	120
7.30	Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_y	121
7.31	Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_y	122
7.32	Forças exteriores nas madres de cobertura - W_{yy}	123

7.33	Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_{yy} .	123
7.34	Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_{yy} .	124
7.35	Forças de atrito do vento segundo W_{yy} nas madres.	124
7.36	Coefficientes de pressão exteriores em cada conjunto de madres.	126
7.37	Forças do vento nas madres do alçado A segundo W_y ($c_{pi} = +0.2$).	127
7.38	Forças do vento nas madres do alçado B segundo W_y ($c_{pi} = +0.2$).	128
7.39	Forças do vento nas madres do alçado A segundo W_{yy} ($c_{pi} = +0.2$).	129
7.40	Forças do vento nas madres do alçado B segundo W_{yy} ($c_{pi} = +0.2$).	130
7.41	Forças de atrito exercidas pelo vento segundo W_{yy} nas madres dos alçados A e B.	131
7.42	Coefficientes de pressão exteriores nas madres do alçado de topo C.	132
7.43	Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_x ($c_{pi} = +0.2$).	133
7.44	Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_{xx} ($c_{pi} = +0.2$).	133
7.45	Resumo das ações atribuídas no modelo "SAP2000".	134
7.46	Parâmetros dos espectros de resposta de cálculo - Ação Sísmica Tipo 1 e 2.	135
7.47	Momentos máximos.	142
8.1	Ações consideradas.	145
8.2	Valores máximos de cálculo dos esforços na viga.	147
8.3	Valores básicos da relação vão/altura útil.	148
8.4	Espessuras das lajes.	148
8.5	Pré-dimensionamento dos pilares.	149
8.6	Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z - Asna Tipo	153
8.7	Comprimentos de encurvadura - Elementos externos Asna Tipo	155
8.8	Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z - VT1.	156
8.9	Comprimentos de encurvadura - barras interiores.	158
8.10	Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z.	159
8.11	Comprimentos de encurvadura	161
8.12	Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z	162
8.13	Comprimentos de encurvadura	164
8.14	Determinação das combinações nas madres de cobertura.	165
8.15	Momentos fletores segundo y e z.	165
8.16	Determinação das cargas das madres dos alçados laterais.	166
8.17	Momentos fletores nas madres dos alçados laterais.	167
8.18	Momentos fletores nas madres dos alçados de topo.	167
8.19	Esforço axial atuante nos pilares dos alçados de topo.	168
8.20	Momento fletor atuante nos pilares dos alçados de topo.	168
9.1	Tipologia dos elementos metálicos.	171
9.2	Esforços axiais máximos nos cordões inferiores das asnas.	173
9.3	Esforços axiais máximos nos cordões superiores das asnas.	174
9.4	Esforços axiais máximos nos prumos das asnas.	175
9.5	Esforços axiais máximos nas diagonais das asnas.	176
9.6	Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores das asnas.	177
9.7	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas cordas inferiores das asnas.	179
9.8	Comparação dos resultados nos dois procedimentos.	181
9.9	Verificação da resistência das secções transversais nos cordões superiores das asnas	181
9.10	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas cordas superiores das asnas.	183

9.11	Comparação dos resultados pelos dois procedimentos.	185
9.12	Verificação da resistência das secções transversais nos prumos das asnas. . .	185
9.13	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nos prumos das asnas.	187
9.14	Verificação da resistência das secções transversais da solução ótima.	189
9.15	Comparação dos resultados obtidos pelos dois procedimentos.	190
9.16	Verificação da resistência das secções transversais nas diagonais das asnas.	190
9.17	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas diagonais das asnas.	191
9.18	Verificação da resistência das secções transversais da solução ótima.	193
9.19	Comparação dos resultados.	194
9.20	Verificação das flechas nos pontos 1 e 2 para as combinações condicionantes.	194
9.21	Esforços axiais máximos nas barras da viga VT1.	196
9.22	Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores.	197
9.23	Verificação à encurvadura por compressão - Cordões inferiores e superiores	197
9.24	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Diagonais	197
9.25	Comparação dos resultados para os dois procedimentos.	200
9.26	Verificação das flechas em termos absolutos.	201
9.27	Verificação das flechas em termos relativos.	202
9.28	Esforços axiais máximos nas barras.	203
9.29	Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores da viga VT2.	205
9.30	Verificação à encurvadura por compressão - Cordões inferiores e superiores.	205
9.31	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Diagonais	206
9.32	Comparação dos resultados obtidos pelos dois procedimentos.	208
9.33	Verificação das flechas relativas.	209
9.34	Esforços axiais máximos atuantes nas barras da viga VT3.	210
9.35	Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores da viga VT3.	211
9.36	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Cordões inferio- res e superiores.	211
9.37	Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Dia- gonais.	212
9.38	Rácios comparativos do dimensionamento em ambos os procedimentos. . .	214
9.39	Verificação das flechas relativas para as vigas VT3.	215
9.40	Esforços máximos de cálculo nas madres da cobertura.	217
9.41	Esforços de cálculo na barra 1316.	219
9.42	Verificação da resistência da secção transversal da barra 1316.	219
9.43	Determinação do momento crítico.	222
9.44	Verificação da segurança à encurvadura lateral na barra 1316.	222
9.45	Resistência da secção transversal - barra 1316.	225
9.46	Resistência do elemento à encurvadura lateral - barra 1316.	225
9.47	Verificação da flecha relativa para a madre 1316.	226
9.48	Comprimentos de Encurvadura para cada um dos grupos.	229
9.49	Esforços axiais máximos nas barras.	229
9.50	Verificação da resistência das secções transversais	229
9.51	Verificação da resistência das barras à encurvadura por compressão.	229
9.52	Comparação dos resultados para os dois procedimentos.	231
9.53	Comprimentos de Encurvadura para cada um dos grupos.	232
9.54	Esforços axiais máximos nas barras dos diferentes grupos.	233

9.55	Verificação da resistência das secções transversais.	233
9.56	Verificação da resistência dos elementos à encurvadura por compressão.	233
9.57	Comparação dos resultados em ambos os procedimentos.	235
9.58	Esforços de cálculo na barra mais esforçada.	235
9.59	Verificação da resistência das secções transversais.	236
9.60	Verificação da resistência à encurvadura por compressão.	236
9.61	Comparação dos resultados.	236
9.62	Esforços axiais de cálculo na barra mais esforçada.	237
9.63	Verificação da resistência das secções transversais.	237
9.64	Esforços axiais de cálculo nas barras mais solicitadas.	239
9.65	Verificação da resistência das secções transversais.	239
9.66	Verificação da resistência à encurvadura por compressão.	239
9.67	Comparação dos resultados.	240
9.68	Esforços axiais de cálculo nas barras mais esforçadas.	241
9.69	Verificação da resistência das secções transversais.	241
9.70	Verificação da resistência dos elementos à encurvadura por compressão.	241
9.71	Comparação dos resultados nas barras 5123 e 5072.	242
9.72	Esforços atuantes de cálculo na madre mais solicitada.	245
9.73	Esforços resistentes de cálculo.	246
9.74	Dimensionamento à Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).	246
9.75	Dimensionamento à Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).	246
9.76	Rácios finais - Barras 6336, 6337 e 6338.	246
9.77	Resistência do elemento à encurvadura lateral - Barras 6336, 6337 e 6338.	247
9.78	Verificação da flecha máxima horizontal nas madres dos alçados laterais.	247
9.79	Verificação da flecha máxima horizontal nas madres.	248
9.80	Comprimentos das barras.	250
9.81	Esforços de cálculo na barra 5051 devido à combinação condicionante.	252
9.82	Esforços resistentes de cálculo.	252
9.83	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).	252
9.84	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).	252
9.85	Rácios finais - Barra 5051.	253
9.86	Resistência à encurvadura lateral - barra 5051.	253
9.87	Esforços de cálculo.	255
9.88	Esforços resistentes de cálculo.	255
9.89	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).	255
9.90	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).	255
9.91	Rácios finais - Barras 2042 e 2043.	255
9.92	Resistência à encurvadura lateral - Barras 2042 e 2043.	256
9.93	Esforços de cálculo na madre.	257
9.94	Esforços resistentes de cálculo.	257
9.95	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).	257
9.96	Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).	258
9.97	Rácios finais - Barras 2087, 2088, 2089 e 2093.	258
9.98	Resistência à encurvadura lateral - Barras 2087, 2088, 2089 e 2093.	258
9.99	Verificação da flecha máxima horizontal.	260
9.100	Verificação da flecha máxima vertical.	261
9.101	Verificação da flecha máxima horizontal nas madres do grupo 3.	262
9.102	Esforços de cálculo no cordão mais solicitado.	263
9.103	Verificação da resistência das secções transversais.	264
9.104	Verificação da resistência das secções transversais.	265
9.105	Verificação da resistência das secções transversais.	265

9.106	Verificação à encurvadura por compressão.	265
9.107	Verificação da segurança à encurvadura lateral.	266
9.108	Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 1).	266
9.109	Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 1).	266
9.110	Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 2).	266
9.111	Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 2).	267
9.112	Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 3).	267
9.113	Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 3).	267
9.114	Rácios de dimensionamento - Resistência da secção transversal.	269
9.115	Verificação da flecha máxima horizontal no plano yz para os pilares treliçados.	270
9.116	Esforços de cálculo no cordão mais solicitado.	271
9.117	Verificação da resistência das secções transversais.	273
9.118	Verificação da resistência das secções transversais.	273
9.119	Verificação à encurvadura por compressão.	274
9.120	Verificação da segurança à encurvadura lateral.	275
9.121	Determinação dos coeficientes de momento uniforme C_{my} e C_{mLT}	275
9.122	Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão	275
9.123	Verificação da flecha máxima horizontal devido à combinação condicionante.	277
9.124	Flecha máxima vertical devido à combinação condicionante.	278
9.125	Esforços axiais de cálculo.	279
9.126	Verificação da resistência das secções transversais.	280
9.127	Verificação da resistência à encurvadura por compressão.	280
9.128	Comparação dos resultados.	281
9.129	Esforço axial de cálculo na barra estudada.	281
9.130	Verificação da resistência das secções transversais.	281
9.131	Resistência à encurvadura por compressão - Barra 1193.	282
9.132	Comparação dos resultados.	282
9.133	Dimensionamento das Soldaduras de Ligação aos "Goussets" nas Diagonais e Prumos das asnas.	285
9.134	Dimensionamento dos Gousset de ligação às cordas das asnas.	286
9.135	Geometria dos pilares e características dos materiais.	293
9.136	Armaduras longitudinais - Secções P1 (alinhamentos A,B,F e G).	294
9.137	Armaduras transversais nas secções P1 (alinhamentos A,B,F e G).	294
9.138	Armaduras longitudinais nos pilares P2 AB.	295
9.139	Armaduras transversais nos pilares P2 AB.	295
9.140	Armaduras longitudinais - secções P3 AB.	296
9.141	Armaduras transversais nas secções P3 AB dos pilares de betão armado.	296
9.142	Armaduras longitudinais nos pilares P2 FG.	297
9.143	Armaduras transversais dos pilares P2 FG.	297
9.144	Geometria das vigas e características dos materiais.	299
9.145	Armaduras de flexão nas secções dos apoios.	300
9.146	Armaduras de flexão nas secções de meio-vão.	301
9.147	Dimensionamento das armaduras de Esforço Transverso nas Vigas de Betão Armado.	306

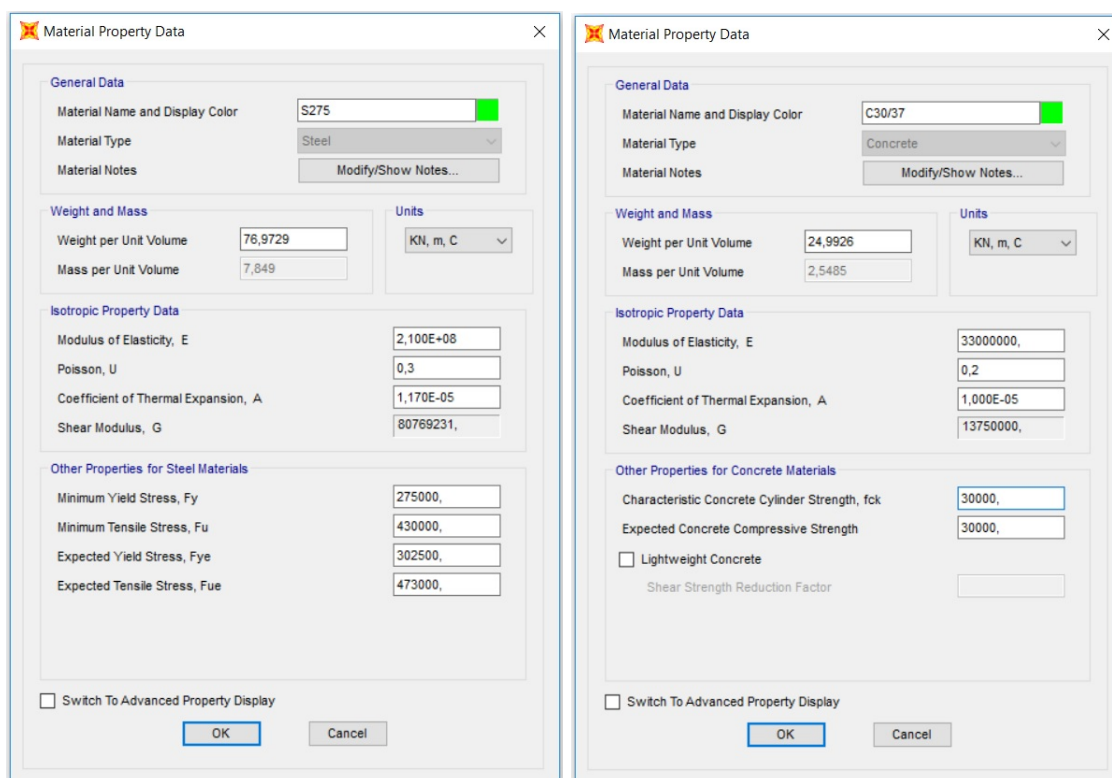
9.148	Armaduras mínimas de fendilhação nas vigas.	309
9.149	Controlo das deformações verticais nas vigas.	309
9.150	Armaduras de Flexão nas Lajes.	323
9.151	Armaduras mínimas de fendilhação nas lajes.	324
9.152	Controlo das deformações verticais nas lajes.	325
9.153	Caraterísticas geométricas e elásticas das estacas.	327
9.154	Características geológicas do terreno.	327
9.155	Rigidez das “molas” das estacas ao longo dos estratos.	328
9.156	Parâmetros geotécnicos utilizados no cálculo.	328
9.157	Verificação do estado limite de rotura do terreno para a Combinação 1 - Abordagem de Cálculo 1.	329
9.158	Verificação do estado limite de rotura do terreno para a Combinação 2 - Abordagem de Cálculo 1.	329
9.159	Armadura longitudinal adotada e verificação das disposições construtivas. .	332
9.160	Armaduras de esforço transverso nas estacas.	332
9.161	Armaduras de Flexão.	334
9.162	Armaduras de Esforço Transverso.	334

Capítulo 7

Quantificação das ações

7.1 Peso Próprio (PP)

O peso próprio foi quantificado automaticamente pelo *software* de cálculo “SAP2000”, com base na geometria dos elementos que compõem a estrutura e nos pesos volúnicos dos materiais. Neste projeto considerou-se aço S275 JR em todos os elementos metálicos e betão da classe C30/37 para os elementos de betão armado, conforme se indica na figura 7.1. Em relação ao aço das armaduras foi considerado o aço A500 NR.



(a) Aço

(b) Betão

Figura 7.1 Materiais no “SAP2000”.

7.2 Restantes Cargas Permanentes (RCP)

As restantes cargas permanentes compreendem o peso de todos os elementos não estruturais na cobertura e nos alçados, tais como revestimentos, elementos de ligação, aparelhos de iluminação e de elevação e movimentação de cargas.

7.2.1 Restante Carga Permanente na cobertura

De forma a facilitar a leitura e compreensão deste documento numeraram-se as asnas e as madres da cobertura conforme indicado na figura 7.2.

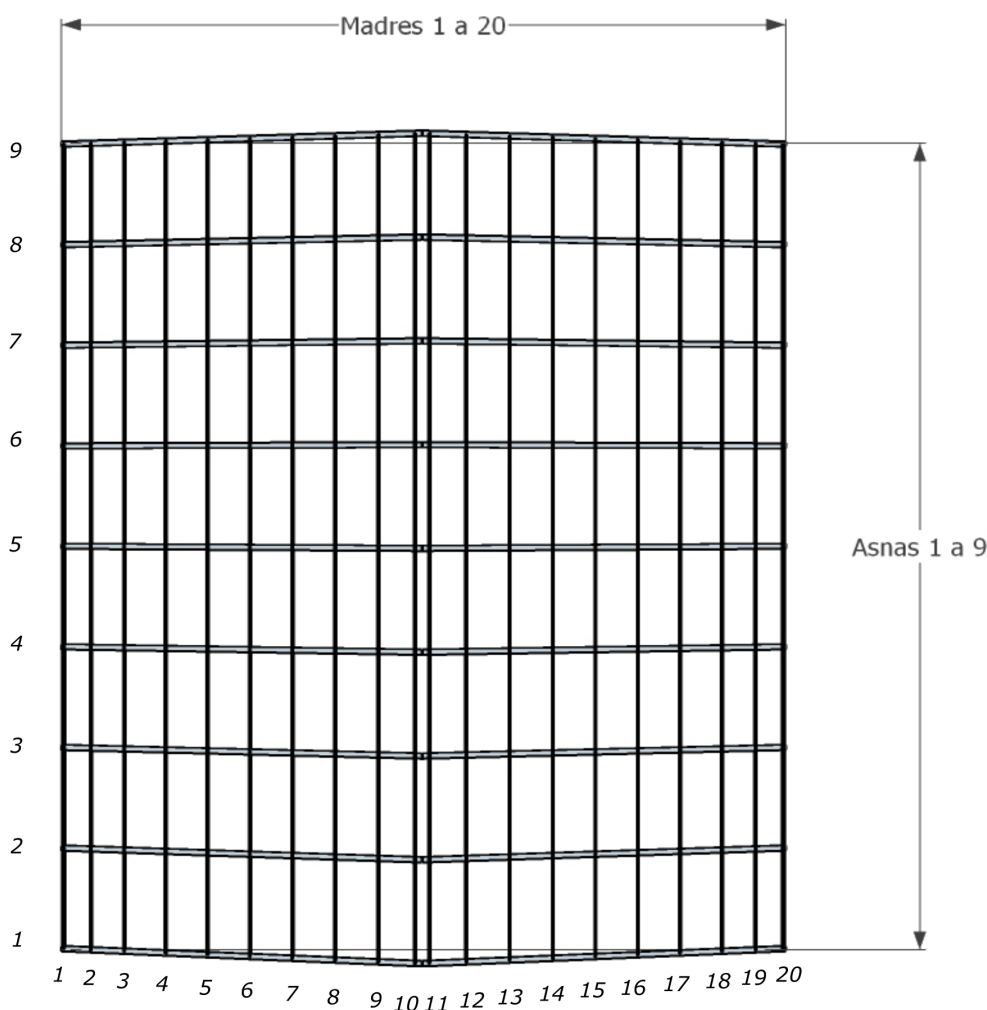


Figura 7.2 Numeração das asnas e madres de cobertura (Vista em planta).

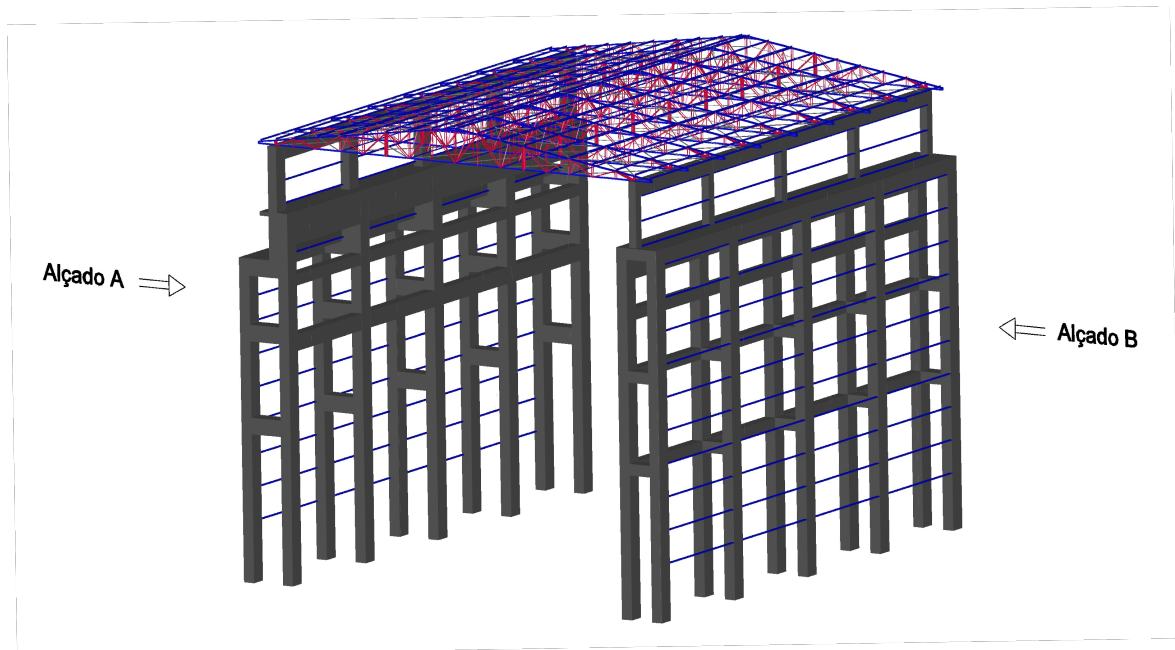
Para o revestimento da cobertura optou-se pela utilização de chapa em aço de perfil trapezoidal com espessura de 0,63mm, que juntamente com as sobreposições e os acessórios de ligação perfaz uma carga de $0,61 \text{ kN/m}^2$. Os valores das restantes cargas permanentes que atuam em cada uma das madres são definidos em função da sua largura de influência e encontram-se na tabela 7.1.

Tabela 7.1 Ações nas madres de cobertura devido à restante carga permanente.

Madres	RCP (kN/m^2)	Largura de influência (m)	RCP (kN/m)
1	0,61	0,60	0,36
2	0,61	1,25	0,76
3	0,61	1,47	0,89
4	0,61	1,62	0,99
5	0,61	1,62	0,99
6	0,61	1,62	0,99
7	0,61	1,62	0,99
8	0,61	1,62	0,99
9	0,61	1,62	0,99
10	0,61	0,68	0,42
11	0,61	0,68	0,42
12	0,61	1,62	0,99
13	0,61	1,62	0,99
14	0,61	1,62	0,99
15	0,61	1,62	0,99
16	0,61	1,62	0,99
17	0,61	1,62	0,99
18	0,61	1,47	0,89
19	0,61	1,25	0,76
20	0,61	0,60	0,36

7.2.2 Restante Carga Permanente nos alçados

A figura 7.3 mostra a designação atribuída aos alçados.

**Figura 7.3** Alçados A e B - Módulo tipo.

De modo a simplificar a leitura deste documento considerou-se que o alçado A corresponde ao alçado nascente e o alçado B ao poente. Nos alçados de topo o alçado C representa o alçado norte enquanto que o D se refere ao alçado sul.

As figuras 7.4 e 7.5 mostram, respetivamente, as madres dos alçados laterais A e B, bem como as cotas altimétricas destas.

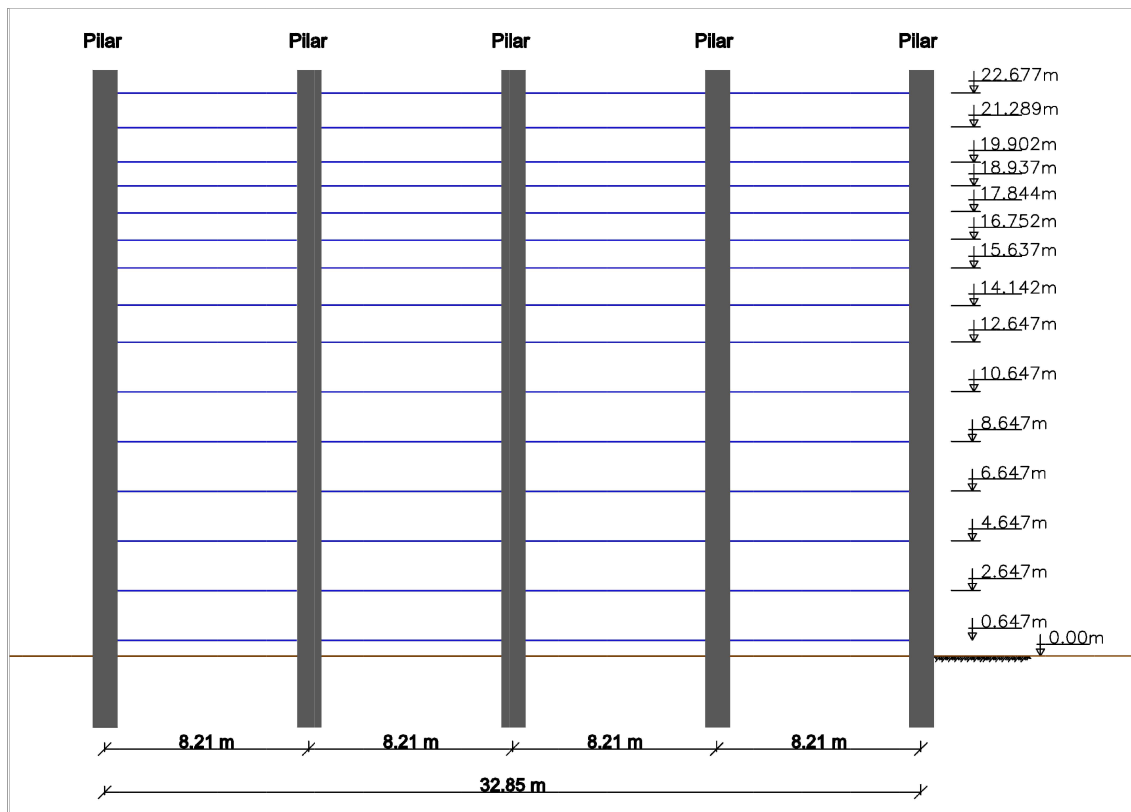


Figura 7.4 Madres do alçado A e respetivas cotas altimétricas - Módulo tipo.

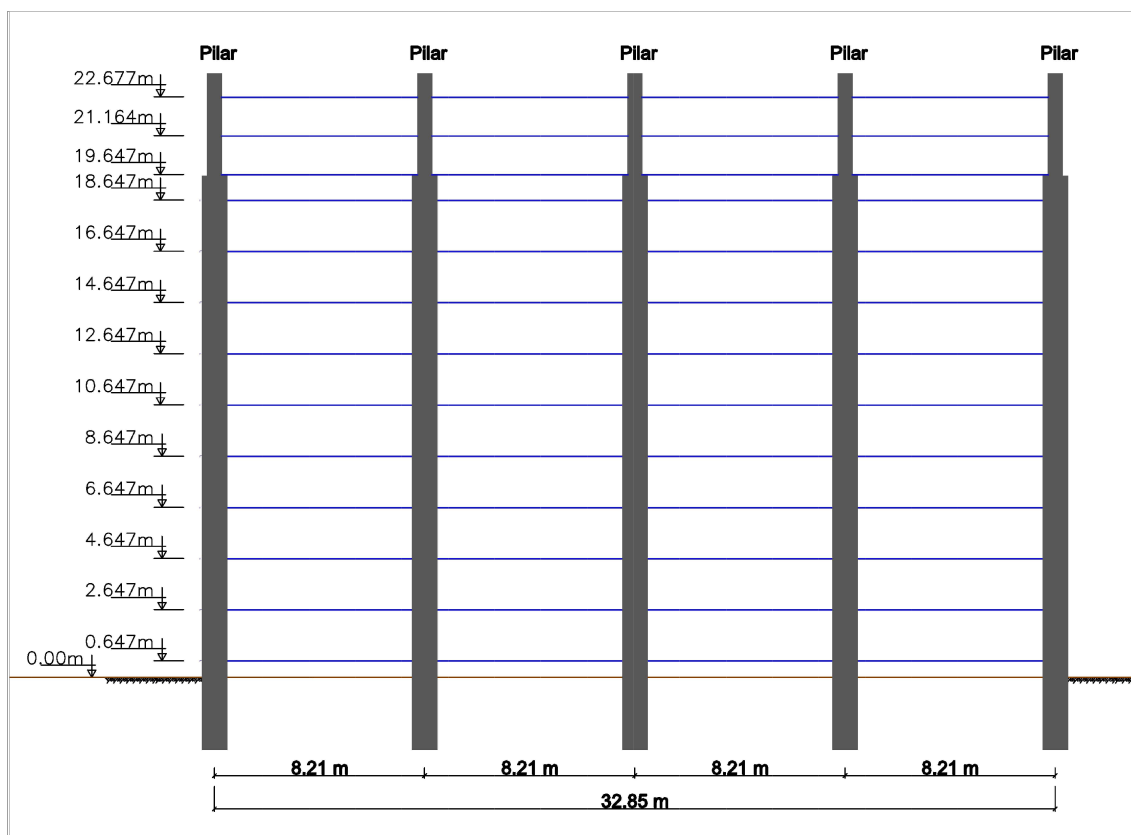


Figura 7.5 Madres do alçado B e respetivas cotas altimétricas - Módulo tipo.

Na tabela 7.2 indicam-se as cotas das madres nos alçados laterais A e B.

Tabela 7.2 Cotas altimétricas das madres dos alçados laterais A e B.

Nível	Alçado	Cota (m)	Alçado	Cota (m)
1	A	0,647	B	0,647
2	A	2,647	B	2,647
3	A	4,647	B	4,647
4	A	6,647	B	6,647
5	A	8,647	B	8,647
6	A	10,647	B	10,647
7	A	12,647	B	12,647
8	A	14,142	B	14,647
9	A	15,637	B	16,647
10	A	16,752	B	18,647
11	A	17,844	B	19,647
12	A	18,937	B	21,164
13	A	19,902	B	22,677
14	A	21,289	B	
15	A	22,677	B	

Na tabela 7.3 indicam-se os valores das ações referentes à restante carga permanente aplicada nas madres dos alçados laterais A e B.

Tabela 7.3 Ações nas madres dos alçados A e B devido à restante carga permanente.

Nível	Alçado	Larg. Influência (m)	RCP (kN/m^2)	RCP (kN/m)	Alçado	Larg. Influência (m)	RCP (kN/m^2)	RCP (kN/m)
1	A	1,65	0,61	1,00	B	1,65	0,61	1,00
2	A	2,00	0,61	1,22	B	2,00	0,61	1,22
3	A	2,00	0,61	1,22	B	2,00	0,61	1,22
4	A	2,00	0,61	1,22	B	2,00	0,61	1,22
5	A	2,00	0,61	1,22	B	2,00	0,61	1,22
6	A	2,00	0,61	1,22	B	2,00	0,61	1,22
7	A	1,75	0,61	1,07	B	2,00	0,61	1,22
8	A	1,50	0,61	0,92	B	2,00	0,61	1,22
9	A	1,31	0,61	0,80	B	2,00	0,61	1,22
10	A	1,10	0,61	0,67	B	1,50	0,61	0,92
11	A	1,09	0,61	0,66	B	1,26	0,61	0,77
12	A	1,03	0,61	0,63	B	1,52	0,61	0,93
13	A	1,17	0,61	0,71	B	1,68	0,61	1,02
14	A	1,39	0,61	0,85				
15	A	1,62	0,61	0,99				

A figura 7.6 mostra as madres dos alçados de topo C, bem como as cotas altimétricas destes elementos.

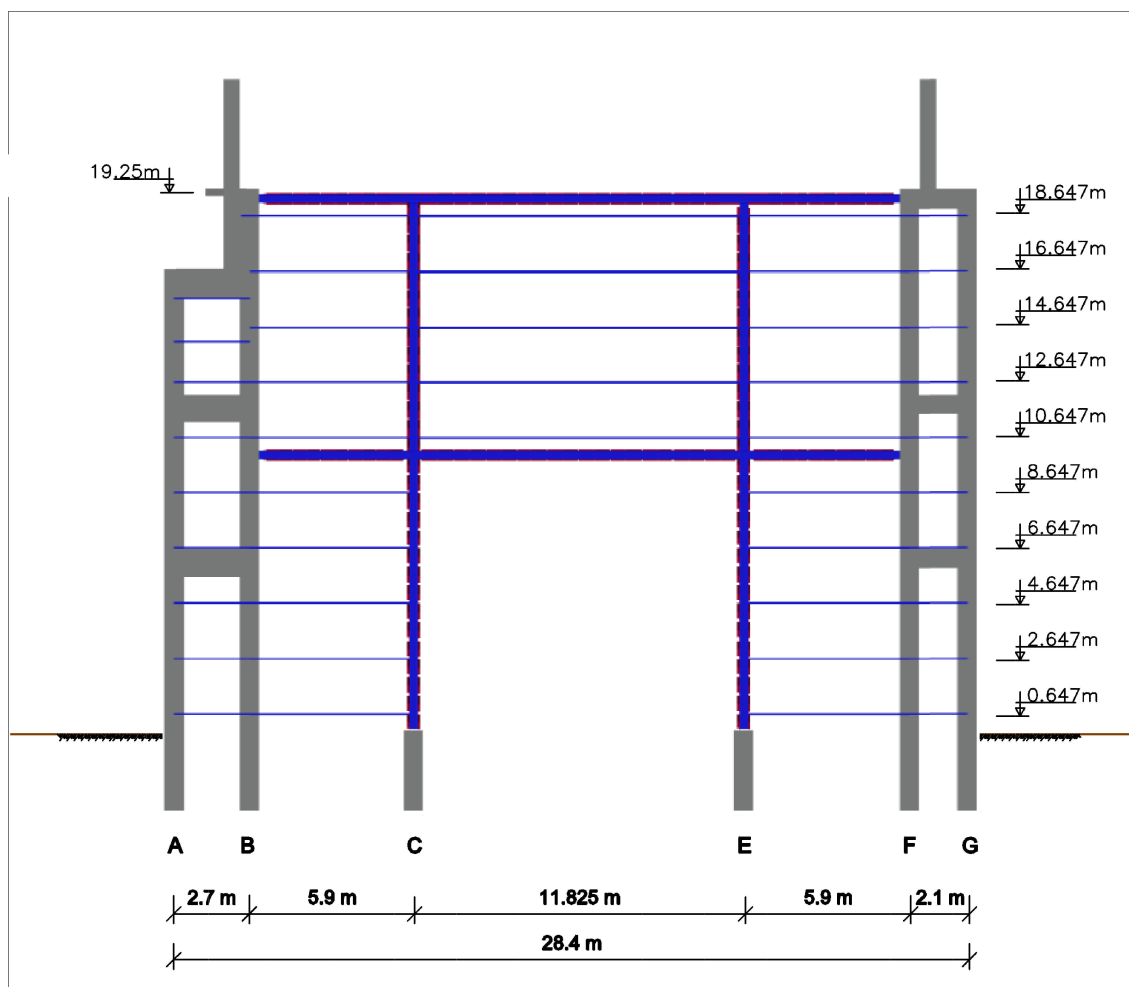


Figura 7.6 Madres do alçado C e cotas respectivas - Módulo Norte.

Tabela 7.4 Ações nas madres do alçado C devido à restante carga permanente.

Nível	Alçado	Cota (m)	Larg. Influência (m)	RCP (kN/m^2)	RCP (kN/m)
1	C	0,647	1,65	0,61	1,00
2	C	2,647	2,00	0,61	1,22
3	C	4,647	2,00	0,61	1,22
4	C	6,647	2,00	0,61	1,22
5	C	8,647	2,00	0,61	1,22
6	C	10,647	2,00	0,61	1,22
7	C	12,647	2,00	0,61	1,22
8	C	14,647	2,00	0,61	1,22
9	C	16,647	2,00	0,61	1,22
10	C	18,647	1,50	0,61	0,92

7.3 Sobrecargas (SC)

7.3.1 Sobrecarga na cobertura

A sobrecarga na cobertura deve-se essencialmente à acumulação de pó de cimento e de clínquer tendo-se considerado para este efeito o valor de $0,8 \text{ kN/m}^2$. A tabela 7.5 apresenta as ações em cada uma das madres da cobertura devido à sobrecarga.

Tabela 7.5 Ações nas madres de cobertura.

Madres	SC (kN/m^2)	Largura de influência (m)	SC (kN/m)
1	0,8	0,60	0,48
2	0,8	1,25	1,00
3	0,8	1,47	1,17
4	0,8	1,62	1,29
5	0,8	1,62	1,29
6	0,8	1,62	1,29
7	0,8	1,62	1,29
8	0,8	1,62	1,29
9	0,8	1,62	1,29
10	0,8	0,68	0,55
11	0,8	0,68	0,55
12	0,8	1,62	1,29
13	0,8	1,62	1,29
14	0,8	1,62	1,29
15	0,8	1,62	1,29
16	0,8	1,62	1,29
17	0,8	1,62	1,29
18	0,8	1,47	1,17
19	0,8	1,25	1,00
20	0,8	0,60	0,48

7.3.2 Sobrecarga nas lajes de Betão Armado

Todas as lajes do Hangar estão sujeitas a uma sobrecarga de 5 kN/m^2 .

7.4 Ação da Temperatura (T)

Conforme referido na memória descritiva deste projeto, apenas foi considerada a ação da variação uniforme de temperatura (ΔT_u). As temperaturas mínimas e máximas apresentadas na NP EN 1991-1-5 são apenas válidas para território nacional, motivo pela qual foi necessário definir as temperaturas mínimas e máximas anuais para a zona do Dondo, em Moçambique.

Após consulta do histórico de temperaturas anuais naquela região obtiveram-se os seguintes resultados:

- Temperatura mínima no Inverno - $T_{\min} = 15^\circ\text{C}$;
- Temperatura máxima no Verão - $T_{\max} = 38^\circ\text{C}$;
- Temperatura média anual - $T = 27^\circ\text{C}$.

Admitindo a temperatura inicial (T_0) igual à temperatura média anual, as variações uniformes de temperatura máxima positiva e negativa calculadas foram as seguintes:

$$\begin{aligned}\Delta T_u^+ &= T_{\max} - T_0 = 38 - 27 = 11^\circ\text{C} \\ \Delta T_u^- &= T_{\min} - T_0 = 15 - 27 = -12^\circ\text{C}\end{aligned}$$

7.5 Ação do Vento (W)

7.5.1 Cálculo da Pressão Dinâmica de Pico

Na tabela 7.6 apresentam-se os parâmetros considerados na determinação da pressão dinâmica de pico na cobertura e alçados.

Tabela 7.6 Parâmetros utilizados no cálculo da pressão dinâmica de pico.

Zona	B	Categoria de terreno	IV
$V_{b,0}$ (m/s)	30	Z_0 (m)	1
C_{dir}	1	Z_{min} (m)	10
C_{season}	1	Z_{max} (m)	200
V_b (m/s)	30	$Z_{0,II}$ (m)	0,05

Na tabela 7.7 resumem-se os valores obtidos no cálculo da pressão dinâmica de pico (q_p) para o Hangar.

Tabela 7.7 Cálculo da pressão dinâmica de pico na cobertura e alçados.

Zona	Z_e (m)	k_r	c_r	c_o	V_m (m/s)	k_I	σ_v (m/s)	I_v	q_p (kN/m ²)
Cobertura	25,70	0,23	0,76	1,00	21,37	1,00	7,03	0,31	0,98
Alçados	23,60	0,23	0,74	1,00	22,22	1,00	7,03	0,32	0,94

7.5.2 Cálculo dos Coeficientes de Pressão na cobertura

a) Coeficientes de Pressão Exterior - direção x

Na figura 7.7 mostram-se as zonas consideradas na cobertura para a definição dos coeficientes de pressão exteriores na direção x, quando o vento atua no sentido barlavento / sotavento (W_x), e também em sentido contrário (W_{xx}).

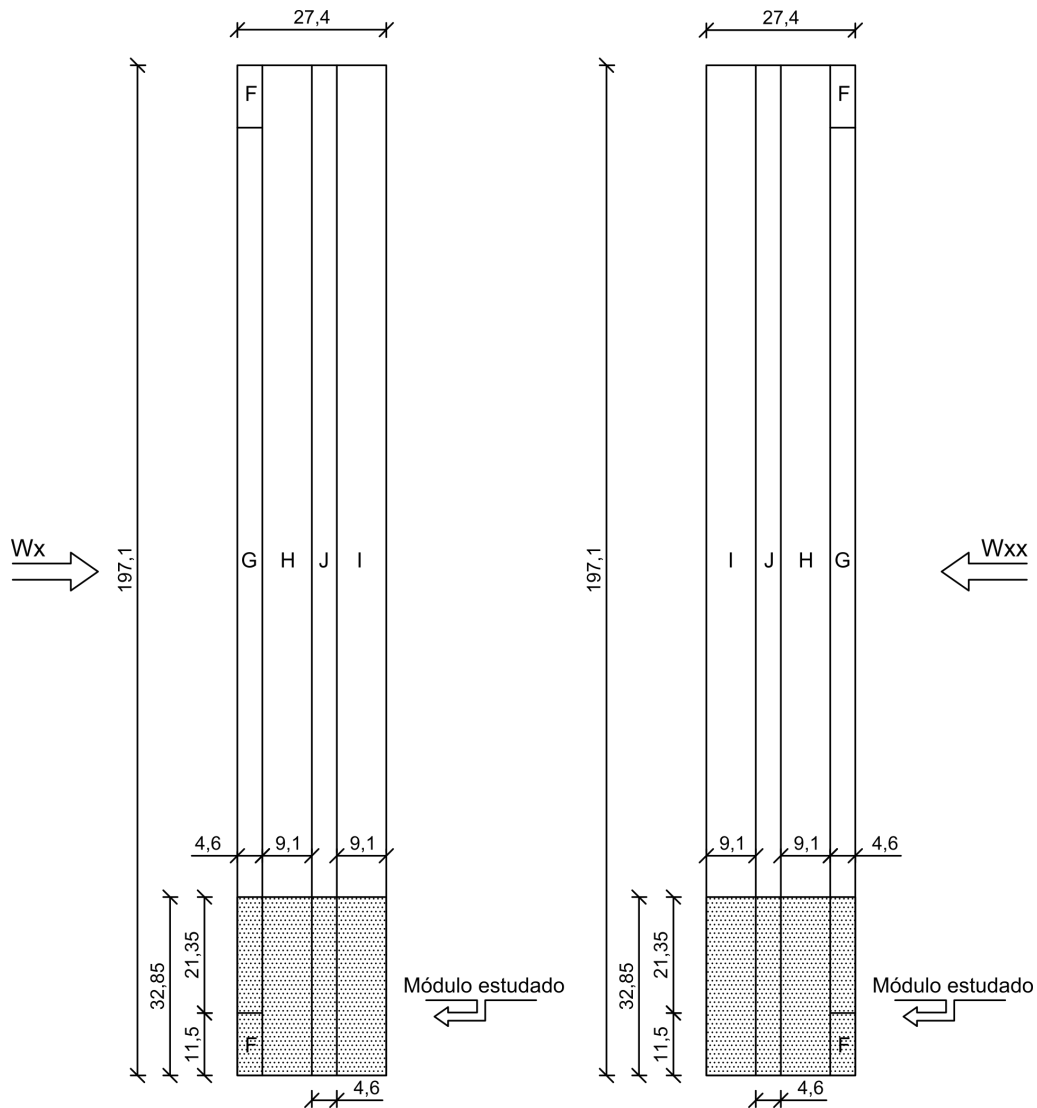


Figura 7.7 Zonamento da cobertura devido ao vento W_x e W_{xx} .

Nota: todas as dimensões encontram-se em metros.

A figura 7.8 resume o zonamento considerado para o módulo estudado, segundo as componentes W_x e W_{xx} .

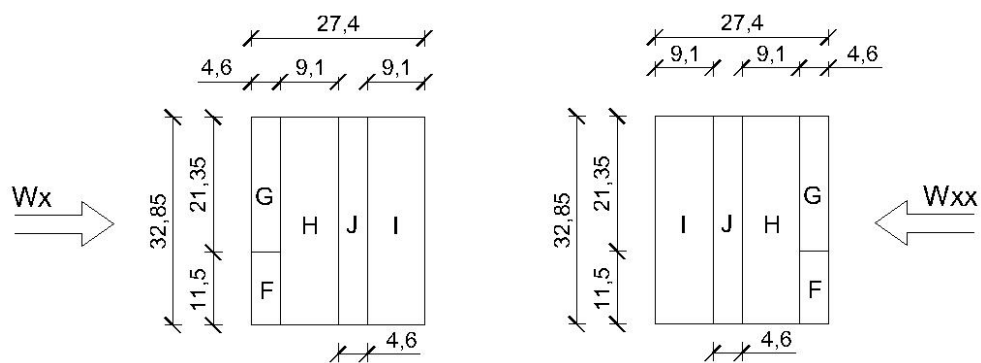


Figura 7.8 Zonamento da cobertura devido ao vento W_x e W_{xx} .

De referir, que quando o vento atua perpendicularmente à cumeeira (direção x) e para

inclinações entre $\alpha = -5^\circ$ e $\alpha = +45^\circ$ a pressão varia rapidamente entre valores positivos e negativos na vertente a barlavento, sendo necessário proceder ao estudo de casos distintos em que os maiores ou menores valores das áreas F, G e H são combinados com os maiores ou menores valores das áreas J e I. Atendendo à simetria da cobertura e por razões simplificativas apresentam-se apenas os resultados da direção W_x .

A figura 7.9 mostra, para cada caso, os coeficientes de pressão exteriores calculados nas zonas da cobertura do módulo estudado segundo a direção W_x .

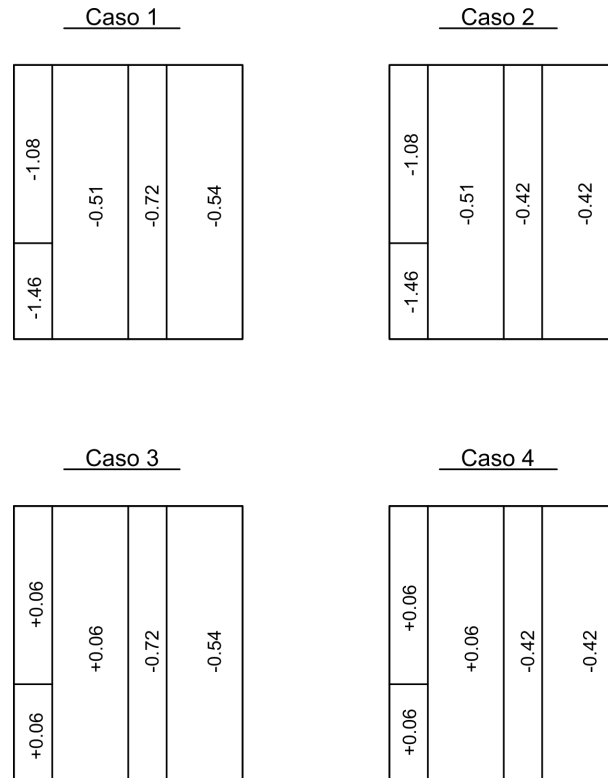


Figura 7.9 Coeficientes de pressão exteriores segundo W_x .

b) Coeficientes de Pressão Exterior - direção y

Na figura 7.10 resumem-se as conclusões dos estudos realizados com o vento segundo y nos sentidos positivo (W_y) e negativo (W_{yy}).

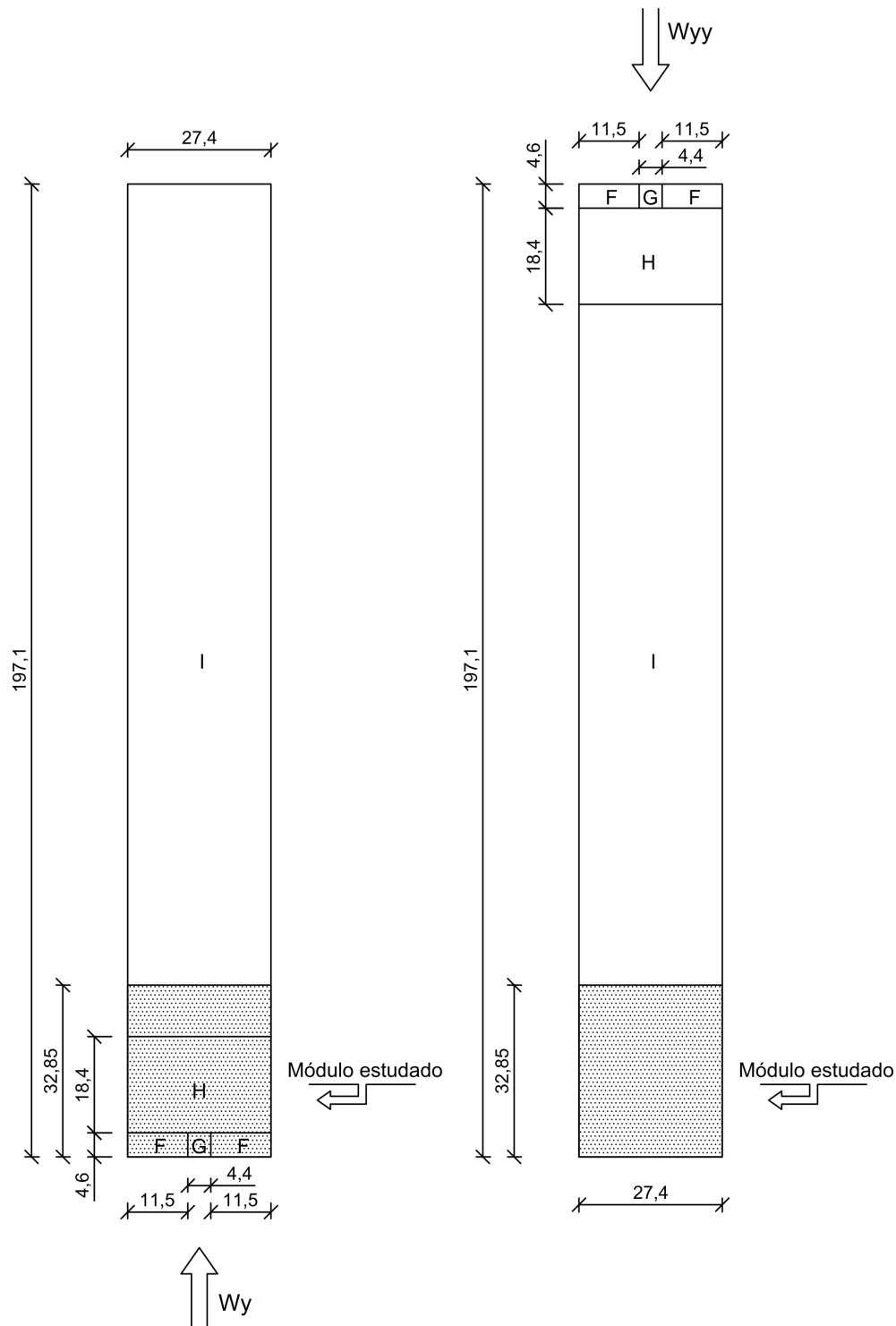


Figura 7.10 Zonamento da cobertura segundo W_y e W_{yy} .

Nota: todas as dimensões encontram-se em metros.

A figura 7.11 resume as zonas do módulo estudado quando o vento atua segundo W_y e W_{yy} .

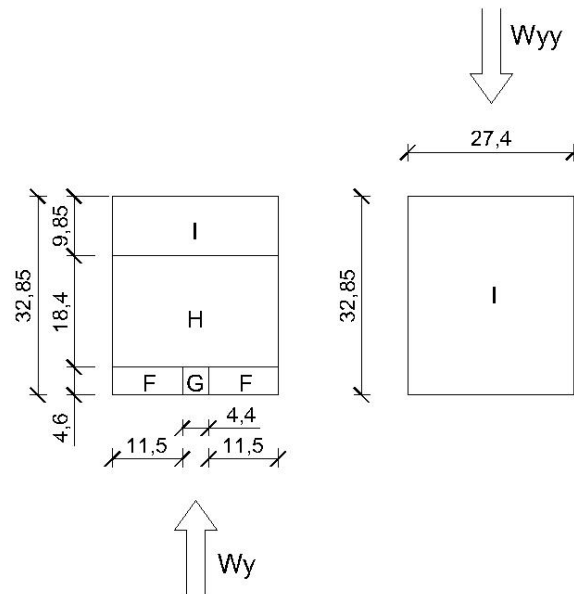


Figura 7.11 Zonamento da cobertura do módulo estudado segundo W_y e W_{yy} .

Na figura 7.12 indicam-se os valores dos coeficientes de pressão exteriores calculados para o vento W_y e W_{yy} .

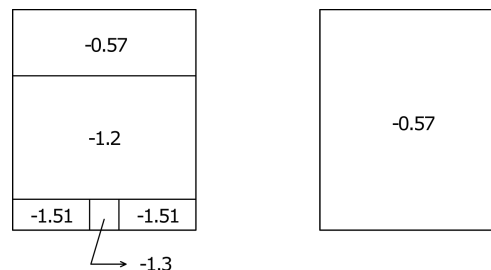


Figura 7.12 Coeficientes de pressão exteriores segundo W_y e W_{yy} .

c) Coeficientes de Pressão Interior

Na estrutura consideram-se para os coeficientes de pressão interior c_{pi} os valores de +0,2 e -0,3, que foram combinados com os coeficientes de pressão exteriores.

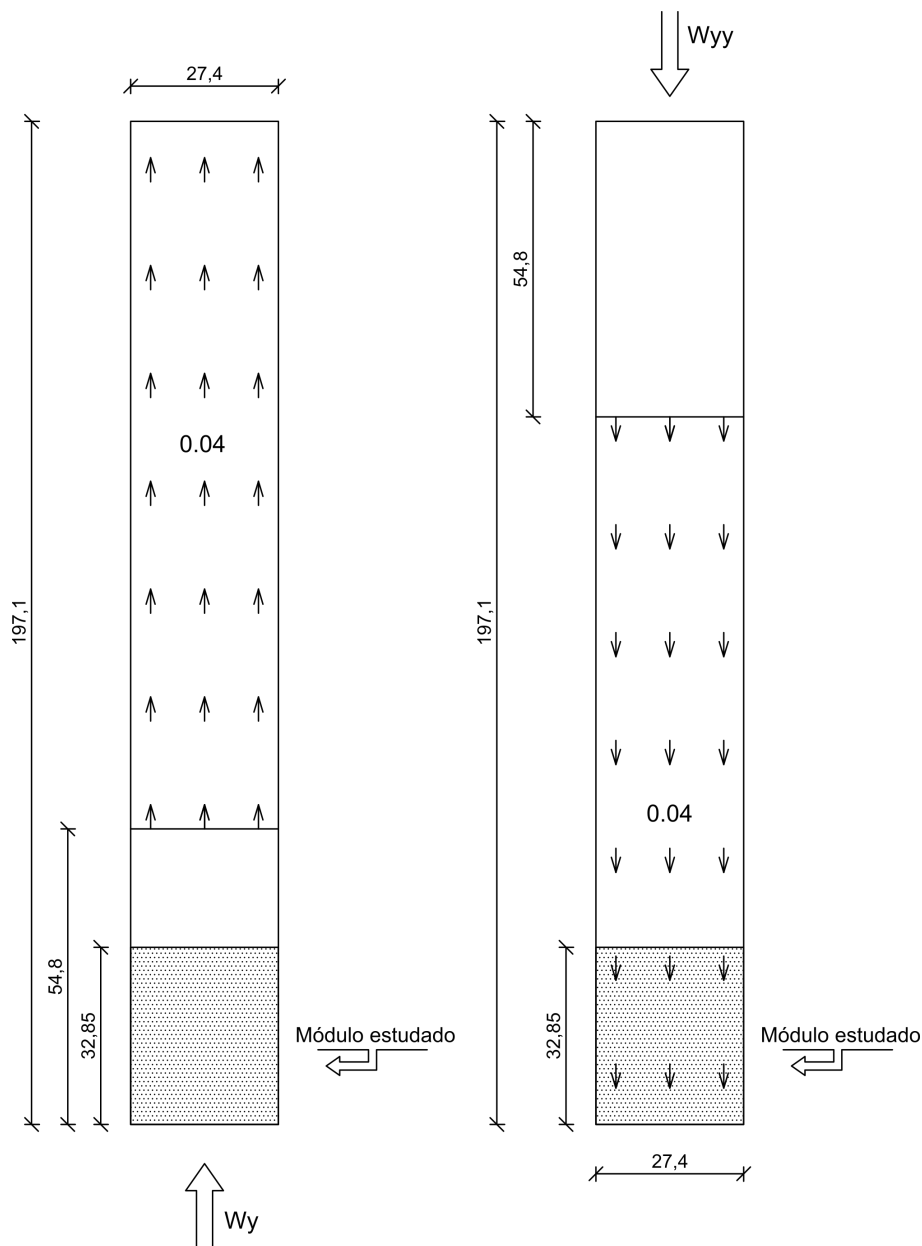
d) Coeficiente de Atrito

As forças de atrito desenvolvem-se apenas com o vento a atuar segundo a maior dimensão do Hangar, e numa faixa igual ao menor valor compreendido entre $2b$ e $4h$, em que h corresponde à máxima altura do Hangar (cumeeira) e b à largura do mesmo. Na tabela 7.8 mostram-se os valores de referência considerados para a determinação das forças de atrito.

Tabela 7.8 Valores de referência utilizados nas forças de atrito.

b (m)	27,4
h (m)	25,7
$2b$ (m)	54,8
$4h$ (m)	102,8
Valor considerado (m)	54,8

Tendo em conta o valor obtido (54,8m), verifica-se que as forças de atrito apenas afetam o módulo de estudo na direção W_{yy} , conforme se pode observar através da figura 7.13. Considera-se, para este efeito, um coeficiente de atrito c_{fr} com um valor de 0,04 (superfícies muito rugosas).

**Figura 7.13** Coeficiente de atrito na cobertura segundo W_y e W_{yy} .

Nota: todas as dimensões se encontram em metros.

7.5.3 Cálculo dos Coeficientes de Pressão nos alçados

No caso dos coeficientes de pressão exteriores nos alçados laterais, quando o vento atua segundo a direção x , apenas existe efeito de sobrepressão nas paredes, cujos coeficientes são muito mais reduzidos quando comparados com os coeficientes de sucção, que surgem quando o vento atua segundo a direção y . Como tal, a direção mais condicionante é a direção y . A figura 7.14 mostra ao longo do hangar os coeficientes de pressão exteriores calculados segundo W_y e W_{yy} .

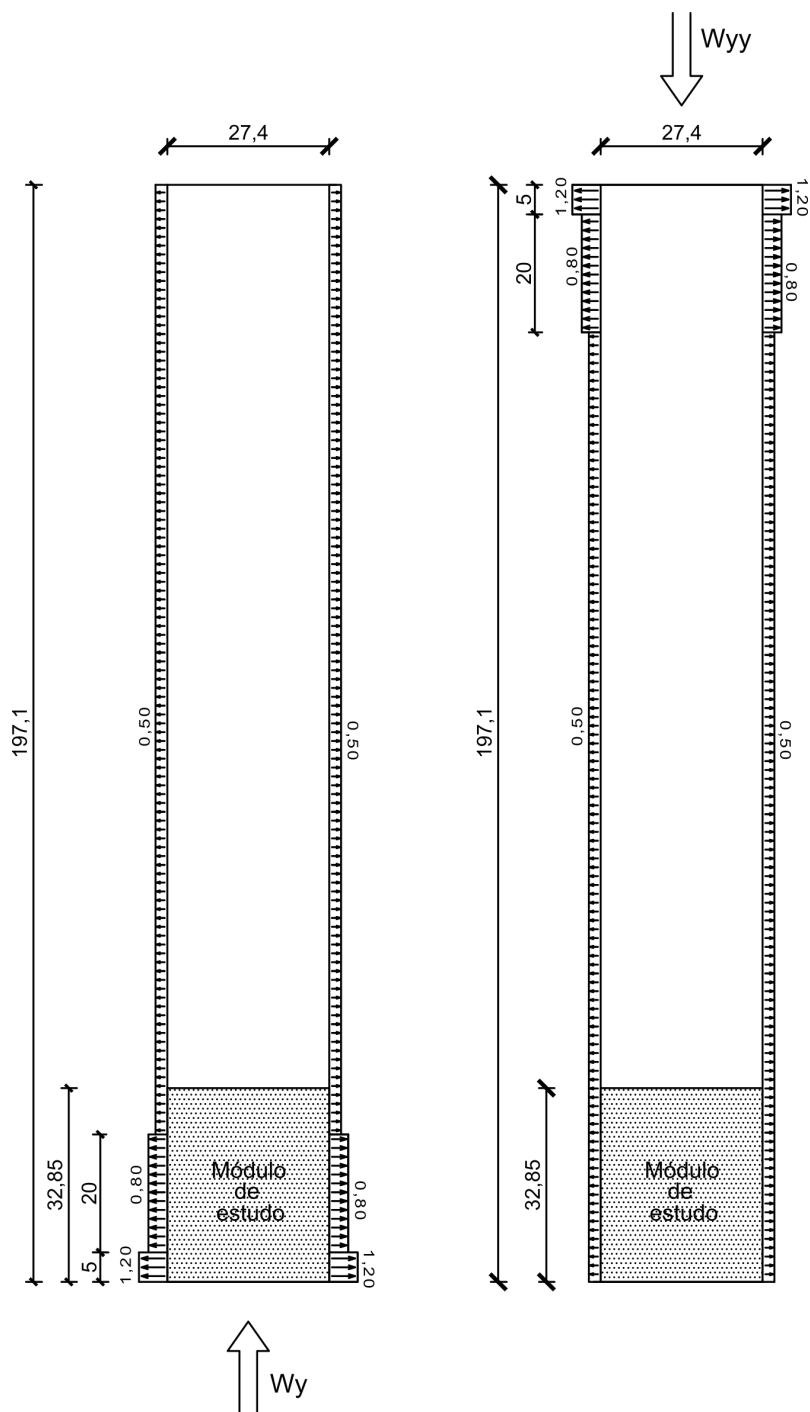


Figura 7.14 Coeficientes de pressão exterior segundo W_y e W_{yy} .

Nota: todas as dimensões encontram-se em metros.

As figuras 7.15 e 7.16 mostram, respetivamente, os valores dos coeficientes de pressão exterior nas diferentes zonas dos alçados A e B do módulo em estudo, segundo as componentes W_y e W_{yy} .

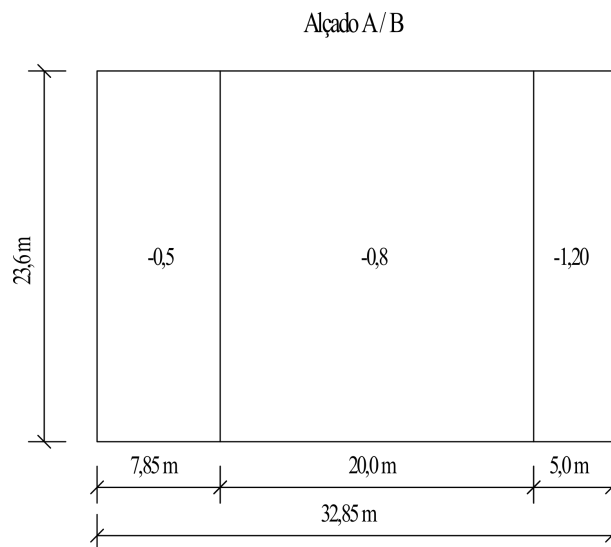


Figura 7.15 Coeficientes de pressão exteriores nos alçados laterais segundo W_y .

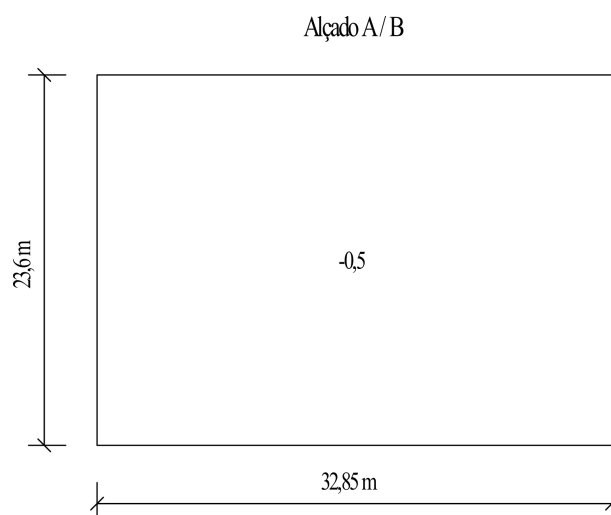


Figura 7.16 Coeficientes de pressão exteriores nos alçados laterais segundo W_{yy} .

No caso dos alçados de topo a direção mais desfavorável é a direção x . Na figura 7.17 indicam-se os coeficientes de pressão exteriores calculados para os alçados de topo C e D.

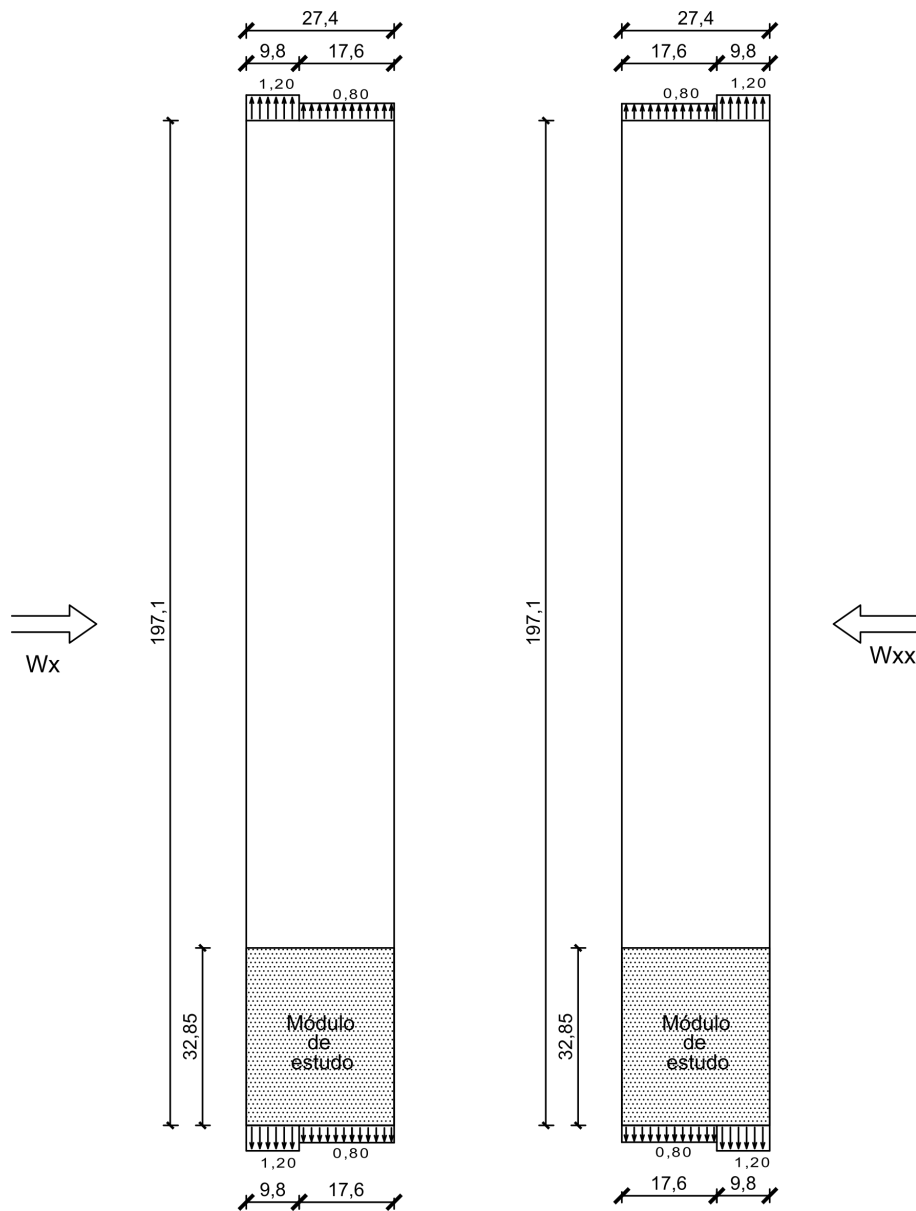


Figura 7.17 Coeficientes de pressão exterior nos alçados de topo segundo W_x e W_{xx} .

Nas figuras 7.18 e 7.19 indicam-se também os valores dos coeficientes de pressão exterior nos alçados de topo C e D segundo as componentes W_x e W_{xx} .

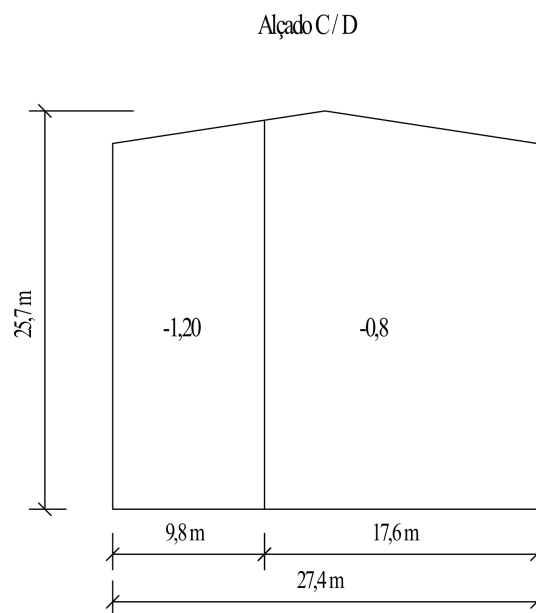


Figura 7.18 Coeficientes de pressão exteriores nos alçados C e D segundo W_x .

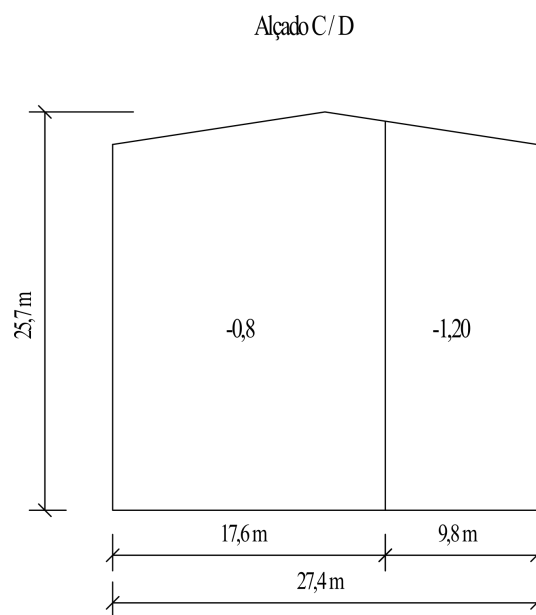


Figura 7.19 Coeficientes de pressão exteriores nos alçados C e D segundo W_{xx} .

7.5.4 Cálculo do Coeficiente Estrutural

Uma vez que a estrutura deste hangar não se encontra dentro dos casos em que o coeficiente estrutural pode ser considerado igual à unidade, procedeu-se à sua determinação, através da metodologia descrita na cláusula 6.3.1 do EC1-1-4. Para esse efeito considerou-se que a altura máxima do edifício corresponde à cumeeira da cobertura (25,7m). Na tabela 7.9 indicam-se todos os parâmetros necessários à determinação deste coeficiente.

Tabela 7.9 Cálculo do Coeficiente Estrutural.

Dados de entrada		Coeficiente Estrutural	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
h	25,7	z_s	15,42
L_t	300,0	$L(z_s)$	53,88
z_t	200,0	$F_i(z, n)$	1,74
Z_{min}	10,0	$S_L(z, n)$	0,09
Z_0	1,0	B^2	0,53
α	0,7	η_b	4,06
$n_{1,x}$	0,6	η_h	3,81
k_r	0,2	R_b	0,22
v_b	30,0	R_h	0,23
$c_r(z_s)$	0,6	δ_s	0,08
$vm(z_s)$	19,2	δ_a	0,00
b	27,4	δ_d	0,00
C_f	4,0	δ	0,08
μ_e	0,0	R^2	0,27
m_e	0,0	ν	0,36
T	600,0	k_p	3,32
		$I_v(z_s)$	0,37
		C_s	0,80
		C_d	1,11
		$C_s C_d$	0,89

7.5.5 Cálculo das ações do vento F_w nas madres da cobertura

Na cobertura existem zonas com diferentes coeficientes de pressão exteriores que conduzi-ram a diferentes valores de carregamento nas madres ao longo dos seus vãos.

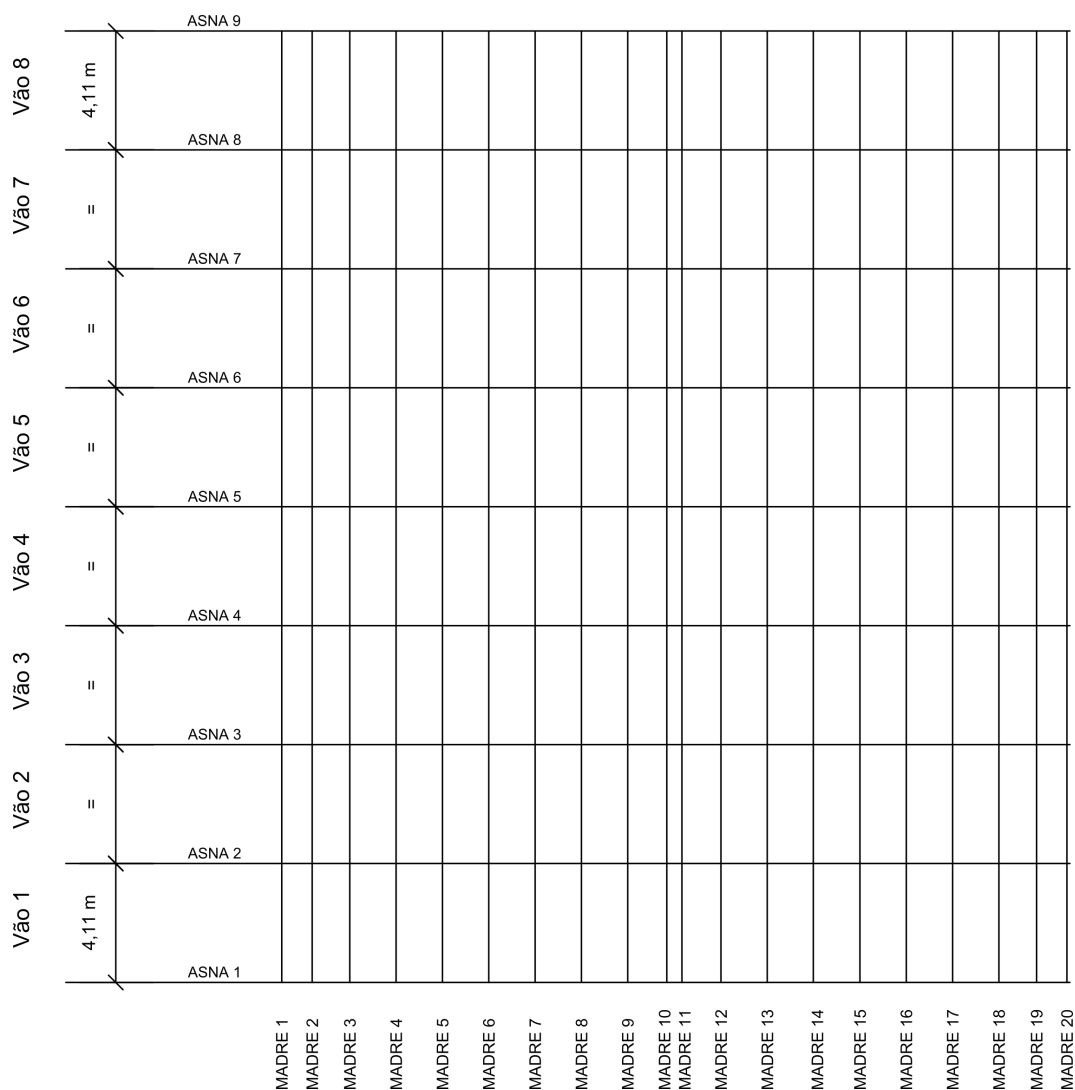


Figura 7.20 Identificação das asnas, madres e vãos.

a) Forças do vento nas madres de cobertura - direção x

Nas tabelas 7.10 e 7.11 resumem-se os valores calculados pelas diferentes ações do vento devido ao efeito da pressão interna positiva e negativa em todas as madres da cobertura.

Tabela 7.10 Forças resultantes de pressão interna positiva ($c_{pi} = +0,2$).

Madre	Zona	Vão	Comprimento (m)	Largura (m)	q_p (kN/m^2)	c_{pi}	w_i (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,982	0,2	0,1964	0,48
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,982	0,2	0,1964	1,01
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,982	0,2	0,1964	1,18
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,982	0,2	0,1964	0,48
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,982	0,2	0,1964	1,01
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,982	0,2	0,1964	1,18
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,982	0,2	0,1964	0,55
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,982	0,2	0,1964	0,55
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,982	0,2	0,1964	1,30
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,982	0,2	0,1964	1,18
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,982	0,2	0,1964	1,01
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,982	0,2	0,1964	0,48

Tabela 7.11 Forças resultantes de pressão interna negativa ($c_{pi} = -0,3$).

Madre	Zona	Vão	Comprimento (m)	Largura (m)	q_p (kN/m^2)	c_{pi}	w_i (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,98	-0,30	-0,29	-0,72
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,98	-0,30	-0,29	-1,52
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,98	-0,30	-0,29	-1,77
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,98	-0,30	-0,29	-0,72
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,98	-0,30	-0,29	-1,52
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,98	-0,30	-0,29	-1,77
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,98	-0,30	-0,29	-0,82
11	I	V1-V8	4,11	0,68	0,98	-0,30	-0,29	-0,82
12	I	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
13	I	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
14	J	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
15	J	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
16	J	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
17	J	V1-V8	4,11	1,62	0,98	-0,30	-0,29	-1,96
18	J	V1-V8	4,11	1,47	0,98	-0,30	-0,29	-1,77
19	J	V1-V8	4,11	1,25	0,98	-0,30	-0,29	-1,52
20	J	V1-V8	4,11	0,60	0,98	-0,30	-0,29	-0,72

Na determinação das forças do vento nas madres de cobertura segundo x foi necessário combinar os valores de c_{pe} , para cada um dos casos referidos em 1.4.2 a), com os valores de c_{pi} (+0,2 e -0,3) por forma a identificar as situações mais desfavoráveis.

Nas tabelas seguintes apresentam-se cada uma dessas situações tomando como exemplo a componente W_x . Não se apresentam os valores segundo W_{xx} uma vez que a estrutura é simétrica.

Caso 1a - Pressão exterior referente ao caso 1 combinada com pressão interior positiva (+0,2).

Tabela 7.12 Forças exteriores - Caso 1.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m ²)	w_e (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m ²)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-3,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-6,57
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-7,69
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-8,48
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-2,31
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-4,86
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-5,69
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-6,27
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-1,25
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-1,76
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,84
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,43
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-1,16

Tabela 7.13 Caso 1a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m ²)	$F_{w,i}$ (kN/m ²)	F_w (kN/m ²)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	-3,13	0,48	-3,61	-0,88	-0,87	sucção
2	F	V1-V3	-6,57	1,01	-7,59	-1,85	-1,83	sucção
3	F	V1-V3	-7,69	1,18	-8,87	-2,16	-2,14	sucção
4	F	V1-V3	-8,48	1,30	-9,79	-2,38	-2,36	sucção
1	G	V4-V8	-2,31	0,48	-2,80	-0,68	-0,67	sucção
2	G	V4-V8	-4,86	1,01	-5,87	-1,43	-1,42	sucção
3	G	V4-V8	-5,69	1,18	-6,87	-1,67	-1,66	sucção
4	G	V4-V8	-6,27	1,30	-7,58	-1,85	-1,83	sucção
5	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
6	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
7	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
8	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
9	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
10	H	V1-V8	-1,25	0,55	-1,80	-0,44	-0,43	sucção
11	J	V1-V8	-1,76	0,55	-2,31	-0,56	-0,56	sucção
12	J	V1-V8	-4,18	1,30	-5,49	-1,34	-1,32	sucção
13	J	V1-V8	-4,18	1,30	-5,49	-1,34	-1,32	sucção
14	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
15	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
16	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
17	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
18	I	V1-V8	-2,84	1,18	-4,02	-0,98	-0,97	sucção
19	I	V1-V8	-2,43	1,01	-3,44	-0,84	-0,83	sucção
20	I	V1-V8	-1,16	0,48	-1,64	-0,40	-0,40	sucção

Caso 1b - Pressão exterior referente ao caso 1 combinada com pressão interior negativa (-0,3).

Tabela 7.14 Forças exteriores - Caso 1.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-3,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-6,57
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-7,69
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-8,48
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-2,31
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-4,86
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-5,69
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-6,27
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-1,25
11	I	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-1,76
12	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
13	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
14	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
15	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
16	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
17	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
18	J	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,84
19	J	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,43
20	J	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-1,16

Tabela 7.15 Caso 1b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	-3,13	-0,72	-2,41	-0,59	-0,58	sucção
2	F	V1-V3	-6,57	-1,52	-5,06	-1,23	-1,22	sucção
3	F	V1-V3	-7,69	-1,77	-5,91	-1,44	-1,43	sucção
4	F	V1-V3	-8,48	-1,96	-6,53	-1,59	-1,57	sucção
1	G	V4-V8	-2,31	-0,72	-1,59	-0,39	-0,38	sucção
2	G	V4-V8	-4,86	-1,52	-3,35	-0,82	-0,81	sucção
3	G	V4-V8	-5,69	-1,77	-3,91	-0,95	-0,94	sucção
4	G	V4-V8	-6,27	-1,96	-4,32	-1,05	-1,04	sucção
5	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
6	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
7	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
8	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
9	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
10	H	V1-V8	-1,25	-0,82	-0,42	-0,10	-0,10	sucção
11	I	V1-V8	-1,76	-0,82	-0,94	-0,23	-0,23	sucção
12	I	V1-V8	-4,18	-1,96	-2,23	-0,54	-0,54	sucção
13	I	V1-V8	-4,18	-1,96	-2,23	-0,54	-0,54	sucção
14	J	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
15	J	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
16	J	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
17	J	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
18	J	V1-V8	-2,84	-1,77	-1,07	-0,26	-0,26	sucção
19	J	V1-V8	-2,43	-1,52	-0,92	-0,22	-0,22	sucção
20	J	V1-V8	-1,16	-0,72	-0,44	-0,11	-0,11	sucção

Caso 2a - Pressão exterior referente ao caso 2 combinada com pressão interior positiva (+0,2).

Tabela 7.16 Forças exteriores - Caso 2.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m ²)	w_e (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m ²)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-3,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-6,57
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-7,69
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-8,48
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-2,31
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-4,86
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-5,69
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-6,27
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-1,25
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,03
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,21
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,89
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-0,90

Tabela 7.17 Caso 2a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m ²)	$F_{w,i}$ (kN/m ²)	F_w (kN/m ²)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	-3,13	0,48	-3,61	-0,88	-0,87	sucção
2	F	V1-V3	-6,57	1,01	-7,59	-1,85	-1,83	sucção
3	F	V1-V3	-7,69	1,18	-8,87	-2,16	-2,14	sucção
4	F	V1-V3	-8,48	1,30	-9,79	-2,38	-2,36	sucção
1	G	V4-V8	-2,31	0,48	-2,80	-0,68	-0,67	sucção
2	G	V4-V8	-4,86	1,01	-5,87	-1,43	-1,42	sucção
3	G	V4-V8	-5,69	1,18	-6,87	-1,67	-1,66	sucção
4	G	V4-V8	-6,27	1,30	-7,58	-1,85	-1,83	sucção
5	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
6	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
7	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
8	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
9	H	V1-V8	-2,96	1,30	-4,27	-1,04	-1,03	sucção
10	H	V1-V8	-1,25	0,55	-1,80	-0,44	-0,43	sucção
11	J	V1-V8	-1,03	0,55	-1,58	-0,38	-0,38	sucção
12	J	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
13	J	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
14	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
15	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
16	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
17	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
18	I	V1-V8	-2,21	1,18	-3,39	-0,83	-0,82	sucção
19	I	V1-V8	-1,89	1,01	-2,90	-0,71	-0,70	sucção
20	I	V1-V8	-0,90	0,48	-1,38	-0,34	-0,33	sucção

Caso 2b - Pressão exterior referente ao caso 2 combinada com pressão interior negativa (-0,3).

Tabela 7.18 Forças exteriores - Caso 2.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m ²)	w_e (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m ²)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-3,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-6,57
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-7,69
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	-1,46	0,98	-1,43	-8,48
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-2,31
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-4,86
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-5,69
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	-1,08	0,98	-1,06	-6,27
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-2,96
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,51	0,98	-0,50	-1,25
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,03
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,21
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,89
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-0,90

Tabela 7.19 Caso 2b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m ²)	$F_{w,i}$ (kN/m ²)	F_w (kN/m ²)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	-3,13	-0,72	-2,41	-0,59	-0,58	sucção
2	F	V1-V3	-6,57	-1,52	-5,06	-1,23	-1,22	sucção
3	F	V1-V3	-7,69	-1,77	-5,91	-1,44	-1,43	sucção
4	F	V1-V3	-8,48	-1,96	-6,53	-1,59	-1,57	sucção
1	G	V4-V8	-2,31	-0,72	-1,59	-0,39	-0,38	sucção
2	G	V4-V8	-4,86	-1,52	-3,35	-0,82	-0,81	sucção
3	G	V4-V8	-5,69	-1,77	-3,91	-0,95	-0,94	sucção
4	G	V4-V8	-6,27	-1,96	-4,32	-1,05	-1,04	sucção
5	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
6	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
7	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
8	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
9	H	V1-V8	-2,96	-1,96	-1,01	-0,25	-0,24	sucção
10	H	V1-V8	-1,25	-0,82	-0,42	-0,10	-0,10	sucção
11	J	V1-V8	-1,03	-0,82	-0,20	-0,05	-0,05	sucção
12	J	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
13	J	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
14	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
15	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
16	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
17	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
18	I	V1-V8	-2,21	-1,77	-0,44	-0,11	-0,11	sucção
19	I	V1-V8	-1,89	-1,52	-0,38	-0,09	-0,09	sucção
20	I	V1-V8	-0,90	-0,72	-0,18	-0,04	-0,04	sucção

Caso 3a - Pressão exterior referente ao caso 3 combinada com pressão interior positiva (+0,2).

Tabela 7.20 Forças exteriores - Caso 3.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m ²)	w_e (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m ²)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	0,06	0,98	0,06	0,15
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-1,76
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,84
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,43
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-1,16

Tabela 7.21 Caso 3a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m ²)	$F_{w,i}$ (kN/m ²)	F_w (kN/m ²)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	0,13	0,48	-0,35	-0,09	-0,08	sucção
2	F	V1-V3	0,27	1,01	-0,74	-0,18	-0,18	sucção
3	F	V1-V3	0,32	1,18	-0,87	-0,21	-0,21	sucção
4	F	V1-V3	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
1	G	V4-V8	0,13	0,48	-0,35	-0,09	-0,08	sucção
2	G	V4-V8	0,27	1,01	-0,74	-0,18	-0,18	sucção
3	G	V4-V8	0,32	1,18	-0,87	-0,21	-0,21	sucção
4	G	V4-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
5	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
6	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
7	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
8	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
9	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
10	H	V1-V8	0,15	0,55	-0,40	-0,10	-0,10	sucção
11	J	V1-V8	-1,76	0,55	-2,31	-0,56	-0,56	sucção
12	J	V1-V8	-4,18	1,30	-5,49	-1,34	-1,32	sucção
13	J	V1-V8	-4,18	1,30	-5,49	-1,34	-1,32	sucção
14	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
15	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
16	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
17	I	V1-V8	-3,14	1,30	-4,44	-1,08	-1,07	sucção
18	I	V1-V8	-2,84	1,18	-4,02	-0,98	-0,97	sucção
19	I	V1-V8	-2,43	1,01	-3,44	-0,84	-0,83	sucção
20	I	V1-V8	-1,16	0,48	-1,64	-0,40	-0,40	sucção

Caso 3b - Pressão exterior referente ao caso 3 combinada com pressão interior negativa (-0,3).

Tabela 7.22 Forças exteriores - Caso 3.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	0,06	0,98	0,06	0,15
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-1,76
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,72	0,98	-0,71	-4,18
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-3,14
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,84
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-2,43
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,54	0,98	-0,53	-1,16

Tabela 7.23 Caso 3b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	0,13	-0,72	0,85	0,21	0,20	sobrepressão
2	F	V1-V3	0,27	-1,52	1,79	0,43	0,43	sobrepressão
3	F	V1-V3	0,32	-1,77	2,09	0,51	0,50	sobrepressão
4	F	V1-V3	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
1	G	V4-V8	0,13	-0,72	0,85	0,21	0,20	sobrepressão
2	G	V4-V8	0,27	-1,52	1,79	0,43	0,43	sobrepressão
3	G	V4-V8	0,32	-1,77	2,09	0,51	0,50	sobrepressão
4	G	V4-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
5	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
6	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
7	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
8	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
9	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
10	H	V1-V8	0,15	-0,82	0,97	0,24	0,23	sobrepressão
11	J	V1-V8	-1,76	-0,82	-0,94	-0,23	-0,23	sucção
12	J	V1-V8	-4,18	-1,96	-2,23	-0,54	-0,54	sucção
13	J	V1-V8	-4,18	-1,96	-2,23	-0,54	-0,54	sucção
14	I	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
15	I	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
16	I	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
17	I	V1-V8	-3,14	-1,96	-1,18	-0,29	-0,28	sucção
18	I	V1-V8	-2,84	-1,77	-1,07	-0,26	-0,26	sucção
19	I	V1-V8	-2,43	-1,52	-0,92	-0,22	-0,22	sucção
20	I	V1-V8	-1,16	-0,72	-0,44	-0,11	-0,11	sucção

Caso 4a - Pressão exterior referente ao caso 4 combinada com pressão interior positiva (+0,2).

Tabela 7.24 Forças exteriores - Caso 4.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	0,06	0,98	0,06	0,15
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,03
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,21
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,89
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-0,90

Tabela 7.25 Caso 4a - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	0,13	0,48	-0,35	-0,09	-0,08	sucção
2	F	V1-V3	0,27	1,01	-0,74	-0,18	-0,18	sucção
3	F	V1-V3	0,32	1,18	-0,87	-0,21	-0,21	sucção
4	F	V1-V3	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
1	G	V4-V8	0,13	0,48	-0,35	-0,09	-0,08	sucção
2	G	V4-V8	0,27	1,01	-0,74	-0,18	-0,18	sucção
3	G	V4-V8	0,32	1,18	-0,87	-0,21	-0,21	sucção
4	G	V4-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
5	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
6	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
7	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
8	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
9	H	V1-V8	0,35	1,30	-0,96	-0,23	-0,23	sucção
10	H	V1-V8	0,15	0,55	-0,40	-0,10	-0,10	sucção
11	J	V1-V8	-1,03	0,55	-1,58	-0,38	-0,38	sucção
12	J	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
13	J	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
14	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
15	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
16	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
17	I	V1-V8	-2,44	1,30	-3,74	-0,91	-0,90	sucção
18	I	V1-V8	-2,21	1,18	-3,39	-0,83	-0,82	sucção
19	I	V1-V8	-1,89	1,01	-2,90	-0,71	-0,70	sucção
20	I	V1-V8	-0,90	0,48	-1,38	-0,34	-0,33	sucção

Caso 4b - Pressão exterior referente ao caso 4 combinada com pressão interior negativa (-0,3).

Tabela 7.26 Forças exteriores - Caso 4.

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	F	V1-V3	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	F	V1-V3	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	F	V1-V3	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	F	V1-V3	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
1	G	V4-V8	4,11	0,60	0,89	0,06	0,98	0,06	0,13
2	G	V4-V8	4,11	1,25	0,89	0,06	0,98	0,06	0,27
3	G	V4-V8	4,11	1,47	0,89	0,06	0,98	0,06	0,32
4	G	V4-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
6	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
7	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
8	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
9	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	0,06	0,98	0,06	0,35
10	H	V1-V8	4,11	0,68	0,89	0,06	0,98	0,06	0,15
11	J	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,03
12	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
13	J	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,44
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-2,21
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-1,89
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,42	0,98	-0,41	-0,90

Tabela 7.27 Caso 4b - Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura.

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1-V3	0,13	-0,72	0,85	0,21	0,20	sobrepressão
2	F	V1-V3	0,27	-1,52	1,79	0,43	0,43	sobrepressão
3	F	V1-V3	0,32	-1,77	2,09	0,51	0,50	sobrepressão
4	F	V1-V3	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
1	G	V4-V8	0,13	-0,72	0,85	0,21	0,20	sobrepressão
2	G	V4-V8	0,27	-1,52	1,79	0,43	0,43	sobrepressão
3	G	V4-V8	0,32	-1,77	2,09	0,51	0,50	sobrepressão
4	G	V4-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
5	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
6	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
7	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
8	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
9	H	V1-V8	0,35	-1,96	2,30	0,56	0,56	sobrepressão
10	H	V1-V8	0,15	-0,82	0,97	0,24	0,23	sobrepressão
11	J	V1-V8	-1,03	-0,82	-0,20	-0,05	-0,05	sucção
12	J	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
13	J	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
14	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
15	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
16	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
17	I	V1-V8	-2,44	-1,96	-0,48	-0,12	-0,12	sucção
18	I	V1-V8	-2,21	-1,77	-0,44	-0,11	-0,11	sucção
19	I	V1-V8	-1,89	-1,52	-0,38	-0,09	-0,09	sucção
20	I	V1-V8	-0,90	-0,72	-0,18	-0,04	-0,04	sucção

Análise dos resultados obtidos segundo a direção x

A tabela 7.28 resume todas as combinações efetuadas e permite a identificação das situações mais desfavoráveis de todos os casos estudados.

Tabela 7.28 Resultados para cada um dos casos estudados.

Valores de F_w para cada um dos casos estudados (kN/m)											
Zona	Posição	Madre	Vão	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
				a	b	a	b	a	b	a	b
F	Barlavento	1	V1-V3	-0,87	-0,58	-0,87	-0,58	-0,08	0,20	-0,08	0,20
F	Barlavento	2	V1-V3	-1,83	-1,22	-1,83	-1,22	-0,18	0,43	-0,18	0,43
F	Barlavento	3	V1-V3	-2,14	-1,43	-2,14	-1,43	-0,21	0,50	-0,21	0,50
F	Barlavento	4	V1-V3	-2,36	-1,57	-2,36	-1,57	-0,23	0,56	-0,23	0,56
G	Barlavento	1	V4-V8	-0,67	-0,38	-0,67	-0,38	-0,08	0,20	-0,08	0,20
G	Barlavento	2	V4-V8	-1,42	-0,81	-1,42	-0,81	-0,18	0,43	-0,18	0,43
G	Barlavento	3	V4-V8	-1,66	-0,94	-1,66	-0,94	-0,21	0,50	-0,21	0,50
G	Barlavento	4	V4-V8	-1,83	-1,04	-1,83	-1,04	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	5	V1-V8	-1,03	-0,24	-1,03	-0,24	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	6	V1-V8	-1,03	-0,24	-1,03	-0,24	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	7	V1-V8	-1,03	-0,24	-1,03	-0,24	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	8	V1-V8	-1,03	-0,24	-1,03	-0,24	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	9	V1-V8	-1,03	-0,24	-1,03	-0,24	-0,23	0,56	-0,23	0,56
H	Barlavento	10	V1-V8	-0,43	-0,10	-0,43	-0,10	-0,10	0,23	-0,10	0,23
I	Sotavento	11	V1-V8	-0,56	-0,23	-0,38	-0,05	-0,56	-0,23	-0,38	-0,05
I	Sotavento	12	V1-V8	-1,32	-0,54	-0,90	-0,12	-1,32	-0,54	-0,90	-0,12
I	Sotavento	13	V1-V8	-1,32	-0,54	-0,90	-0,12	-1,32	-0,54	-0,90	-0,12
J	Sotavento	14	V1-V8	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12
J	Sotavento	15	V1-V8	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12
J	Sotavento	16	V1-V8	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12
J	Sotavento	17	V1-V8	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12	-1,07	-0,28	-0,90	-0,12
J	Sotavento	18	V1-V8	-0,97	-0,26	-0,82	-0,11	-0,97	-0,26	-0,82	-0,11
J	Sotavento	19	V1-V8	-0,83	-0,22	-0,70	-0,09	-0,83	-0,22	-0,70	-0,09
J	Sotavento	20	V1-V8	-0,40	-0,11	-0,33	-0,04	-0,40	-0,11	-0,33	-0,04

Analisando os resultados segundo W_x verifica-se que para os casos 1 e 2 os valores são sempre negativos (sucção) em toda a cobertura. Torna-se, pois, fácil identificar o caso 1a como sendo o mais condicionante. Relativamente aos casos 3 e 4 observa-se que existem valores positivos (sobrepessão) e negativos (sucção) em diferentes zonas da cobertura, pelo que foi necessário escolher os dois piores cenários para estes dois casos. Conclui-se, então que os valores mais prejudiciais respeitam aos casos 3a e 3b.

b) Forças do vento nas madres de cobertura na direção y Forças exteriores - W_y Tabela 7.29 Forças exteriores nas madres de cobertura - W_y .

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	F	V1	4,11	0,60	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-3,24
1	H	V2-V6	4,11	0,60	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-2,57
1	I	V7-V8	4,11	0,60	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,22
2	F	V1	4,11	1,25	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-6,80
2	H	V2-V6	4,11	1,25	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-5,40
2	I	V7-V8	4,11	1,25	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-2,57
3	F	V1	4,11	1,47	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-7,95
3	H	V2-V6	4,11	1,47	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,32
3	I	V7-V8	4,11	1,47	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,00
4	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
4	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
4	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
5	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
5	H	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
5	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
6	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
6	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
6	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
7	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
7	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
7	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
8	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
8	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
8	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
9	G	V1	4,11	1,62	0,89	-1,30	0,98	-1,28	-7,55
9	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
9	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
10	G	V1	4,11	0,68	0,89	-1,30	0,98	-1,28	-3,18
10	H	V2-V6	4,11	0,68	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-2,94
10	I	V7-V8	4,11	0,68	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,40
11	G	V1	4,11	0,68	0,89	-1,30	0,98	-1,28	-3,18
11	H	V2-V6	4,11	0,68	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-2,94
11	I	V7-V8	4,11	0,68	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,40
12	G	V1	4,11	1,62	0,89	-1,30	0,98	-1,28	-7,55
12	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
12	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
13	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
13	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
13	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
14	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
14	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
14	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
15	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
15	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
15	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
16	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
16	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
16	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
17	F	V1	4,11	1,62	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-8,77
17	H	V2-V6	4,11	1,62	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,97
17	I	V7-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
18	F	V1	4,11	1,47	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-7,95
18	H	V2-V6	4,11	1,47	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-6,32
18	I	V7-V8	4,11	1,47	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,00
19	F	V1	4,11	1,25	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-6,80
19	H	V2-V6	4,11	1,25	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-5,40
19	I	V7-V8	4,11	1,25	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-2,57
20	F	V1	4,11	0,60	0,89	-1,51	0,98	-1,48	-3,24
20	H	V2-V6	4,11	0,60	0,89	-1,20	0,98	-1,18	-2,57
20	I	V7-V8	4,11	0,60	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,22

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) - W_y Tabela 7.30 Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_y .

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1	-3,24	0,48	-3,72	-0,91	-0,90	sucção
1	H	V2-V6	-2,57	0,48	-3,05	-0,74	-0,74	sucção
1	I	V7-V8	-1,22	0,48	-1,70	-0,41	-0,41	sucção
2	F	V1	-6,80	1,01	-7,81	-1,90	-1,88	sucção
2	H	V2-V6	-5,40	1,01	-6,41	-1,56	-1,55	sucção
2	I	V7-V8	-2,57	1,01	-3,58	-0,87	-0,86	sucção
3	F	V1	-7,95	1,18	-9,13	-2,22	-2,20	sucção
3	H	V2-V6	-6,32	1,18	-7,50	-1,83	-1,81	sucção
3	I	V7-V8	-3,00	1,18	-4,18	-1,02	-1,01	sucção
4	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
4	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
4	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
5	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
5	H	V1-V8	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
5	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
6	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
6	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
6	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
7	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
7	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
7	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
8	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
8	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
8	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
9	G	V1	-7,55	1,30	-8,86	-2,16	-2,14	sucção
9	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
9	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
10	G	V1	-3,18	0,55	-3,73	-0,91	-0,90	sucção
10	H	V2-V6	-2,94	0,55	-3,49	-0,85	-0,84	sucção
10	I	V7-V8	-1,40	0,55	-1,95	-0,47	-0,47	sucção
11	G	V1	-3,18	0,55	-3,73	-0,91	-0,90	sucção
11	H	V2-V6	-2,94	0,55	-3,49	-0,85	-0,84	sucção
11	I	V7-V8	-1,40	0,55	-1,95	-0,47	-0,47	sucção
12	G	V1	-7,55	1,30	-8,86	-2,16	-2,14	sucção
12	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
12	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
13	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
13	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
13	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
14	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
14	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
14	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
15	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
15	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
15	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
16	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
16	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
16	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
17	F	V1	-8,77	1,30	-10,08	-2,45	-2,43	sucção
17	H	V2-V6	-6,97	1,30	-8,27	-2,01	-2,00	sucção
17	I	V7-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
18	F	V1	-7,95	1,18	-9,13	-2,22	-2,20	sucção
18	H	V2-V6	-6,32	1,18	-7,50	-1,83	-1,81	sucção
18	I	V7-V8	-3,00	1,18	-4,18	-1,02	-1,01	sucção
19	F	V1	-6,80	1,01	-7,81	-1,90	-1,88	sucção
19	H	V2-V6	-5,40	1,01	-6,41	-1,56	-1,55	sucção
19	I	V7-V8	-2,57	1,01	-3,58	-0,87	-0,86	sucção
20	F	V1	-3,24	0,48	-3,72	-0,91	-0,90	sucção
20	H	V2-V6	-2,57	0,48	-3,05	-0,74	-0,74	sucção
20	I	V7-V8	-1,22	0,48	-1,70	-0,41	-0,41	sucção

Pressão exterior combinada com pressão interior negativa (-0,3) - W_y Tabela 7.31 Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_y .

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	F	V1	-3,24	-0,72	-2,51	-0,61	-0,61	sucção
1	H	V2-V6	-2,57	-0,72	-1,85	-0,45	-0,45	sucção
1	I	V7-V8	-1,22	-0,72	-0,50	-0,12	-0,12	sucção
2	F	V1	-6,80	-1,52	-5,28	-1,29	-1,28	sucção
2	H	V2-V6	-5,40	-1,52	-3,89	-0,95	-0,94	sucção
2	I	V7-V8	-2,57	-1,52	-1,05	-0,26	-0,25	sucção
3	F	V1	-7,95	-1,77	-6,18	-1,50	-1,49	sucção
3	H	V2-V6	-6,32	-1,77	-4,55	-1,11	-1,10	sucção
3	I	V7-V8	-3,00	-1,77	-1,23	-0,30	-0,30	sucção
4	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
4	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
4	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
5	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
5	H	V1-V8	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
5	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
6	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
6	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
6	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
7	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
7	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
7	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
8	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
8	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
8	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
9	G	V1	-7,55	-1,96	-5,60	-1,36	-1,35	sucção
9	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
9	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
10	G	V1	-3,18	-0,82	-2,36	-0,57	-0,57	sucção
10	H	V2-V6	-2,94	-0,82	-2,11	-0,51	-0,51	sucção
10	I	V7-V8	-1,40	-0,82	-0,57	-0,14	-0,14	sucção
11	G	V1	-3,18	-0,82	-2,36	-0,57	-0,57	sucção
11	H	V2-V6	-2,94	-0,82	-2,11	-0,51	-0,51	sucção
11	I	V7-V8	-1,40	-0,82	-0,57	-0,14	-0,14	sucção
12	G	V1	-7,55	-1,96	-5,60	-1,36	-1,35	sucção
12	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
12	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
13	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
13	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
13	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
14	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
14	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
14	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
15	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
15	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
15	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
16	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
16	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
16	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
17	F	V1	-8,77	-1,96	-6,82	-1,66	-1,65	sucção
17	H	V2-V6	-6,97	-1,96	-5,02	-1,22	-1,21	sucção
17	I	V7-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
18	F	V1	-7,95	-1,77	-6,18	-1,50	-1,49	sucção
18	H	V2-V6	-6,32	-1,77	-4,55	-1,11	-1,10	sucção
18	I	V7-V8	-3,00	-1,77	-1,23	-0,30	-0,30	sucção
19	F	V1	-6,80	-1,52	-5,28	-1,29	-1,28	sucção
19	H	V2-V6	-5,40	-1,52	-3,89	-0,95	-0,94	sucção
19	I	V7-V8	-2,57	-1,52	-1,05	-0,26	-0,25	sucção
20	F	V1	-3,24	-0,72	-2,51	-0,61	-0,61	sucção
20	H	V2-V6	-2,57	-0,72	-1,85	-0,45	-0,45	sucção
20	I	V7-V8	-1,22	-0,72	-0,50	-0,12	-0,12	sucção

Forças exteriores - W_{yy} Tabela 7.32 Forças exteriores nas madres de cobertura - W_{yy}

Madre	Zona	Vão	Comp. (m)	Larg. (m)	$C_s C_d$	c_{pe}	q_p (kN/m^2)	w_e (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m^2)
1	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,22
2	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-2,57
3	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,00
4	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
5	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
6	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
7	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
8	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
9	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
10	I	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,40
11	I	V1-V8	4,11	0,68	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,40
12	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
13	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
14	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
15	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
16	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
17	I	V1-V8	4,11	1,62	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,31
18	I	V1-V8	4,11	1,47	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-3,00
19	I	V1-V8	4,11	1,25	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-2,57
20	I	V1-V8	4,11	0,60	0,89	-0,57	0,98	-0,56	-1,22

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) - W_{yy} Tabela 7.33 Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_{yy} .

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	I	V1-V8	-1,22	0,48	-1,70	-0,41	-0,41	sucção
2	I	V1-V8	-2,57	1,01	-3,58	-0,87	-0,86	sucção
3	I	V1-V8	-3,00	1,18	-4,18	-1,02	-1,01	sucção
4	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
5	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
6	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
7	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
8	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
9	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
10	I	V1-V8	-1,40	0,55	-1,95	-0,47	-0,47	sucção
11	I	V1-V8	-1,40	0,55	-1,95	-0,47	-0,47	sucção
12	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
13	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
14	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
15	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
16	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
17	I	V1-V8	-3,31	1,30	-4,62	-1,12	-1,11	sucção
18	I	V1-V8	-3,00	1,18	-4,18	-1,02	-1,01	sucção
19	I	V1-V8	-2,57	1,01	-3,58	-0,87	-0,86	sucção
20	I	V1-V8	-1,22	0,48	-1,70	-0,41	-0,41	sucção

Pressão exterior combinada com pressão interior negativa (-0,3) - W_{yy} **Tabela 7.34** Resultante das forças exteriores e interiores nas madres de cobertura - W_{yy} .

Madre	Zona	Vão	$F_{w,e}$ (kN/m^2)	$F_{w,i}$ (kN/m^2)	F_w (kN/m^2)	F_w (kN/m)	F_w vertical (kN/m)	Efeito
1	I	V1-V8	-1,22	-0,72	-0,50	-0,12	-0,12	sucção
2	I	V1-V8	-2,57	-1,52	-1,05	-0,26	-0,25	sucção
3	I	V1-V8	-3,00	-1,77	-1,23	-0,30	-0,30	sucção
4	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
5	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
6	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
7	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
8	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
9	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
10	I	V1-V8	-1,40	-0,82	-0,57	-0,14	-0,14	sucção
11	I	V1-V8	-1,40	-0,82	-0,57	-0,14	-0,14	sucção
12	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
13	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
14	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
15	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
16	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
17	I	V1-V8	-3,31	-1,96	-1,36	-0,33	-0,33	sucção
18	I	V1-V8	-3,00	-1,77	-1,23	-0,30	-0,30	sucção
19	I	V1-V8	-2,57	-1,52	-1,05	-0,26	-0,25	sucção
20	I	V1-V8	-1,22	-0,72	-0,50	-0,12	-0,12	sucção

Análise dos resultados obtidos na direção y

Com base nas tabelas 7.30 e 7.33 conclui-se que para as componentes W_y e W_{yy} os valores mais desfavoráveis resultam da combinação das pressões exteriores com a pressão interior positiva.

c) Forças de atrito na cobertura

Tal como anteriormente referido as forças de atrito apenas afetam o módulo de estudo segundo a componente W_{yy} . Os valores referentes à ação do atrito na cobertura constam na tabela 7.35.

Tabela 7.35 Forças de atrito do vento segundo W_{yy} nas madres.

Madre	Comp. (m)	Larg. (m)	c_{fr}	q_p (kN/m^2)	F_{fr} (kN/m)
1	4,11	0,60	0,04	0,98	0,023
2	4,11	1,25	0,04	0,98	0,049
3	4,11	1,47	0,04	0,98	0,058
4	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
5	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
6	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
7	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
8	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
9	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
10	4,11	0,68	0,04	0,98	0,027
11	4,11	0,68	0,04	0,98	0,027
12	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
13	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
14	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
15	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
16	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
17	4,11	1,62	0,04	0,98	0,063
18	4,11	1,47	0,04	0,98	0,058
19	4,11	1,25	0,04	0,98	0,049
20	4,11	0,60	0,04	0,98	0,023

7.5.6 Cálculo das forças do vento F_w nas madres dos alçados laterais

Na determinação das forças do vento nas madres dos alçados A e B consideraram-se quatro conjuntos de madres, conforme se mostra nas figuras 7.21 e 7.22.

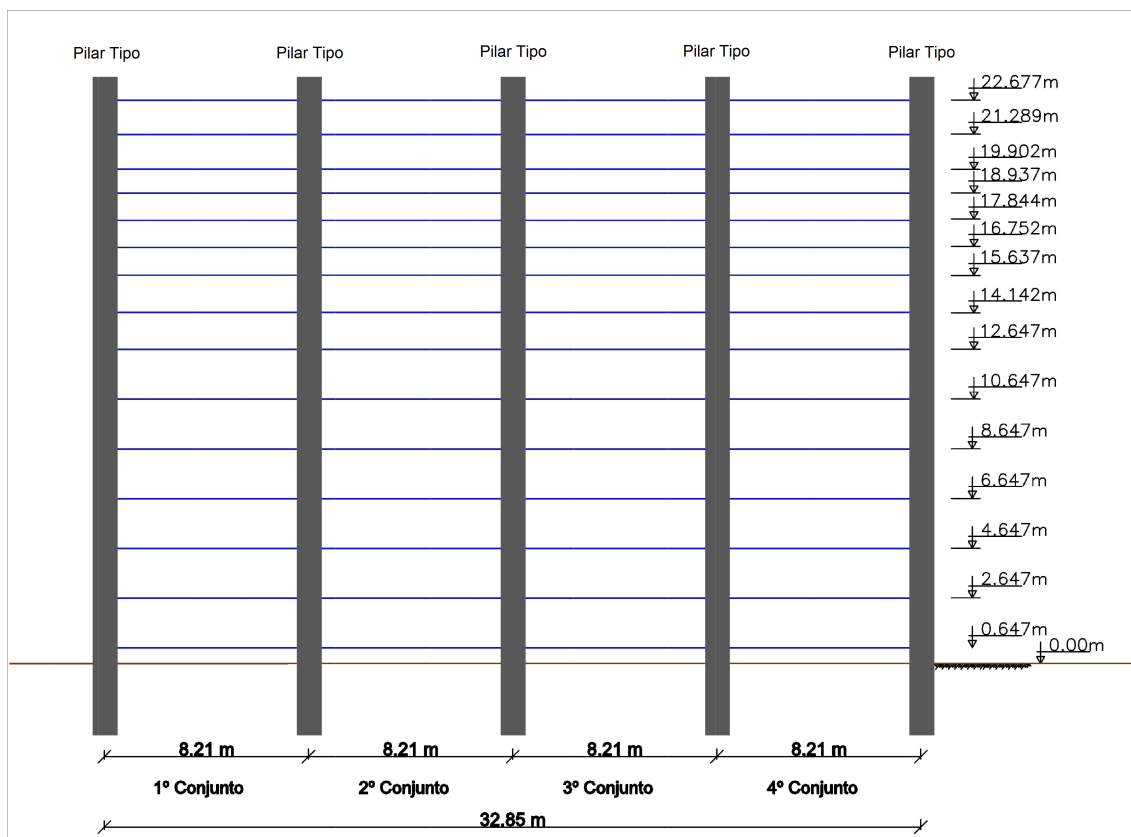


Figura 7.21 Madres do alçado A.

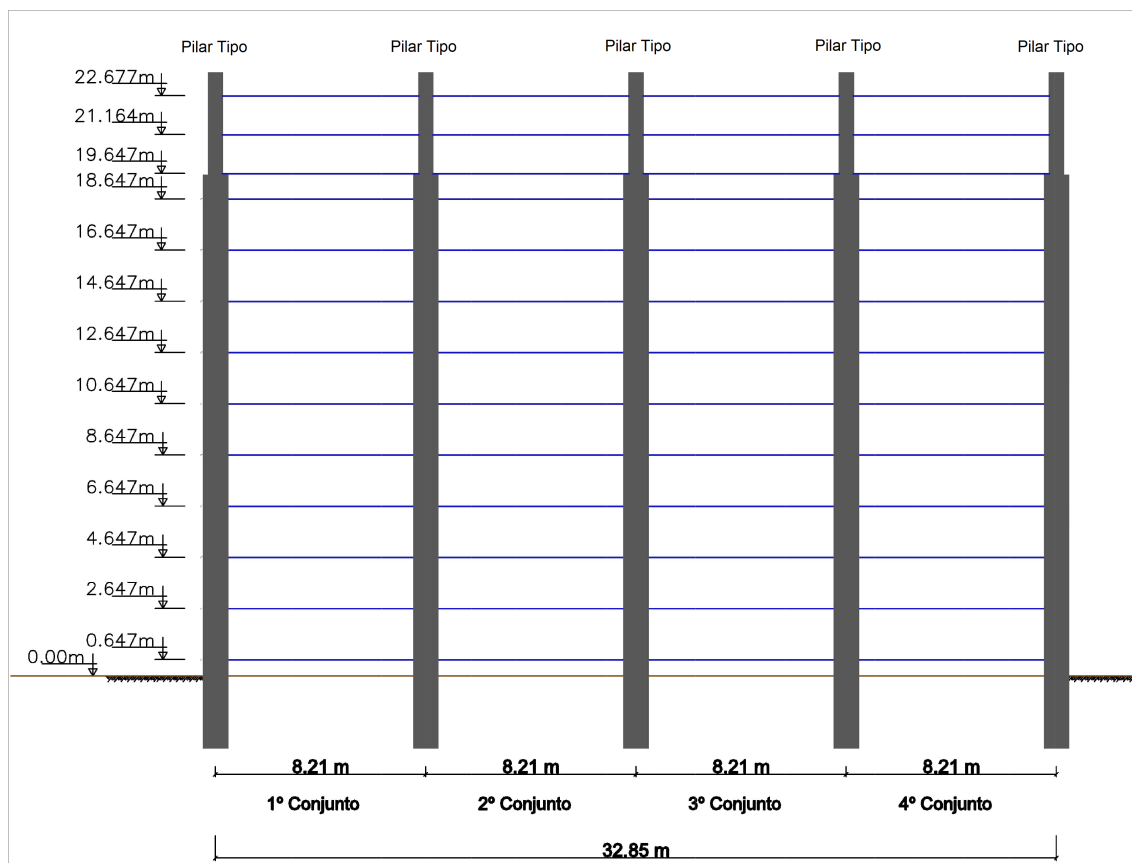


Figura 7.22 Madres do alçado B.

Com base nas diferentes zonas consideradas conclui-se que os coeficientes de pressão exteriores associados aos diferentes conjuntos de madres são os que constam da tabela 7.36.

Tabela 7.36 Coeficientes de pressão exteriores em cada conjunto de madres.

Componente	Conj. madres	Alçado	c_{pe}
W_y	1	A/B	-1,2
W_y	2	A/B	-0,8
W_y	3	A/B	-0,8
W_y	4	A/B	-0,5
W_{yy}	1	A/B	-0,5
W_{yy}	2	A/B	-0,5
W_{yy}	3	A/B	-0,5
W_{yy}	4	A/B	-0,5

Para a determinação das forças do vento nas madres dos alçados laterais combinam-se os valores de c_{pe} apenas com os valores de c_{pi} positivos (+0,2), correspondente à combinação mais desfavorável.

a) Forças do vento nas madres dos alçados segundo W_y

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado A

Tabela 7.37 Forças do vento nas madres do alçado A segundo W_y ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m^2)	c_{pe}	W_e (kN/m^2)	c_{pi}	W_i (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1	1	1,65	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,66	0,31	-1,98
1	2	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	3	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	4	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	5	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	6	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	7	1,75	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,77	0,33	-2,10
1	8	1,50	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,51	0,28	-1,80
1	9	1,31	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,32	0,25	-1,57
1	10	1,10	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,11	0,21	-1,32
1	11	1,10	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,11	0,21	-1,32
1	12	1,03	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,04	0,19	-1,23
1	13	1,17	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,18	0,22	-1,40
1	14	1,39	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,40	0,26	-1,66
1	15	1,62	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,63	0,31	-1,94
2+3	1	1,65	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,11	0,31	-1,42
2+3	2	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	3	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	4	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	5	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	6	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	7	1,75	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,18	0,33	-1,51
2+3	8	1,50	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,01	0,28	-1,29
2+3	9	1,31	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,88	0,25	-1,13
2+3	10	1,10	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,74	0,21	-0,95
2+3	11	1,10	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,74	0,21	-0,95
2+3	12	1,03	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,69	0,19	-0,89
2+3	13	1,17	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,79	0,22	-1,01
2+3	14	1,39	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,93	0,26	-1,20
2+3	15	1,62	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,09	0,31	-1,39
4	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
4	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	7	1,75	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,74	0,33	-1,07
4	8	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
4	9	1,31	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,55	0,25	-0,80
4	10	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
4	11	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
4	12	1,03	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,43	0,19	-0,63
4	13	1,17	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,49	0,22	-0,71
4	14	1,39	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,58	0,26	-0,85
4	15	1,62	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,68	0,31	-0,99

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado B

Tabela 7.38 Forças do vento nas madres do alçado B segundo W_y ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m ²)	c_{pe}	W_e (kN/m ²)	c_{pi}	W_i (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1	1	1,65	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,66	0,31	-1,98
1	2	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	3	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	4	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	5	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	6	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	7	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	8	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	9	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1	10	1,50	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,51	0,28	-1,80
1	11	1,26	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,27	0,24	-1,51
1	12	1,52	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,53	0,29	-1,82
1	13	1,68	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,69	0,32	-2,01
2+3	1	1,65	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,11	0,31	-1,42
2+3	2	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	3	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	4	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	5	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	6	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	7	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	8	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	9	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
2+3	10	1,50	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,01	0,28	-1,29
2+3	11	1,26	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-0,85	0,24	-1,08
2+3	12	1,52	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,02	0,29	-1,31
2+3	13	1,68	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,13	0,32	-1,45
4	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
4	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	7	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	8	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	9	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	10	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
4	11	1,26	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,53	0,24	-0,77
4	12	1,52	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,64	0,29	-0,93
4	13	1,68	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,71	0,32	-1,02

b) Forças do vento nas madres dos alçados segundo W_{yy}

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado A

Tabela 7.39 Forças do vento nas madres do alçado A segundo W_{yy} ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m^2)	c_{pe}	W_e (kN/m^2)	c_{pi}	W_i (kN/m^2)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
1	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	7	1,75	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,74	0,33	-1,07
1	8	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
1	9	1,31	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,55	0,25	-0,80
1	10	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
1	11	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
1	12	1,03	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,43	0,19	-0,63
1	13	1,17	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,49	0,22	-0,71
1	14	1,39	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,58	0,26	-0,85
1	15	1,62	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,68	0,31	-0,99
2+3	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
2+3	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	7	1,75	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,74	0,33	-1,07
2+3	8	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
2+3	9	1,31	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,55	0,25	-0,80
2+3	10	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
2+3	11	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
2+3	12	1,03	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,43	0,19	-0,63
2+3	13	1,17	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,49	0,22	-0,71
2+3	14	1,39	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,58	0,26	-0,85
2+3	15	1,62	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,68	0,31	-0,99
4	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
4	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	7	1,75	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,74	0,33	-1,07
4	8	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
4	9	1,31	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,55	0,25	-0,80
4	10	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
4	11	1,10	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,46	0,21	-0,67
4	12	1,03	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,43	0,19	-0,63
4	13	1,17	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,49	0,22	-0,71
4	14	1,39	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,58	0,26	-0,85
4	15	1,62	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,68	0,31	-0,99

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado B

Tabela 7.40 Forças do vento nas madres do alçado B segundo W_{yy} ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m ²)	c_{pe}	W_e (kN/m ²)	c_{pi}	W_i (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
1	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	7	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	8	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	9	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
1	10	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
1	11	1,26	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,53	0,24	-0,77
1	12	1,52	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,64	0,29	-0,93
1	13	1,68	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,71	0,32	-1,02
2+3	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
2+3	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	7	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	8	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	9	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
2+3	10	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
2+3	11	1,26	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,53	0,24	-0,77
2+3	12	1,52	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,64	0,29	-0,93
2+3	13	1,68	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,71	0,32	-1,02
4	1	1,65	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,69	0,31	-1,00
4	2	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	3	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	4	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	5	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	6	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	7	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	8	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	9	2,00	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,84	0,38	-1,22
4	10	1,50	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,63	0,28	-0,91
4	11	1,26	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,53	0,24	-0,77
4	12	1,52	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,64	0,29	-0,93
4	13	1,68	0,89	0,94	-0,50	-0,47	0,20	0,19	-0,71	0,32	-1,02

c) Forças de atrito nas madres dos Alçados laterais

Tal como na cobertura as forças de atrito apenas afetam o módulo de estudo segundo a componente W_{yy} . Os valores correspondentes à ação do atrito nos alçados A e B encontram-se na tabela 7.41.

Tabela 7.41 Forças de atrito exercidas pelo vento segundo W_{yy} nas madres dos alçados A e B.

Alçado	Madres Nível	Larg. (m)	c_{fr}	$q_p(kN/m^2)$	$F_{fr}(kN/m)$
A	1	1,65	0,04	0,94	0,062
A	2	2	0,04	0,94	0,075
A	3	2	0,04	0,94	0,075
A	4	2	0,04	0,94	0,075
A	5	2	0,04	0,94	0,075
A	6	2	0,04	0,94	0,075
A	7	1,75	0,04	0,94	0,066
A	8	1,5	0,04	0,94	0,057
A	9	1,31	0,04	0,94	0,049
A	10	1,1	0,04	0,94	0,041
A	11	1,1	0,04	0,94	0,041
A	12	1,03	0,04	0,94	0,039
A	13	1,17	0,04	0,94	0,044
A	14	1,39	0,04	0,94	0,052
A	15	1,62	0,04	0,94	0,061
B	1	1,65	0,04	0,94	0,062
B	2	2	0,04	0,94	0,075
B	3	2	0,04	0,94	0,075
B	4	2	0,04	0,94	0,075
B	5	2	0,04	0,94	0,075
B	6	2	0,04	0,94	0,075
B	7	2	0,04	0,94	0,075
B	8	2	0,04	0,94	0,075
B	9	2	0,04	0,94	0,075
B	10	1,5	0,04	0,94	0,057
B	11	1,26	0,04	0,94	0,048
B	12	1,52	0,04	0,94	0,057
B	13	1,68	0,04	0,94	0,063

7.5.7 Cálculo das forças do vento F_w nas madres do alçado de topo C

Analogamente às madres dos alçados laterais consideram-se também quatro conjuntos de madres do alçado C, conforme se mostra na figura 7.23.

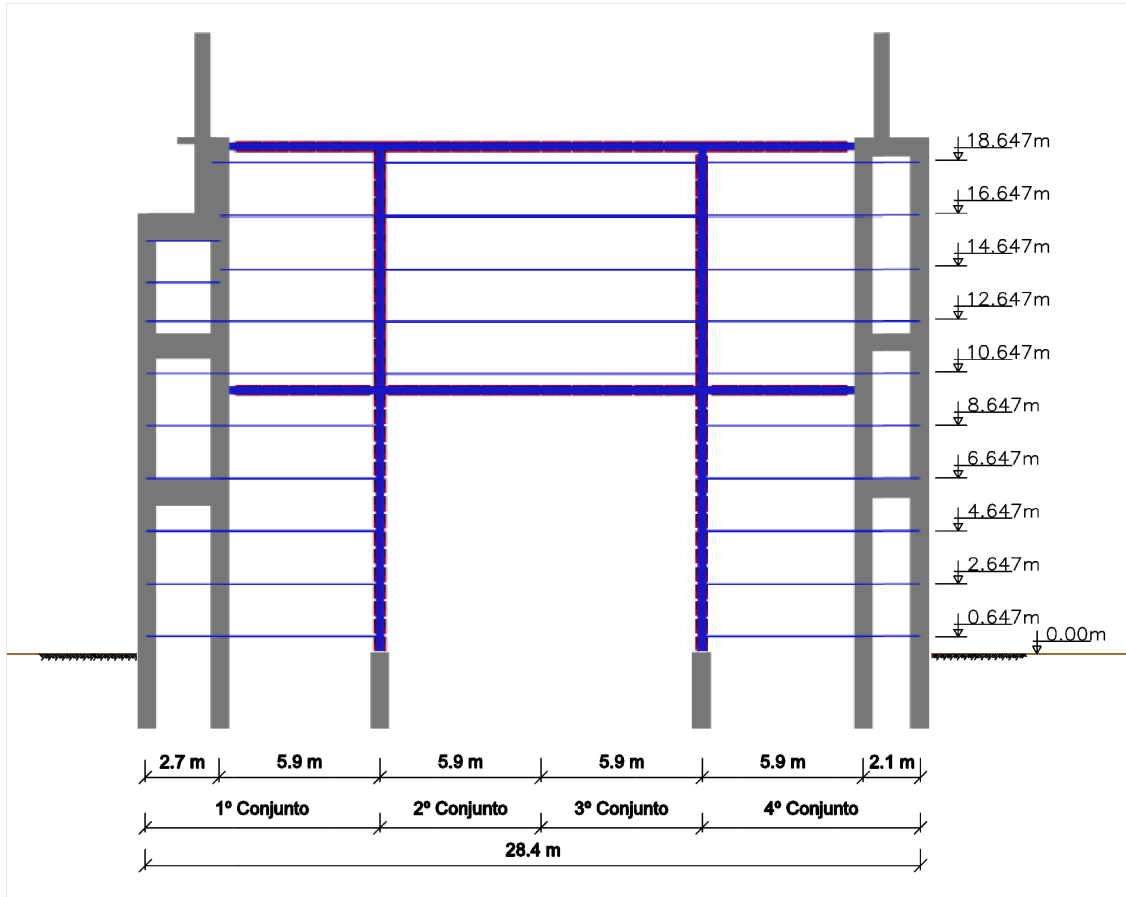


Figura 7.23 Madres do alçado C.

Os coeficientes de pressão exterior associados a cada um dos conjuntos de madres analisados constam da tabela 7.42.

Tabela 7.42 Coeficientes de pressão exteriores nas madres do alçado de topo C.

Componente	Conj. madres	Alçado	c_{pe}
W_x	1	C	-1,2
W_x	2	C	-1,2
W_x	3	C	-0,8
W_x	4	C	-0,8
W_{xx}	1	C	-0,8
W_{xx}	2	C	-0,8
W_{xx}	3	C	-1,2
W_{xx}	4	C	-1,2

Para determinar as forças do vento no alçado C combinaram-se os valores c_{pe} apenas com os valores c_{pi} positivos (+0,2), uma vez que esta é a combinação mais desfavorável.

a) Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_x

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado C

Tabela 7.43 Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_x ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m ²)	c_{pe}	W_e (kN/m ²)	c_{pi}	W_i (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1+2	1	1,65	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,66	0,31	-1,98
1+2	2	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	3	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	4	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	5	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	6	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	7	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	8	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	9	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
1+2	10	1,50	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,51	0,28	-1,80
3+4	1	1,65	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,11	0,31	-1,42
3+4	2	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	3	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	4	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	5	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	6	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	7	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	8	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	9	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
3+4	10	1,50	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,01	0,28	-1,29

b) Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_{xx}

Pressão exterior combinada com pressão interior positiva (+0,2) no Alçado C

Tabela 7.44 Forças do vento nas madres do alçado C segundo W_{xx} ($c_{pi} = +0.2$).

Conj. Madres	Nível	Larg. (m)	$C_s C_d$	q_p (kN/m ²)	c_{pe}	W_e (kN/m ²)	c_{pi}	W_i (kN/m ²)	$F_{w,e}$ (kN/m)	$F_{w,i}$ (kN/m)	F_w (kN/m)
1+2	1	1,65	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,11	0,31	-1,42
1+2	2	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	3	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	4	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	5	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	6	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	7	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	8	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	9	2,00	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,34	0,38	-1,72
1+2	10	1,50	0,89	0,94	-0,80	-0,75	0,20	0,19	-1,01	0,28	-1,29
3+4	1	1,65	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,66	0,31	-1,98
3+4	2	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	3	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	4	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	5	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	6	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	7	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	8	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	9	2,00	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-2,02	0,38	-2,39
3+4	10	1,50	0,89	0,94	-1,20	-1,13	0,20	0,19	-1,51	0,28	-1,80

7.5.8 Aplicação das forças do vento ao modelo “SAP2000”

A tabela 7.45 identifica as tabelas com os valores que solicitam as madres da cobertura e dos alçados no modelo “SAP2000”, assim como a designação atribuída a cada conjunto de ações.

Tabela 7.45 Resumo das ações atribuídas no modelo “SAP2000”.

Zona	Componente	Designação SAP2000	Tabela
Cobertura	Caso 1a - W_x	W_{x1}	7.13
Cobertura	Caso 3a - W_x	W_{x2}	7.21
Cobertura	Caso 3b - W_x	W_{x3}	7.23
Cobertura	Caso 1a - W_x	W_{xx1}	7.13
Cobertura	Caso 3a - W_x	W_{xx2}	7.21
Cobertura	Caso 3b - W_x	W_{xx3}	7.23
Cobertura	W_y	W_y	7.30
Cobertura	W_{yy}	W_{yy}	7.33/7.35
Alçado A	W_y	W_y	7.37
Alçado A	W_{yy}	W_{yy}	7.39/7.41
Alçado B	W_y	W_y	7.38
Alçado B	W_{yy}	W_{yy}	7.40/7.41
Alçado C	W_x	W_x	7.43
Alçado C	W_{xx}	W_{xx}	7.44

7.6 Ação Sísmica (E)

A ação sísmica foi definida através de espectros de resposta de cálculo determinados a partir das considerações referidas na memória descritiva. Os parâmetros que definem os espectros de cálculo constam da tabela 7.46.

Tabela 7.46 Parâmetros dos espectros de resposta de cálculo - Ação Sísmica Tipo 1 e 2.

Zona	Ação sísmica tipo 1		Ação sísmica tipo 2	
	Loulé		Loulé	
Zona sísmica	1.2		2.3	
$a_{gR}(m/s^2)$	2		1.7	
Classe de importância	II		II	
Tipo de terreno	C		C	
S_{max}	1,6		1,6	
$T_B(s)$	0,1		0,1	
$T_C(s)$	0,6		0,25	
$T_D(s)$	2		2	
S	1,4		1,46	
η	1		1	
γ_1	1		1	
$a_g(m/s^2)$	2		1.7	
β	0,2		0,2	
q	1,5		1,5	

Na figura 7.24 mostra-se os espectros de resposta de cálculo considerados para as Ações Sísmicas Tipo 1 e Tipo 2.

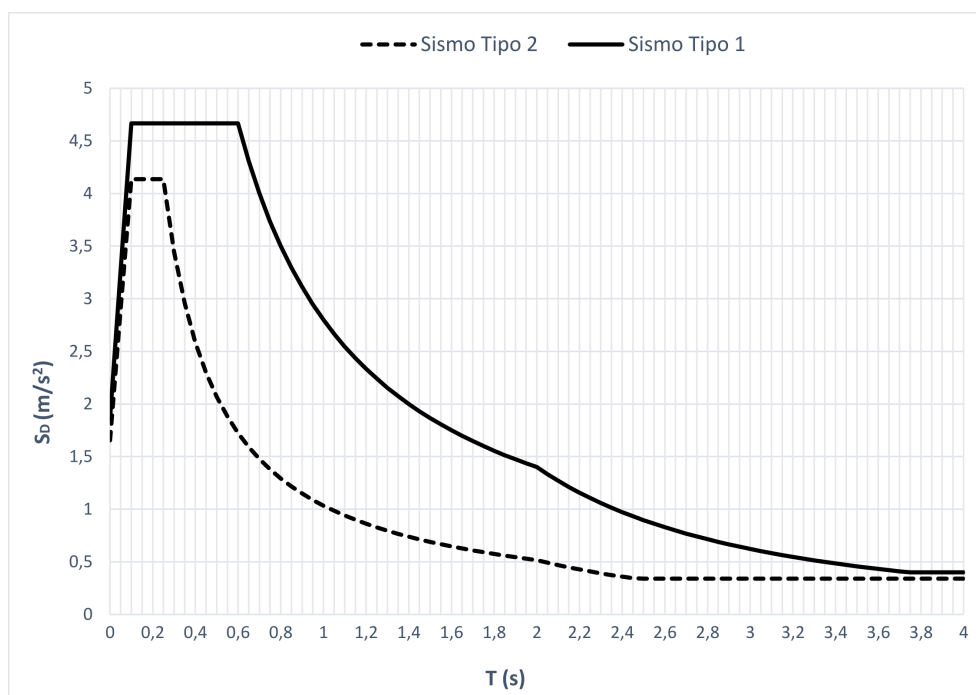


Figura 7.24 Espectros de resposta de cálculo para as Ações Sísmicas Tipos 1 e 2 ($\xi=5\%$).

A combinação dos efeitos das componentes horizontais da ação sísmica foi efetuada segundo o disposto na cláusula 4.3.3.5.1(3) do EC8-1 a partir das seguintes combinações direcionais:

$$E_{Edx} \text{ " + " } 0,30E_{Edy} \quad (7.1)$$

$$0,30E_{Edx} \text{ " + " } E_{Edy} \quad (7.2)$$

em que:

“+” significa “a combinar com”;

E_{Edx} representa os esforços da ação sísmica segundo o eixo x;

E_{Edy} representa os esforços da ação sísmica segundo o eixo y.

Segundo a cláusula 3.2.4(2)P do EC8-1, os efeitos das ações sísmicas de cálculo devem ser sempre avaliados tendo em conta a presença das massas associadas a todas as forças gravíticas segundo a seguinte expressão:

$$\sum G_{k,j} \text{ “+” } \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (7.3)$$

em que:

$\psi_{E,i}$ representa o coeficiente de combinação para a ação variável i determinado a partir da expressão 7.4.

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \quad (7.4)$$

As massas consideradas foram o peso próprio da estrutura assimilado de forma automática pelo *software* de cálculo, e as restantes cargas permanentes e sobrecargas recorrendo à função “mass source”. Foram considerados um total de 1410 modos de vibração de modo a mobilizar 90% da massa nas direções x e y.

A figura 7.25 mostra o modo de vibração mais participativo segundo a direção y-y, que corresponde a uma participação de 39,7 % da massa total. Trata-se do modo de vibração 1 que tem uma frequência $f = 0,934$ Hz e um período $T = 1,071$ s.

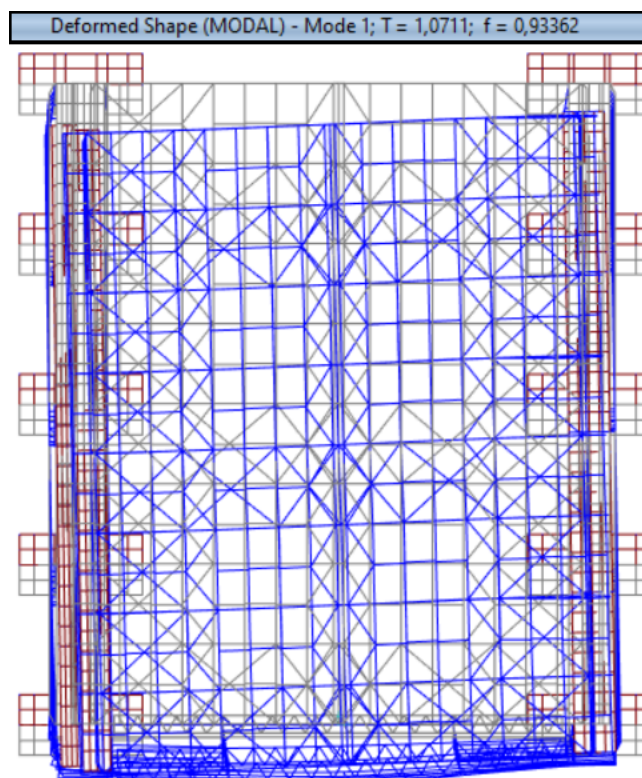


Figura 7.25 1º Modo de vibração.

A figura 7.26 indica o modo de vibração 3 que corresponde a uma translação segundo a direção x-x, contando com uma participação de 39,0 % da massa total. Este modo apresenta uma frequência $f = 1,271$ Hz e um período $T = 0,786$ s.

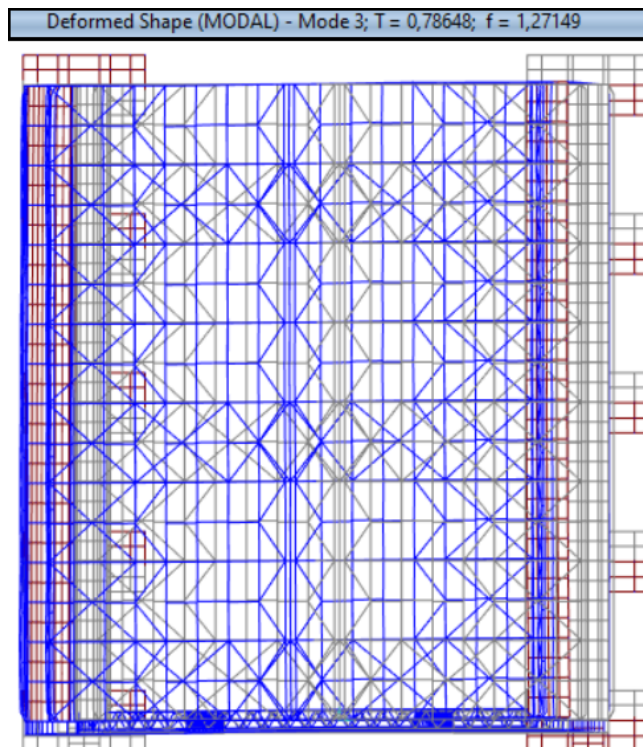


Figura 7.26 3º Modo de vibração.

A figura 7.27 identifica o modo de vibração 2 que é um modo de torção.

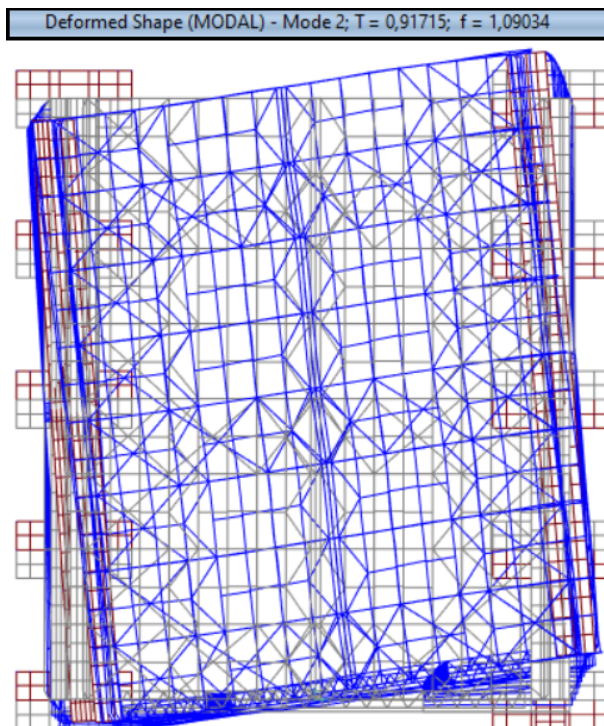


Figura 7.27 2º Modo de vibração.

7.7 Ação da Ponte Rolante

Com base no tipo de ponte rolante e nas características fornecidas pelo fabricante (constituição, características geométricas, peso e capacidade máxima de elevação), procedeu-se ao estudo das cargas transmitidas diretamente às vigas de betão armado que recebem os carris onde funciona este equipamento. Uma vez que o peso total da ponte rolante, incluindo já a capacidade de elevação, é de 2000 kN a distribuir pelas duas vigas de betão onde a ponte funciona, procedeu-se ao estudo da distribuição desta carga por estas 2 vigas para as situações mais condicionantes. Atendendo a que o balde de elevação, por razões de segurança, nunca se pode aproximar mais de 3 metros dos apoios, e considerando que o vão do Hangar é de 25 metros apresentam-se nas figuras em baixo as situações que permitem calcular as cargas máximas transmitidas às vigas de betão onde funciona este equipamento

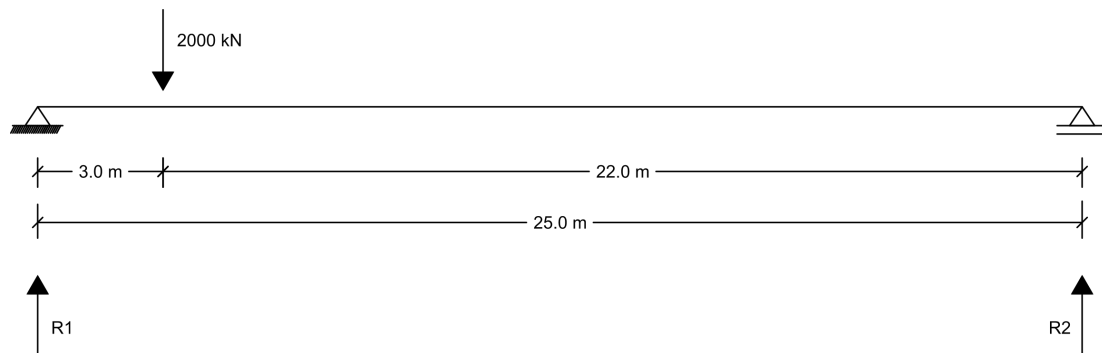


Figura 7.28 Esquema estrutural considerado para o cálculo da carga máxima nas rodas.

$$R1 = 2000 \times \frac{22}{25} = 1760 \text{ kN}$$

$$R2 = 2000 \times \frac{3}{25} = 240 \text{ kN}$$

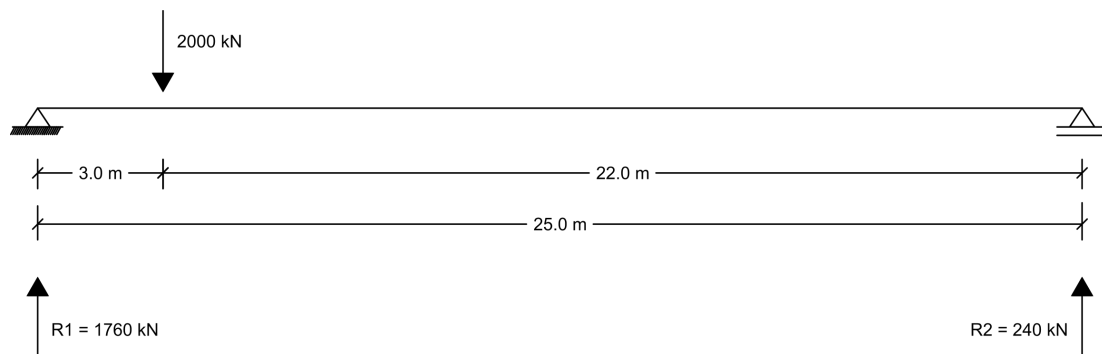


Figura 7.29 Valores das reações R1 e R2.

Assim, por roda teremos uma carga máxima de 880 kN.

$$R1/roda = 2000 \times \left(\frac{\frac{22}{25}}{2} \right) = 880 \text{ kN}$$

$$R2/roda = 2000 \times \left(\frac{\frac{3}{25}}{2} \right) = 120 \text{ kN}$$

A ação da ponte rolante é simulada através de um comboio tipo de cargas móveis que mantêm uma posição relativa constante ao longo da viga de suporte da ponte rolante.

O comboio de cargas móveis é constituído por um veículo tipo de dois eixos que distam entre si de 4 metros e com uma carga máxima de 880 kN por roda, conforme se pode observar na figura 7.30.

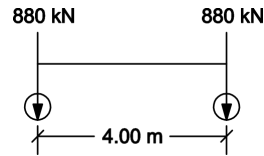


Figura 7.30 Comboio tipo.

Dado que se pretende que as rodas da ponte rolante circulem livremente ao longo de toda a viga, torna-se necessário realizar um dimensionamento adequado de forma a garantir que todas as secções da viga possam resistir aos esforços que futuramente estão sujeitas. Neste sentido, foi considerado o modelo correspondente a vigas contínuas com 4 tramos que funcionam entre as juntas de dilatação do Hangar e, cujos apoios são materializados pelos pilares dos alçados laterais do Hangar, conforme mostra a figura 7.31.

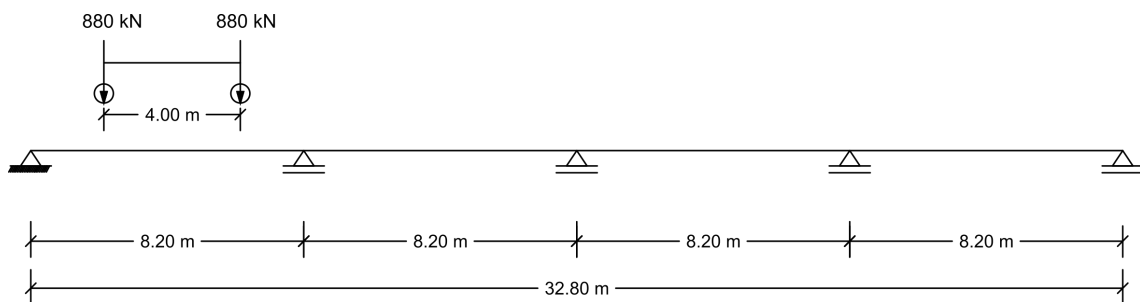


Figura 7.31 Modelo estrutural e comboio tipo considerado.

A análise das vigas de apoio da ponte rolante foi efetuada com recurso a dois *softwares* (“SAP2000” e “Ftool”) como meio de comparação e validação dos resultados. O principal objetivo desta análise foi a determinação das secções mais esforçadas com recurso à obtenção das envolventes e linhas de influência dos momentos fletores e dos esforços transversos. Nas páginas seguintes mostra-se o procedimento adotado em ambos os *softwares*.

7.7.1 Definição do veículo tipo

- Definição do veículo tipo em “SAP2000”

A figura 7.32 mostra como foi definido o veículo tipo.

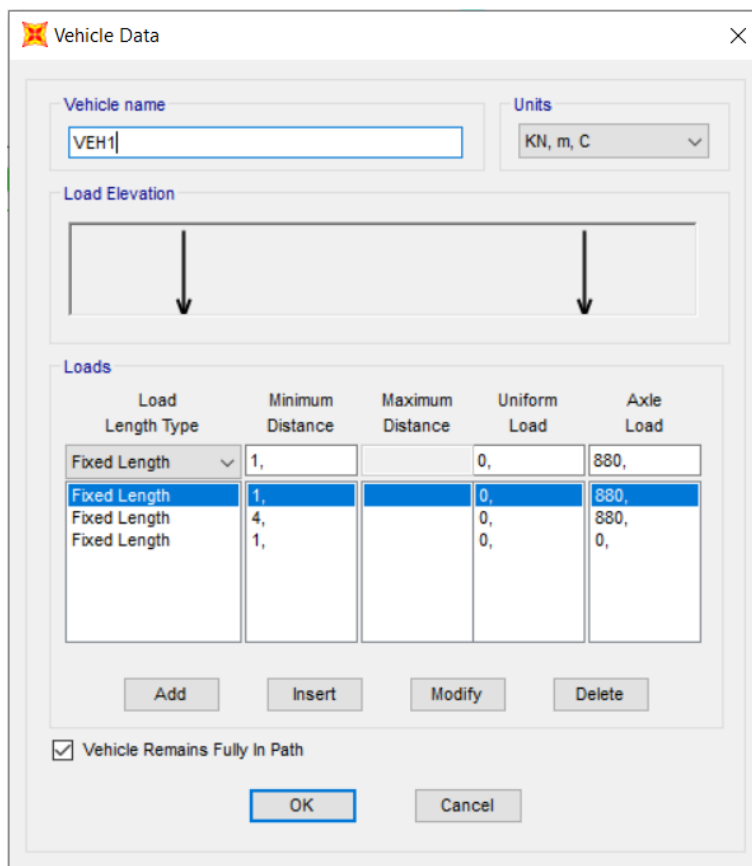


Figura 7.32 Definição do veículo tipo - “SAP2000”.

- Definição do veículo tipo em “Ftool”

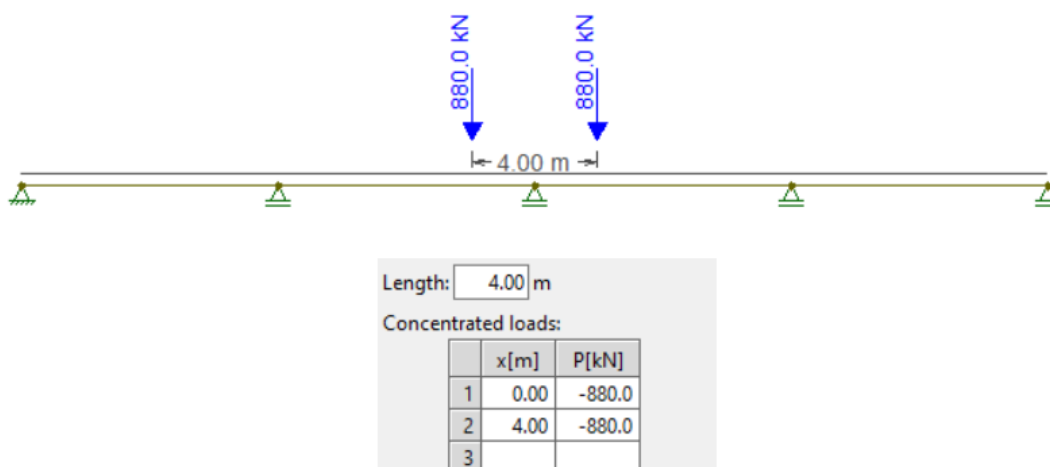


Figura 7.33 Definição do veículo tipo - “Ftool”.

7.7.2 Obtenção da envolvente dos momentos M3

- Envolvente dos momentos M3 em “SAP2000”

Na figura 7.34 mostra-se a envolvente dos momentos obtida na viga de caminho de suporte da ponte rolante, assim como os valores máximos do momento nas secções onde ocorrem.

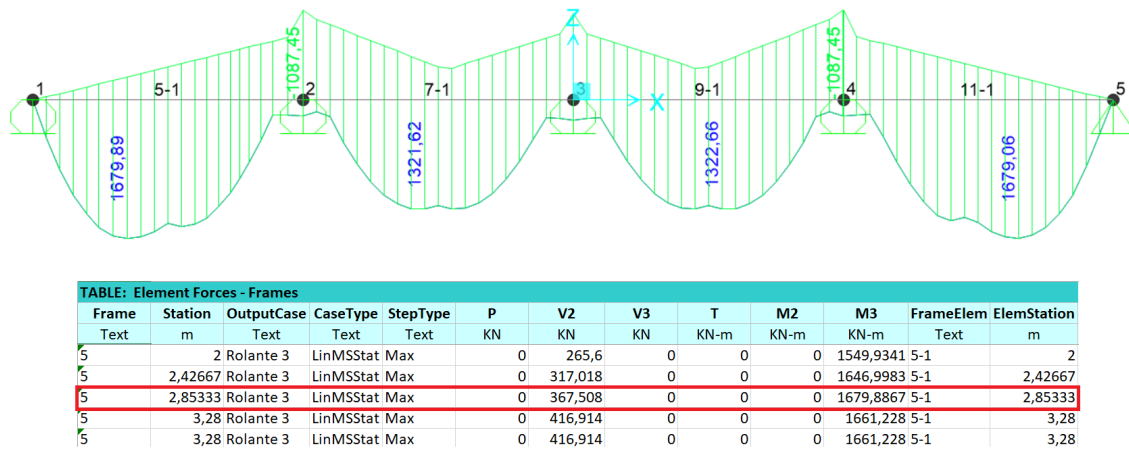


Figura 7.34 Envolvente dos momentos M3 e localização da secção mais solicitada.

- Envolvente dos momentos em “Ftool”

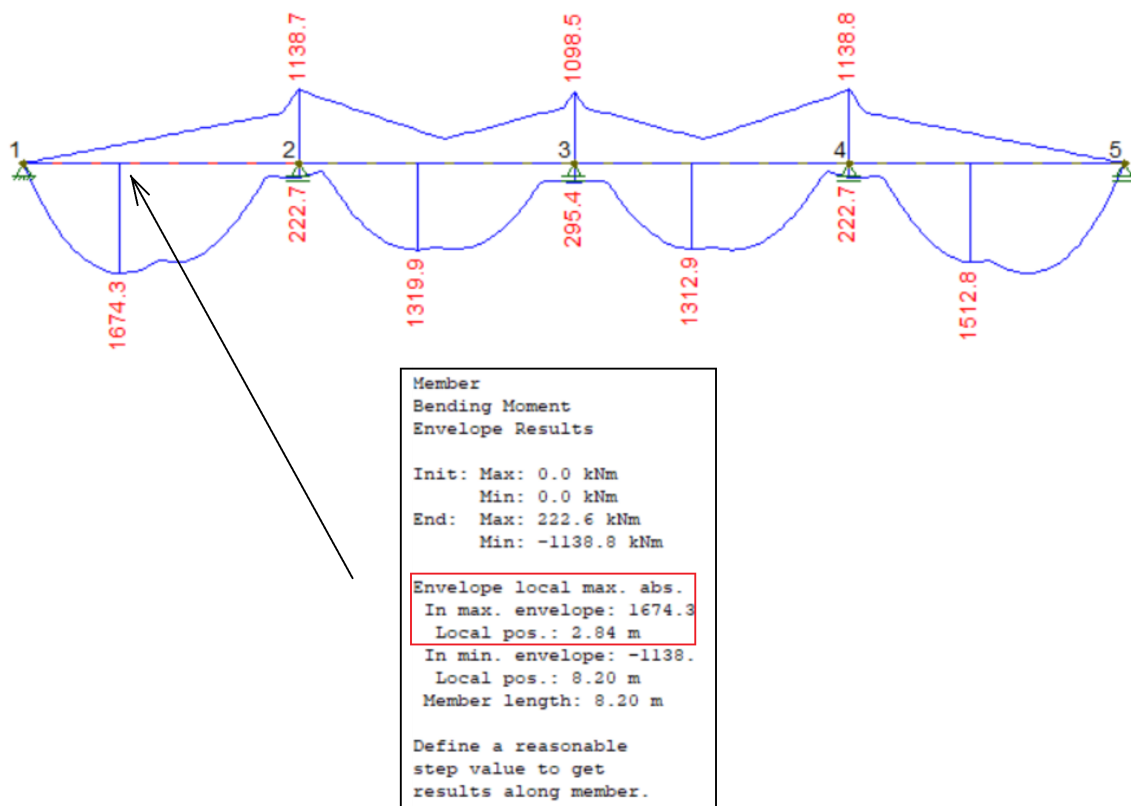


Figura 7.35 Envolvente dos momentos M3 e localização da secção mais solicitada.

Exemplificando para o primeiro tramo da estrutura, verifica-se que os resultados em cada um dos *software* são bastante semelhantes, conforme se vê na tabela 7.47.

Tabela 7.47 Momentos máximos.

Software	M3 máx (kN.m)	Secção (m)
“SAP2000”	1679,89	2,85
“Ftool”	1674,3	2,84

Os resultados obtidos para o primeiro tramo da viga no *software* “Ftool”, indicam que o momento máximo (1674,3 kN.m) ocorre na secção a 2,84 metros do apoio, o que significa que a posição mais desfavorável para o veículo tipo se verifica quando as rodas estão posicionadas a 2,84 m e 6,84 m, respetivamente. Na figura 7.36 mostra-se a linha de influência dos momentos fletores na secção mais esforçada do primeiro tramo da viga.

A determinação do momento fletor máximo nesta secção é feita multiplicando os valores das ordenadas da linha de influência nas secções a 2,84m e 6,84m do apoio pelo valor da carga (880 kN).

$$M_{\text{máx}} = 1,6251 \times 880 + 0,2772 \times 880 = 1674 \text{ kN.m}$$

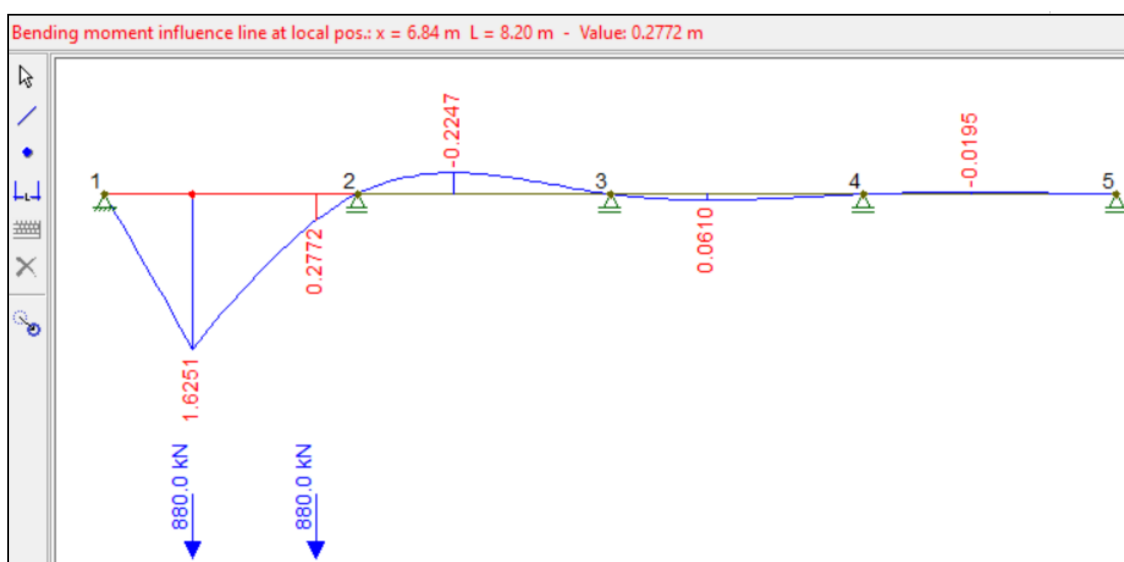


Figura 7.36 Linha de influência do momento fletor na secção 2,84 m viga.

Foram estudadas as sete secções mais desfavoráveis sendo que quatro delas se encontram entre os apoios e as restantes sobre os apoios. As posições PR1, PR3, PR5 e PR7 correspondem aos máximos dos momentos fletores positivos, enquanto que as posições PR2, PR4 e PR6 correspondem aos máximos dos momentos fletores negativos.

Além das ações verticais foi necessário também ter em conta o efeito de lacete e de frenagem em cada roda, resultantes do arranque e da travagem do equipamento, tendo-se considerado 10 % do valor das ações verticais.

As posições consideradas encontram-se sumarizadas na tabela da figura 7.37.

Nas figuras 7.38, 7.39 e 7.40 mostram, a título de exemplo, as posições PR1A, PR1B e PR2A na viga de suporte da ponte rolante.

TABLE: Element Forces - Frames										
Frame	Station	OutputCase	CaseType	StepType	V2	M3	FrameElem	ElemStation	Posição	
Text	m	Text	Text	Text	KN	KN-m	Text	m	Alçado A	Alçado B
5	2,85	Rolante 3	LinMSStat	Max	367,51	1679,89	5-1	2,85	PR1A	PR1B
5	8,20	Rolante 3	LinMSStat	Min	-22,99	-1087,45	5-1	8,20	PR2A	PR2B
7	0,00	Rolante 3	LinMSStat	Min	-1308,14	-1087,45	7-1	0,00	PR3A	PR3B
7	3,69	Rolante 3	LinMSStat	Max	357,36	1321,62	7-1	3,69	PR3A	PR3B
7	8,20	Rolante 3	LinMSStat	Min	-156,68	-1047,11	7-1	8,20	PR4A	PR4B
9	0,00	Rolante 3	LinMSStat	Min	-1316,95	-1047,11	9-1	0,00	PR4A	PR4B
9	4,51	Rolante 3	LinMSStat	Max	524,17	1322,67	9-1	4,51	PR5A	PR5B
9	8,20	Rolante 3	LinMSStat	Min	-127,87	-1087,45	9-1	8,20	PR6A	PR6B
11	0,00	Rolante 3	LinMSStat	Min	-1397,91	-1087,45	11-1	0,00	PR7A	PR7B
11	5,33	Rolante 3	LinMSStat	Max	584,97	1679,06	11-1	5,33	PR7A	PR7B

Figura 7.37 Posições consideradas para colocação do veículo tipo.

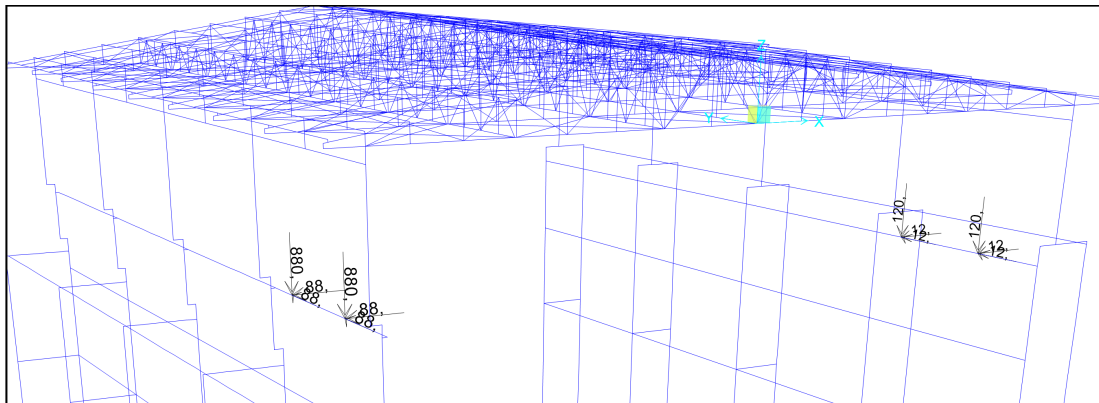


Figura 7.38 Veículo tipo na posição PR1A.

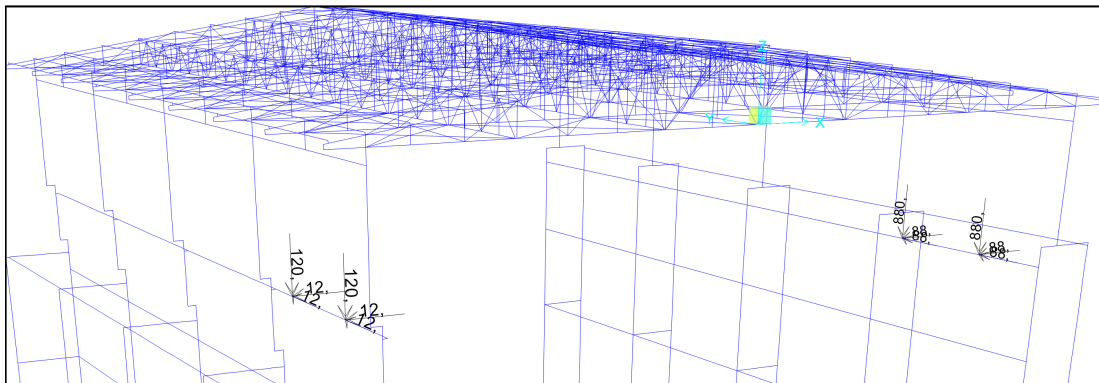


Figura 7.39 Veículo tipo na posição PR1B.

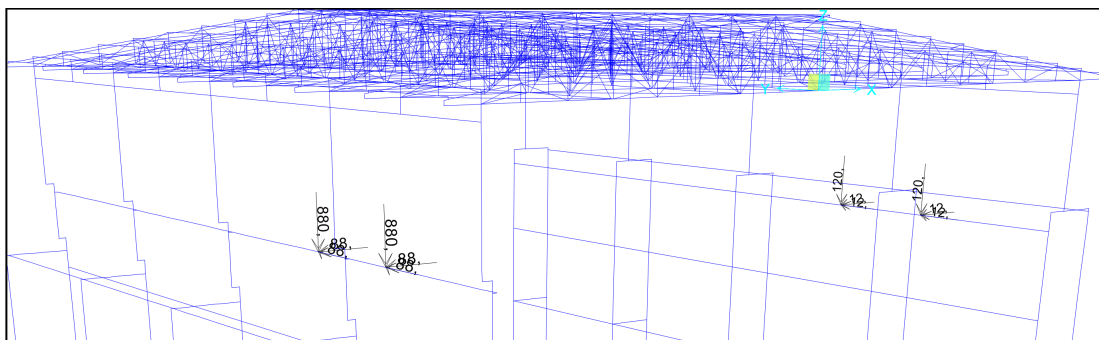


Figura 7.40 Veículo tipo na posição PR2A.

Capítulo 8

Pré-Dimensionamento

8.1 Elementos em Betão Armado

O pré-dimensionamento destes elementos parte de algumas premissas que são condicionantes para a estabilidade da estrutura e para o funcionamento da ponte rolante. A geometria das vigas e dos pilares do hangar teve em conta duas imposições definidas pelo dono de obra:

- Altura e capacidade máxima de armazenamento do Hangar;
- Posição e capacidade máxima de elevação da ponte rolante.

8.1.1 Pré-dimensionamento das vigas de travamento dos pórticos

O pré-dimensionamento das vigas de travamento dos pórticos foi realizado considerando que estas funcionam como vigas contínuas, tendo-se adotado para a altura mínima a relação:

$$h_{min} = \frac{L}{10 a 12} \quad (8.1)$$

8.1.2 Pré-dimensionamento das vigas de suporte da ponte rolante

As vigas de suporte da ponte rolante foram também pré-dimensionadas como vigas contínuas, a partir do traçado das linhas de influência com base no comboio tipo, que tem em conta não só a distância entre rodas, mas também a carga máxima que a ponte rolante pode movimentar. Estas vigas foram pré-dimensionadas com base nas ações fornecidas pelo fabricante.

As cargas da ponte rolante são transmitidas através de quatro rodas que apoiam em carris metálicos ligados às vigas de betão armado que acompanham os alçados laterais A e B do Hangar.

Tiveram-se também em conta as ações de frenagem e de lacete. Estes valores encontram-se resumidos na tabela 8.1.

Tabela 8.1 Ações consideradas.

PP da Viga (kN/m)	Contabilizado automaticamente
RCP da Passerelle (kN/m)	5,63
SC P1 (kN)	880
SC P2 (kN)	880
Sc Lacete (kN)	176
Sc Frenagem (kN)	176

A figura 8.1 mostra o modelo estrutural e o comboio tipo adotado, bem como todas as cargas consideradas.

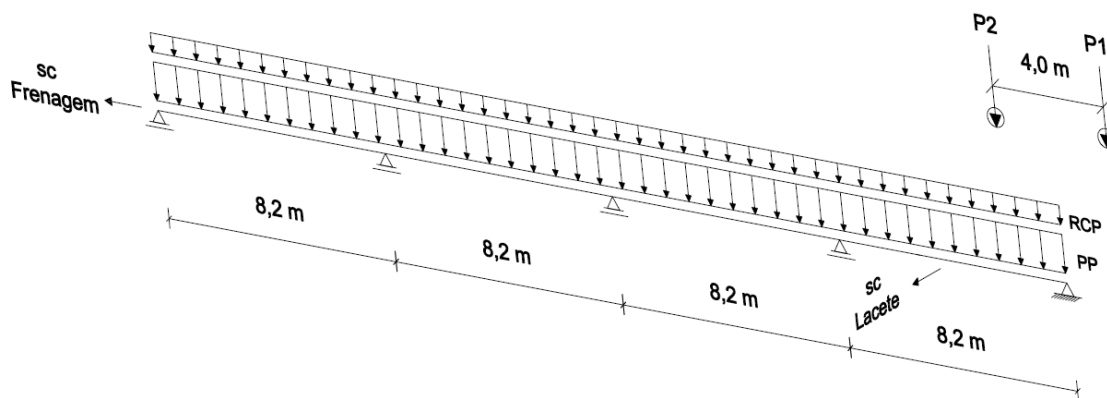


Figura 8.1 Modelo estrutural e ações consideradas no pré-dimensionamento das vigas da ponte rolante.

Os esforços máximos foram calculados no *software* “SAP2000” com base na combinação mais desfavorável:

$$q_{Ed} = 1,35 \times (PP + RCP) + 1,5 \times (P1 + P2 + SCLacete + SCFrenagem)$$

Embora esta viga esteja sujeita a flexão composta desviada, considerou-se para efeitos de pré-dimensionamento que se encontra sujeita apenas a flexão simples.

As figuras 8.2 e 8.3 mostram, respetivamente, a envolvente dos momentos M_y e dos esforços transversos V_z nos diferentes tramos correspondentes às envolventes dos esforços mais desfavoráveis.

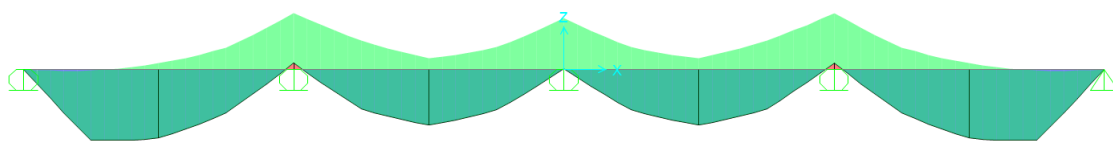


Figura 8.2 Envolvente dos momentos M_y .

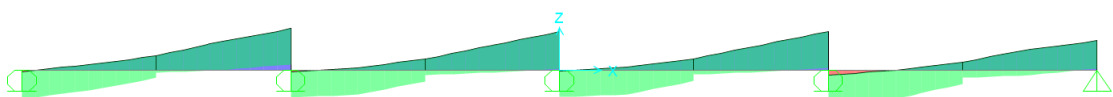


Figura 8.3 Envolvente do esforço transversal V_z .

Tabela 8.2 Valores máximos de cálculo dos esforços na viga.

Valores máximos dos esforços na viga									
Esforço	Nx > 0 (kN)	My > 0 (kN.m)	My < 0 (kN.m)	Vz > 0 (kN)	Vz < 0 (kN)	Mz > 0 (kN.m)	Mz < 0 (kN.m)	Vy > 0 (kN)	Vy < 0 (kN)
Ações verticais	-	2703,4	-2132,2	2491,6	-1897,7	-	-	-	-
SC Lacete	-	-	-	-	-	434,1	-214,1	105,9	-158,1
SC frenagem	264	-	-	-	-	-	-	-	-

Com base nos esforços máximos e nas relações geométricas atribuídas para a viga:

$$b = 0,4 h \quad ; \quad h = d$$

em que:

b Largura da viga;

h Altura da viga;

d Distância entre a armadura e a fibra mais comprimida do betão.

De forma a garantir um dimensionamento económico, considerou-se um intervalo de valores admissíveis para o momento flector reduzido entre 0,1 e 0,25. Substituindo na equação 8.2, tem-se:

$$\mu = \frac{M_{Ed,y}}{b d^2 f_{cd}} \Leftrightarrow 0,1 = \frac{2703,4}{0,4h \times h^2 \times 20000} \Leftrightarrow h \approx 1,5m \quad (8.2)$$

A dimensões estabelecidas para as vigas da ponte rolante foram pois as seguintes:

$$h = 2,0m \quad ; \quad b = 1,0m$$

Relativamente às flechas, definiu-se o deslocamento vertical máximo admissível, $\delta_{admissivel}$:

$$\delta_{admissivel} = \frac{L}{1000} = \frac{8,2}{1000} = 0,0082m = 0,82cm$$

8.1.3 Pré-dimensionamento das lajes

O pré-dimensionamento das lajes foi efetuado com base na expressão:

$$d \geq \frac{L_{\text{menor vão}}}{(l/d)_{\text{máx}} \cdot \frac{500}{f_{yk}}} \quad (8.3)$$

em que:

d Altura útil da laje;

$(l/d)_{\text{máx}}$ Valor básico da relação vão/altura útil para elementos de betão armado;

f_{yk} Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras.

Os valores recomendados para a relação $(l/d)_{\text{máx}}$ foram retirados do quadro 7.4N do EC2.

Tabela 8.3 Valores básicos da relação vão/altura útil.

Sistema Estrutural	$(l/d)_{\text{máx}}$
Laje simplesmente apoiada	20
Vão extremo de uma laje contínua (laje encastrada-apoiada)	26
Vão interior de uma laje contínua (laje bi-encastrada)	30
Consola	8

As alturas das lajes foram calculadas a partir da expressão:

$$h = d + 0,03 \text{ (m)} \quad (8.4)$$

em que:

h espessura da laje.

Na tabela 8.4 indicam-se as alturas consideradas para todas as lajes.

Tabela 8.4 Espessuras das lajes.

Laje	$L_{\text{menor vão}}$	$(l/d)_{\text{máx}}$	$d(m)$	$h(m)$
L2 AB	1,4	8	0,18	0,21
L1 AB	1,65	20	0,08	0,11
L1 FG	2,1	20	0,11	0,14

Considerou-se para todas as lajes do Hangar a espessura de 0,21m.

8.1.4 Pré-dimensionamento dos pilares dos pórticos

Como é corrente neste tipo de estruturas optou-se pela utilização de pilares compostos que suportam as vigas da ponte rolante, assim como as vigas dos travamentos longitudinais do esqueleto estrutural do Hangar.

Numa fase inicial as dimensões adotadas para as secções dos pilares foram calculadas a partir da expressão 8.5.

$$A_c \geq \frac{N_{Ed}}{0,65 f_{cd}} \quad (8.5)$$

Em que:

A_c Área da secção transversal de betão;

N_{Ed} Valor de cálculo do esforço normal atuante;

f_{cd} Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

O valor de cálculo do esforço normal atuante foi determinado a partir das áreas de influência das várias ações atuantes:

- Peso próprio das vigas e dos pilares;
- Peso próprio da cobertura;
- Restante carga permanente da cobertura;
- Sobrecarga da cobertura;
- Sobrecarga da ponte rolante.

Para o cálculo do esforço normal atuante considerou-se a combinação seguinte:

$$q_{Ed} = 1,35 \times (PP + RCP) + 1,5 \times SC$$

A tabela 8.5 resume os valores do esforço normal atuante de cálculo em cada uma das secções dos pilares, bem como as secções consideradas no pré-dimensionamento.

Tabela 8.5 Pré-dimensionamento dos pilares.

Secção	$PP + RCP(kN)$	$SC(kN)$	$N_{Ed}(kN)$	$N_{Ed}/0,65f_{cd}(m^2)$	$b(m)$	$h(m)$	$A_{c\dot{a}dot}(m^2)$
P3 AB	256,56	89,71	480,92	0,04	0,5	1	0,5
P2 AB	783,88	1849,71	3832,80	0,29	1,3	1	1,3
P1 A / P1 B	1556,93	1849,71	4876,41	0,38	0,7	1	0,7
P2 FG	176,13	89,71	372,34	0,03	0,5	0,6	0,3
P1 F / P1 G	1179,95	1849,71	4367,50	0,34	0,7	1,0	0,7

8.2 Estruturas Metálicas

Para uma melhor compreensão da metodologia adotada no pré-dimensionamento das estruturas de nós articulados, é importante referir que tanto as asnas como as vigas de travamento da cobertura são formadas por treliças do tipo “Warren” com montantes. Os elementos interiores destas vigas formam um “W” e os esforços de tração e de compressão alternam entre as diagonais e montantes.

Em determinadas estruturas com carregamentos não muito elevados, a utilização dos montantes é dispensada de forma a reduzir o número de elementos e de ligações. Contudo, em estruturas sujeitas a carregamentos mais elevados é conveniente a utilização de montantes para reduzir o comprimento de encurvadura no plano da treliça dos cordões inferiores.

As figuras 8.4 e 8.5 mostram os dois tipos de treliças que formam as estruturas da cobertura do hangar.

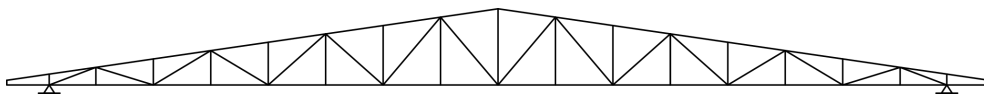


Figura 8.4 Treliça do tipo Warren de altura variável.

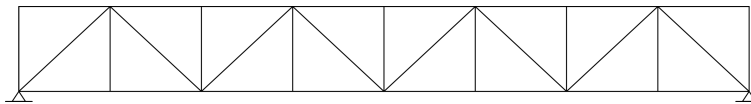


Figura 8.5 Treliça do tipo Warren de altura constante.

O pré-dimensionamento destas vigas foi feito por analogia com as vigas de alma cheia, cujos diagramas de momento fletor e esforço transverso, para vigas simplesmente apoiadas com cargas com distribuição uniforme constante, apresentam as configurações ilustradas nas figuras 8.6 e 8.7.

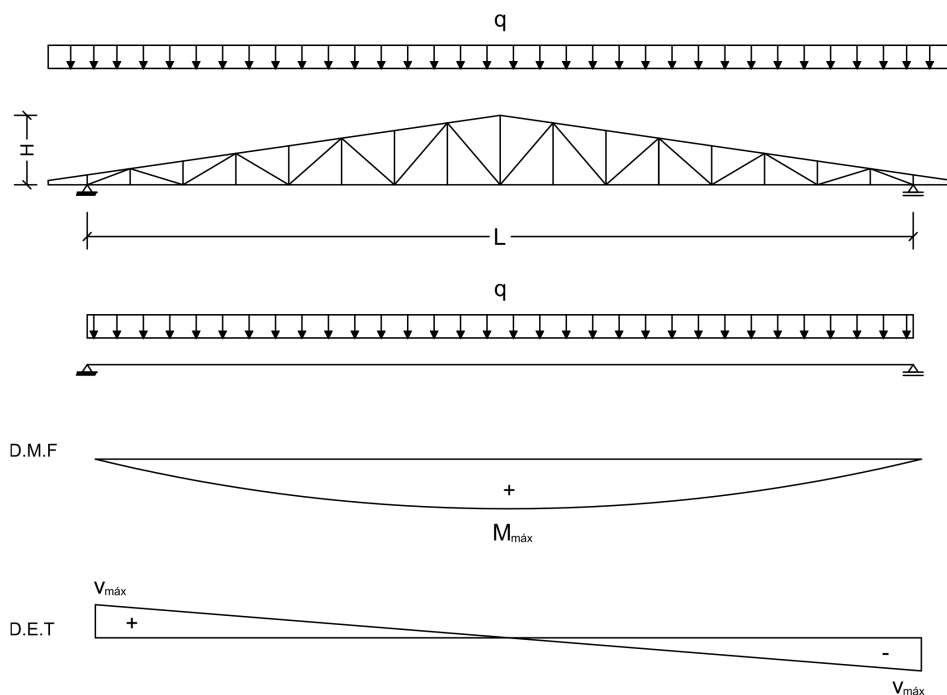


Figura 8.6 Modelo de pré-dimensionamento das asnas da cobertura.

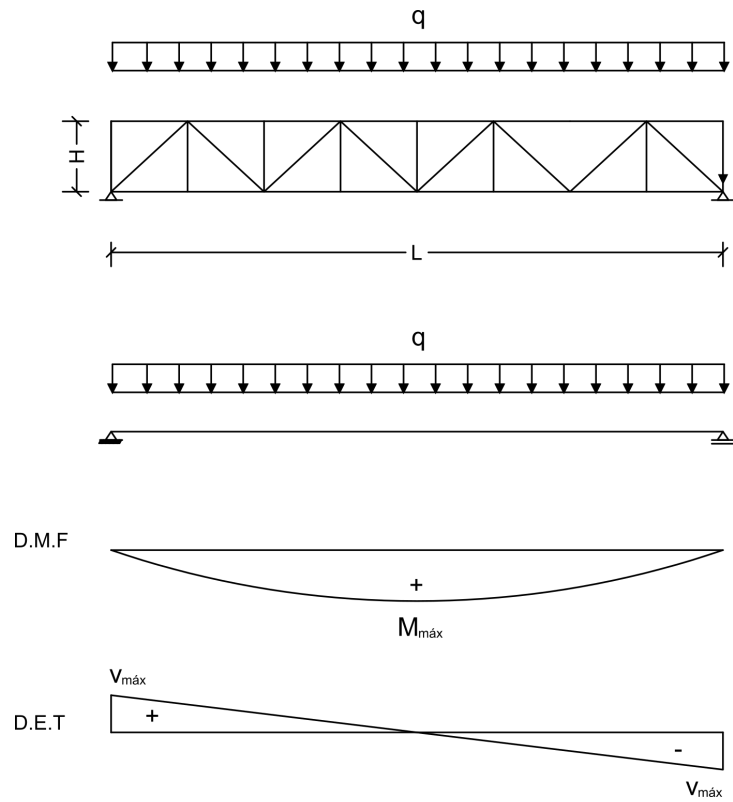


Figura 8.7 Modelo de pré-dimensionamento das vigas de travamento entre asnas.

Os esforços máximos dos momentos fletores e esforço transverso são iguais a:

$$M_{\text{máx}} = \frac{qL^2}{8}$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{qL}{2}$$

Exemplificando para as vigas de travamento entre asnas, a figura 8.8 mostra as barras onde ocorrem os valores máximos de esforço axial nos cordões, montantes, diagonais e prumos da treliça.

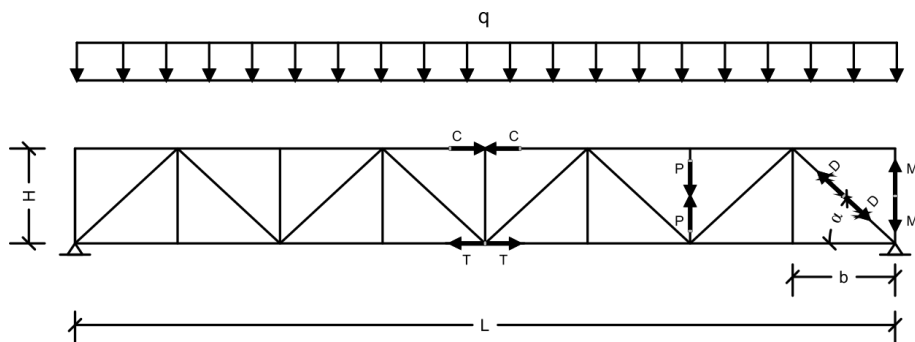


Figura 8.8 Esforços máximos na treliça.

As expressões dos esforços axiais máximos que ocorrem nas barras exteriores e interiores de treliças do tipo “Warren” são:

- Cordões

$$C = T = \frac{M_{\text{máx}}}{H} \quad (8.6)$$

- Montantes

$$M = \frac{qb}{2} \quad (8.7)$$

- Diagonais

$$D = \frac{V_{\text{máx}} - M}{\sin \alpha} \quad (8.8)$$

- Prumos

$$P = qb \quad (8.9)$$

8.2.1 Pré-dimensionamento das asnas da cobertura

A quantificação das ações no pré-dimensionamento das asnas da cobertura foi efetuada a partir das áreas de influência nestes elementos, incluindo o peso próprio das asnas, madres e outros elementos secundários, sobrecargas e ação do vento, obtendo-se para a combinação fundamental de ações, uma carga uniformemente distribuída igual a 11,7 kN/m.

A figura 8.9 mostra os diagramas de momentos fletores e de esforços transversos obtidos.

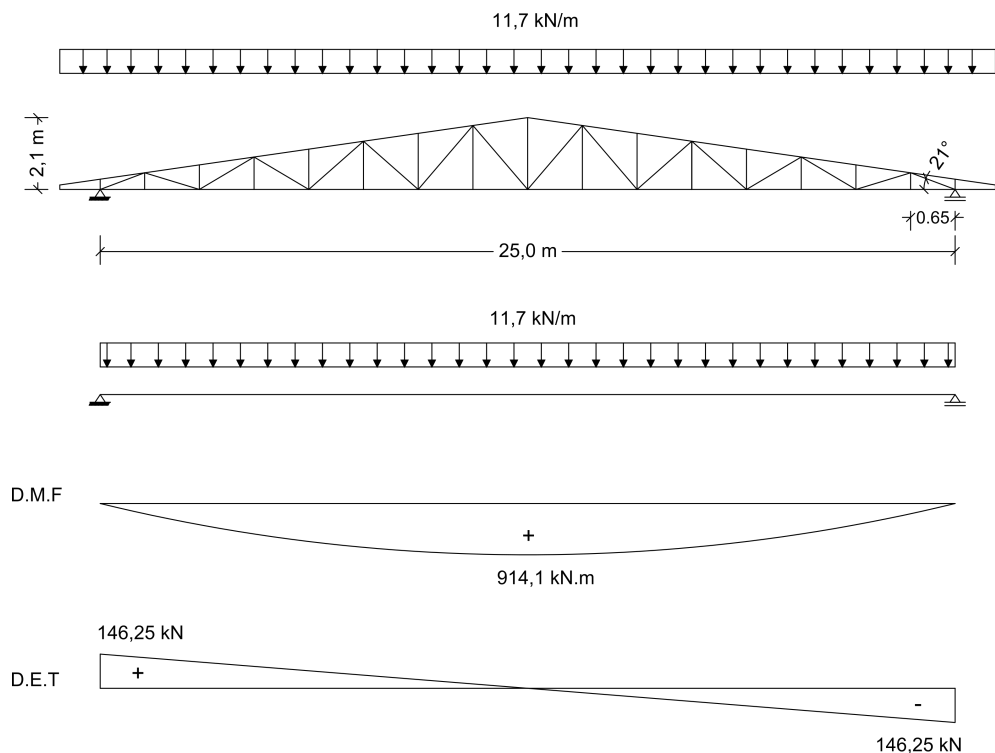


Figura 8.9 Diagrama de momentos fletores e esforço transversal na viga.

Pré-dimensionamento dos elementos externos

Tem-se, pois, para o esforço axial máximo nos cordões:

$$C = T = \frac{M_{\text{máx}}}{H} = \frac{914,1}{2,1} = 435,3 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura considerados no pré-dimensionamento dos cordões são os indicados na tabela 8.6.

Tabela 8.6 Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z - Asna Tipo

Plano de encurvadura	$L_{cr}(m)$	Eixo de encurvadura	$N_{Ed}(kN)$
No plano da estrutura	1,62	z	435,3
Fora do plano da estrutura	1,62 / 4,80	y	435,3

Os cordões das asnas foram pré-dimensionados a partir dos ábacos de Resistência à Encurvadura para perfis da série UPN (figuras 8.10 e 8.11), segundo os dois eixos principais de inércia.

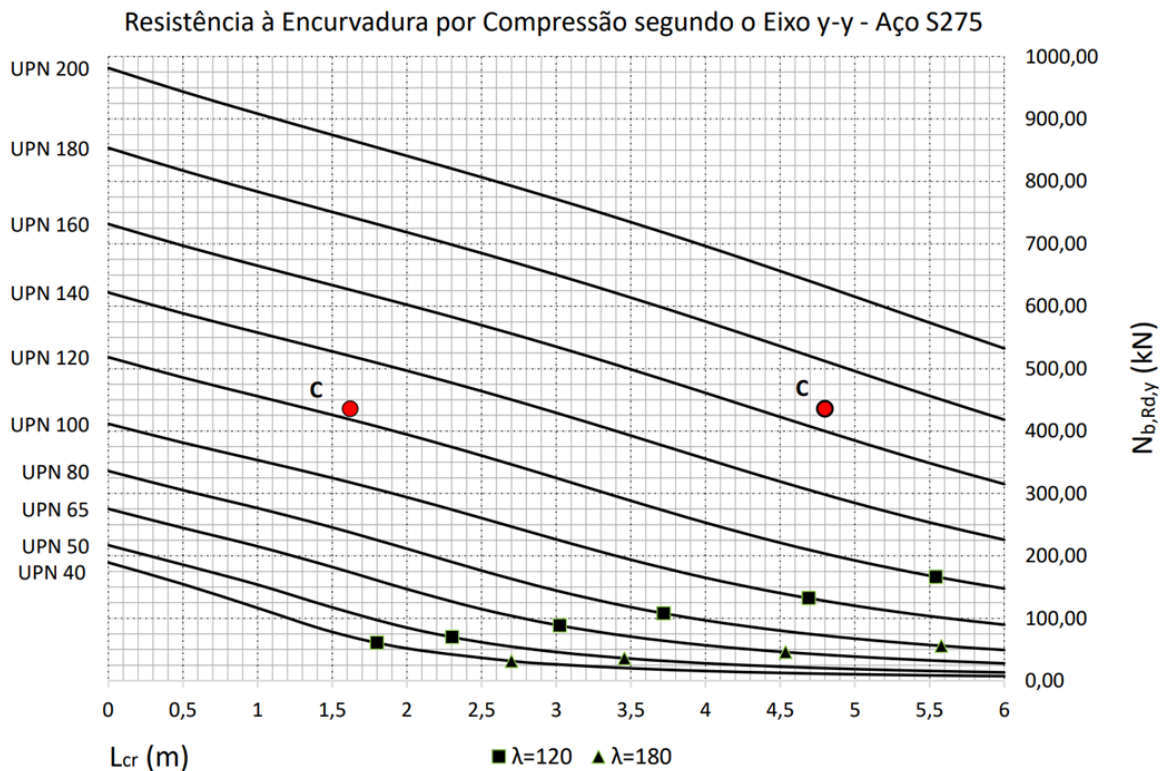


Figura 8.10 Ábacos de Pré-dimensionamento dos Cordões (Eixo y-y).

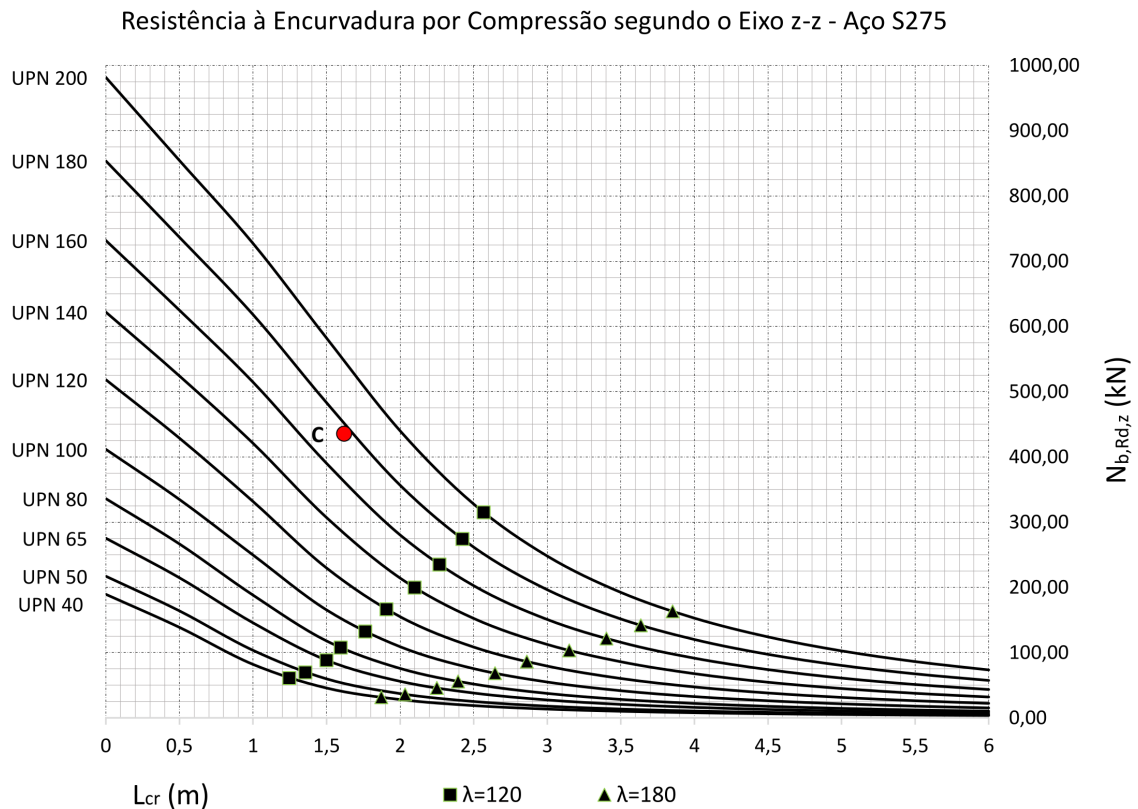


Figura 8.11 Ábacos de Pré-dimensionamento dos Cordões (Eixo z-z).

Solução de pré-dimensionamento: Os cordões das asnas são formados por perfis UPN 180.

Pré-dimensionamento das barras interiores

Esforço axial máximo nos montantes:

$$M = \frac{qb}{2} = \frac{11,7 \times 0,65}{2} = 3,8 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nas diagonais:

$$D = \frac{V_{\text{máx}} - M}{\sin \alpha} = \frac{146,25 - 3,8}{\sin 21} = 397,9 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nos prumos:

$$P = qb = 11,7 \times 0,80 = 9,4 \text{ kN}$$

Na tabela 8.7 indicam-se os esforços axiais máximos de cálculo nos componentes internos das asnas, assim como os comprimentos de encurvadura.

Tabela 8.7 Comprimentos de encurvadura - Elementos externos Asna Tipo

Elemento	$N_{Ed}(kN)$	$L_{cr}(m)$
Diagonais	397,9	1,39
Prumos	9,4	2,1
Montantes	3,8	0,3

Em virtude do comprimento reduzido de encurvadura dos montantes, a solução adotada baseou-se em critérios meramente construtivos, tendo-se optado pela utilização de 2UNP 180 em caixão, de forma a respeitar a largura dos cordões das asnas.

As diagonais e os prumos das asnas são compostos por barras afastadas a 180 mm. Neste caso, estes elementos podem ser dimensionados individualmente, considerando que o esforço axial é distribuído pelas duas barras que formam a secção do elemento.

Uma vez que os comprimentos de encurvadura são iguais no plano e fora do plano da estrutura, utilizou-se para o pré-dimensionamento destes elementos o ábaco da figura 8.12.

Resistência à Encurvadura por Compressão segundo o eixo z-z

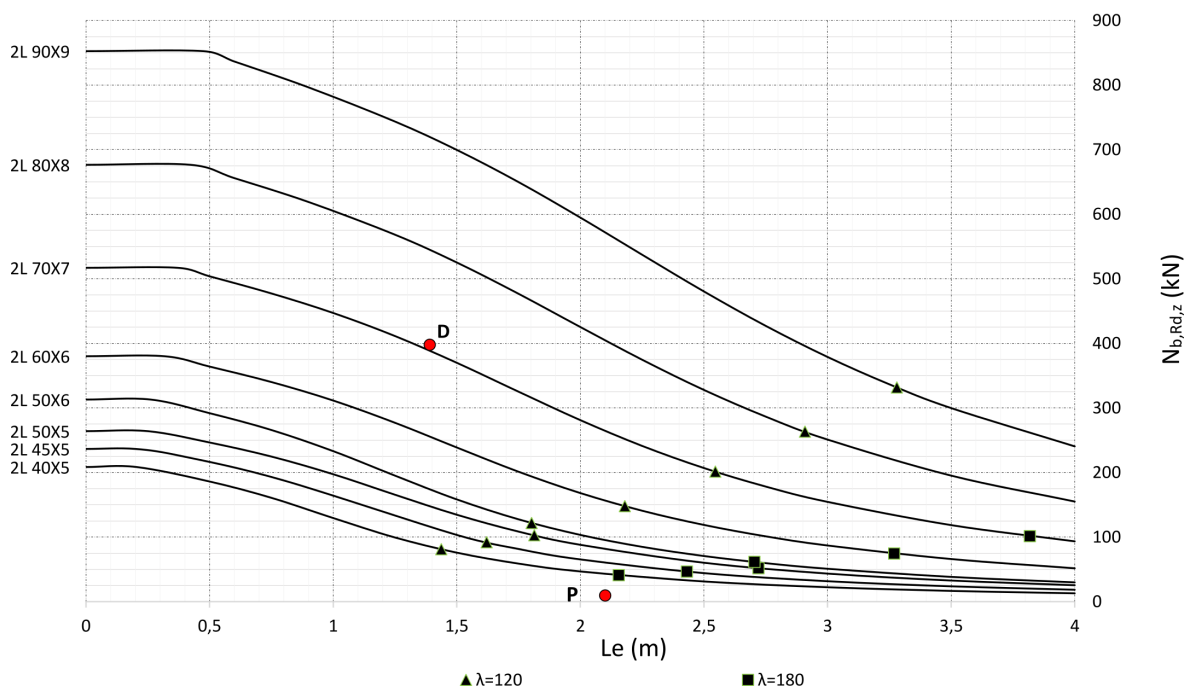


Figura 8.12 Ábacos de Resistência à Encurvadura de Cantoneiras (Aço S275).

Solução de pré-dimensionamento: Com base no ábaco da figura 8.12, optou-se por 2L 80x8 para as diagonais e 2L 40x5 para os prumos.

8.2.2 Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 1

As Vigas de Travamento do Tipo 1 estão apenas sujeitas ao peso próprio dos seus elementos que corresponde a uma carga atuante de cálculo de 1,93 kN/m.

Na figura 8.13 mostram-se os diagramas de momentos fletores e de esforços transversos para estas vigas.

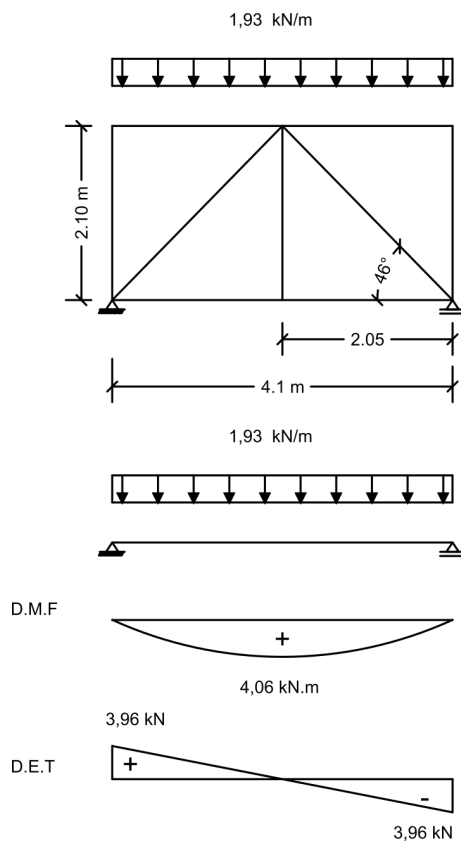


Figura 8.13 Diagrama de momentos fletores e esforço transversal.

Pré-dimensionamento das barras dos cordões

Esforço axial máximo

$$C = T = \frac{M_{\text{máx}}}{H} = \frac{4,06}{2,1} = 1,93 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura considerados são os indicados na tabela 8.8.

Tabela 8.8 Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z - VT1.

Plano de encurvadura	$L_{cr} (m)$	Eixo de encurvadura	$N_{Ed} (kN)$
Plano da estrutura	2,05	z	1,93
Fora do plano da estrutura	4,1	y	1,93

O pré-dimensionamento destas barras foi realizado com base nos ábacos das figuras 8.14 e 8.15.

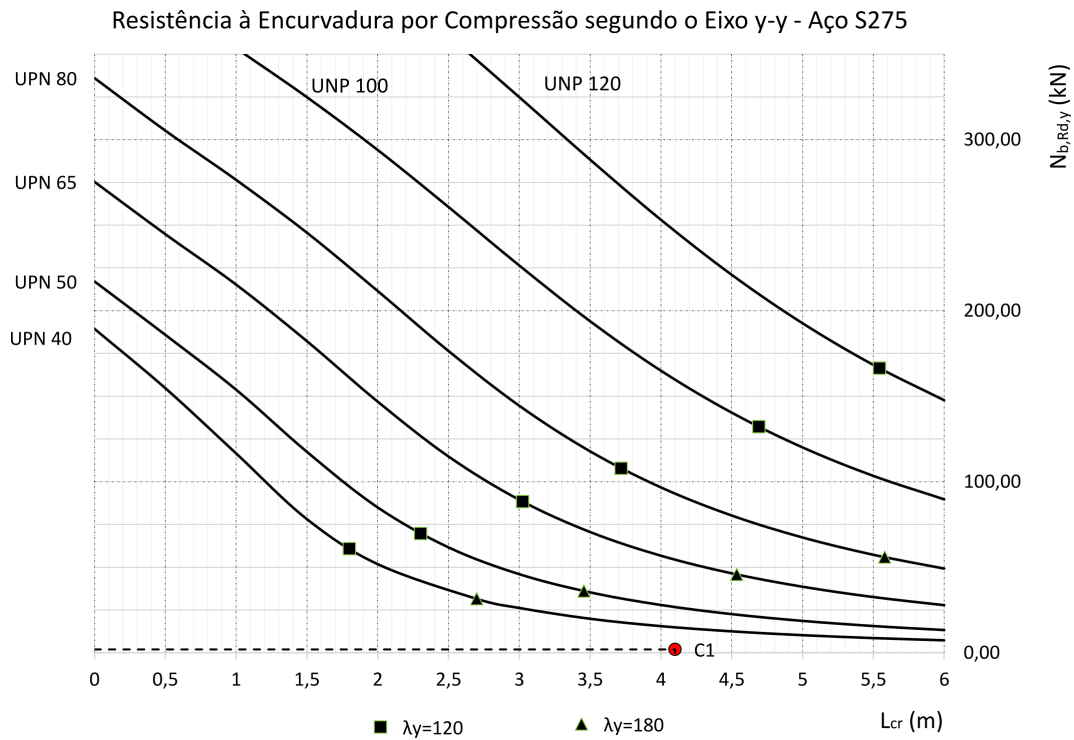


Figura 8.14 Ábacos de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).

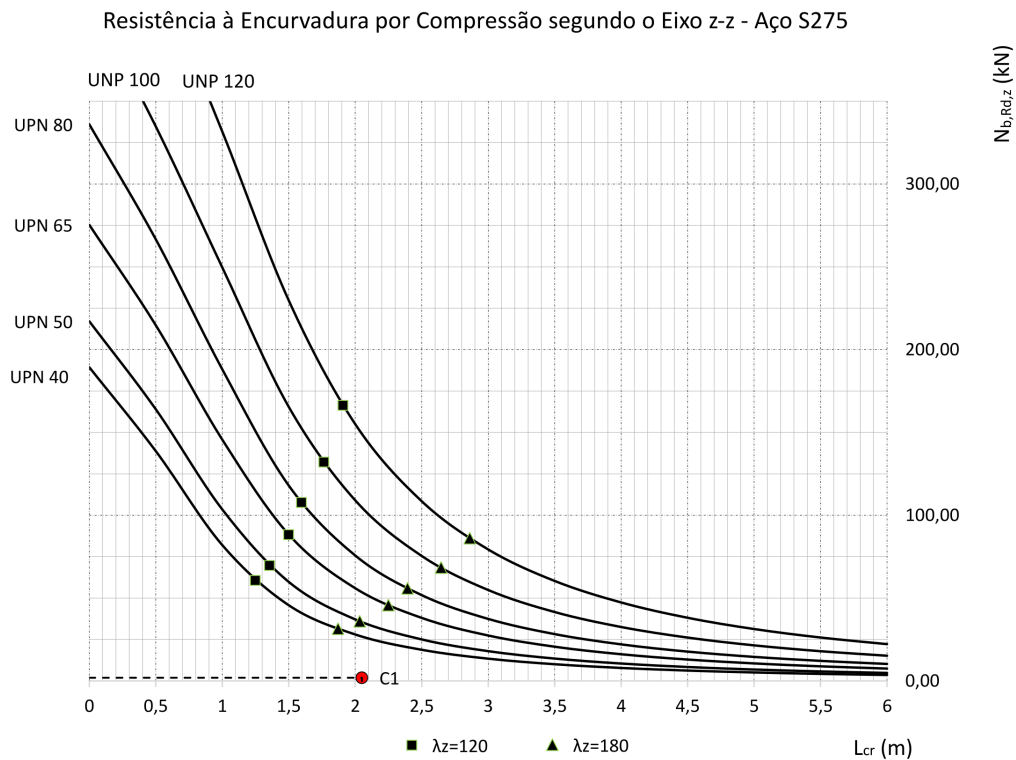


Figura 8.15 Ábacos de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).

Solução de pré-dimensionamento: Optou-se para os cordões destas vigas perfis UPN 80.

Pré-dimensionamento das diagonais e prumos

Esforço axial máximo nos montantes

$$M = \frac{qb}{2} = \frac{1,93 \times 2,05}{2} = 1,96 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nas diagonais

$$D = \frac{V_{\text{máx}} - M}{\sin \alpha} = \frac{3,96 - 1,96}{\sin 46} = 2,78 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nos prumos

$$P = qb = 1,93 \times 2,05 = 3,96 \text{ kN}$$

Estas barras foram pré-dimensionadas com base nos ábacos de resistência à encurvadura de cantoneiras simples (ver figura 8.16). Os comprimentos de encurvadura destes elementos são iguais dentro e fora do plano da estrutura conforme se mostra na tabela 8.9.

Tabela 8.9 Comprimentos de encurvadura - barras interiores.

Elemento	$N_{Ed}(kN)$	$L_{cr}(m)$
Montantes	1,96	2,1
Diagonais	2,78	2,94
Prumos	3,96	2,1

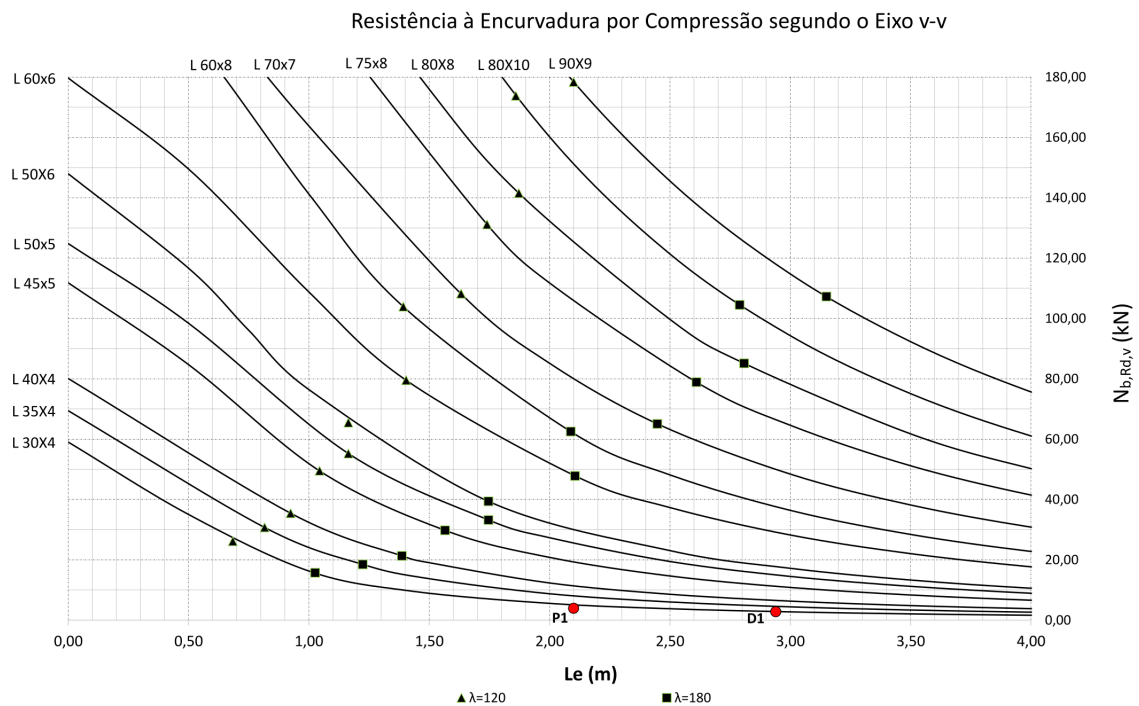


Figura 8.16 Ábaco de Pré-dimensionamento das barras interiores.

Solução de pré-dimensionamento: Uma vez que os esforços são muito reduzidos, o critério de pré-dimensionamento passou por limitar as esbeltezas destas barras a valores máximos de $\lambda = 180$. Os montantes são os mesmos dos prumos das asnas pelo que não foram analisados. As diagonais são formadas por cantoneiras L 90X9, e os prumos por L 60X6.

8.2.3 Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 2

A Viga de Travamento Tipo 2 encontra-se sujeita apenas ao peso próprio dos seus elementos, a que corresponde uma carga uniformemente distribuída de 3,29 kN/m.

Na figura 8.17 mostram-se os diagramas de momentos fletores e de esforços transversos que servem para a determinação dos esforços nas barras mais solicitadas dos cordões exteriores e das barras interiores da treliça.

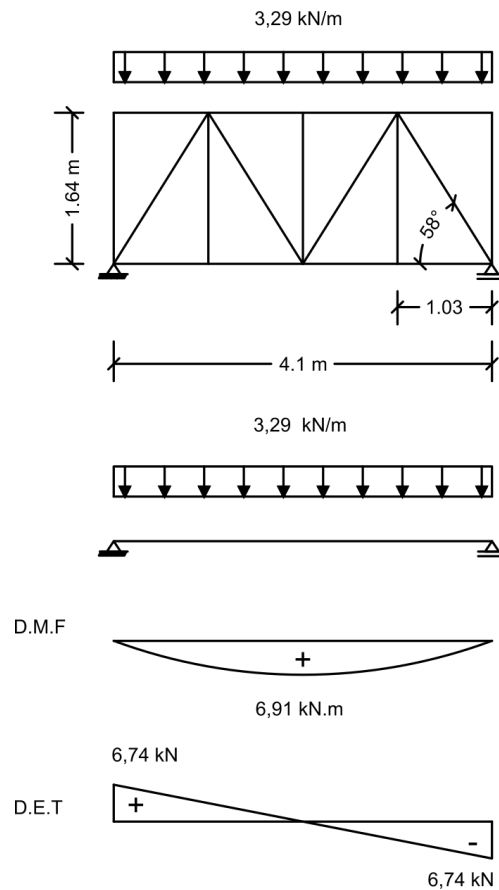


Figura 8.17 Diagrama de momentos fletores e esforço transverso.

Pré-dimensionamento das barras dos cordões

Esforço axial máximo nos cordões

$$C = T = \frac{M_{\text{máx}}}{H} = \frac{6,91}{1,64} = 4,21 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura considerados no pré-dimensionamento são os indicados na tabela 8.10.

Tabela 8.10 Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z.

Plano de encurvadura	$L_{cr}(m)$	Eixo de encurvadura	$N_{Ed}(kN)$
Plano da estrutura	1,03	z	4,21
Fora do plano da estrutura	4,1	y	4,21

O pré-dimensionamento dos cordões foi efetuado a partir dos ábacos das figuras 8.18 e 8.19.

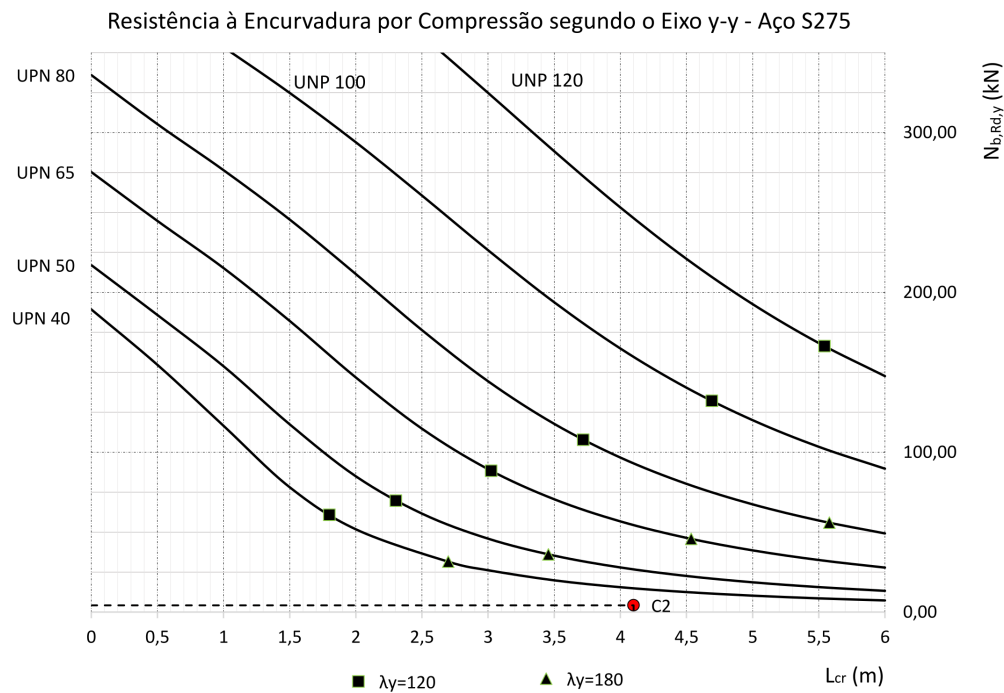


Figura 8.18 Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).

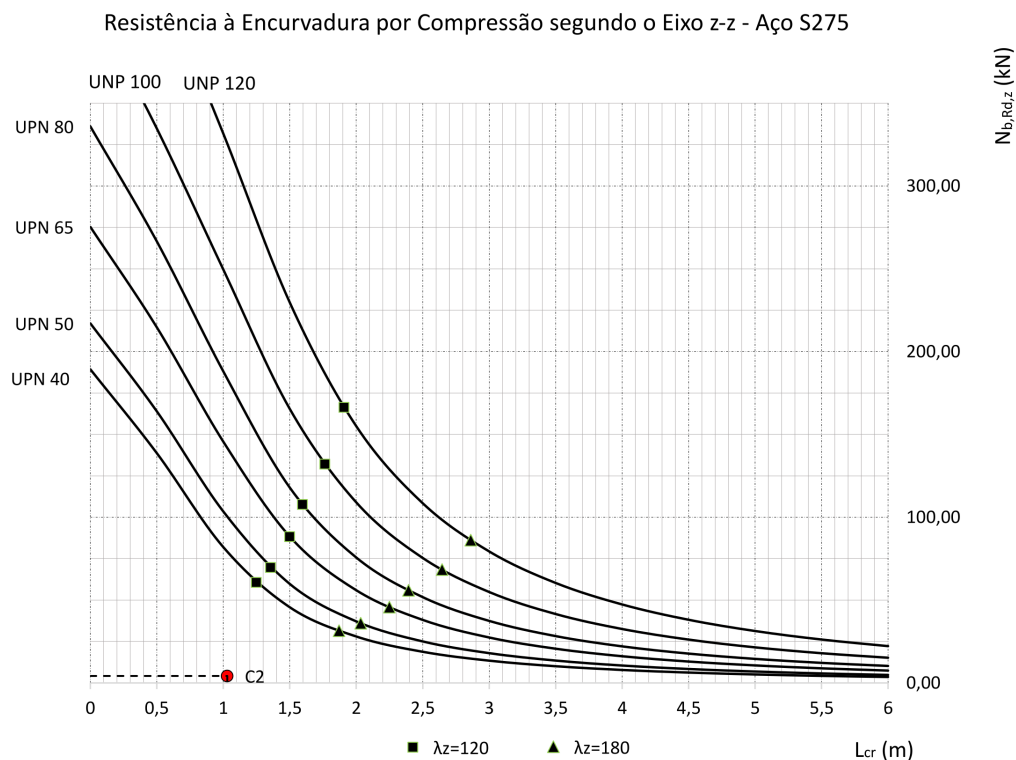


Figura 8.19 Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).

Solução de pré-dimensionamento: Considerou-se para os cordões das vigas VT2 perfis UNP 80.

Pré-dimensionamento das barras interiores

Esforço axial máximo nos montantes

$$M = \frac{qb}{2} = \frac{3,29 \times 1,03}{2} = 1,69 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nas diagonais

$$D = \frac{V_{\text{máx}} - M}{\sin \alpha} = \frac{6,74 - 1,69}{\sin 58} = 5,96 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nos prumos

$$P = qb = 3,29 \times 1,03 = 3,39 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura são os indicados na tabela 8.11.

Tabela 8.11 Comprimentos de encurvadura

Elemento	$N_{Ed}(kN)$	$L_{cr}(m)$
Montantes	1,69	1,64
Diagonais	6,39	1,93
Prumos	3,39	1,64

O pré-dimensionamento destas barras foi realizado com base nos ábacos da figura 8.20, de modo a não ultrapassar esbeltezas superiores a 180.

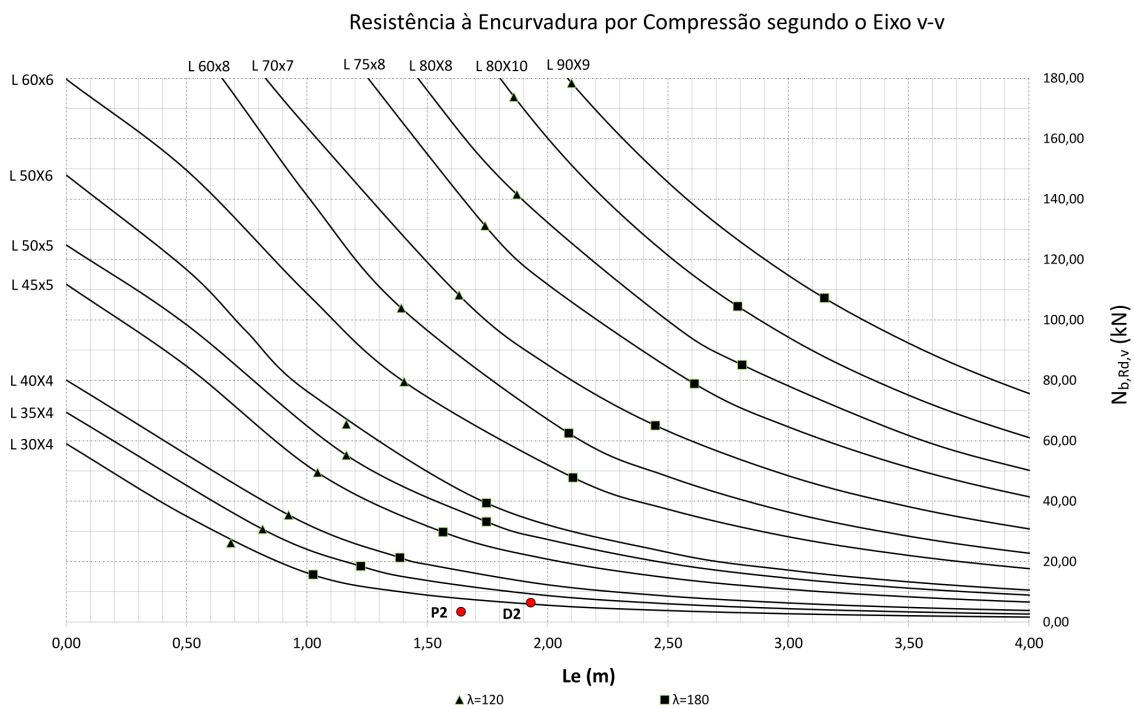


Figura 8.20 Ábacos de Pré-dimensionamento dos prumos e diagonais.

Solução de pré-dimensionamento: Optou-se para as diagonais cantoneiras L 60x6 e para os prumos L 50x5.

8.2.4 Pré-dimensionamento das vigas de travamento Tipo 3

Tal como as vigas de travamento dos Tipos 1 e 2 também a viga de travamento do Tipo 3 está sujeita apenas ao seu peso próprio que corresponde a uma carga uniformemente distribuída igual a 2,82 kN/m.

A figura 8.21 mostra os diagramas de momentos fletores e de esforços transversos obtidos na Viga de Travamento Tipo 3.

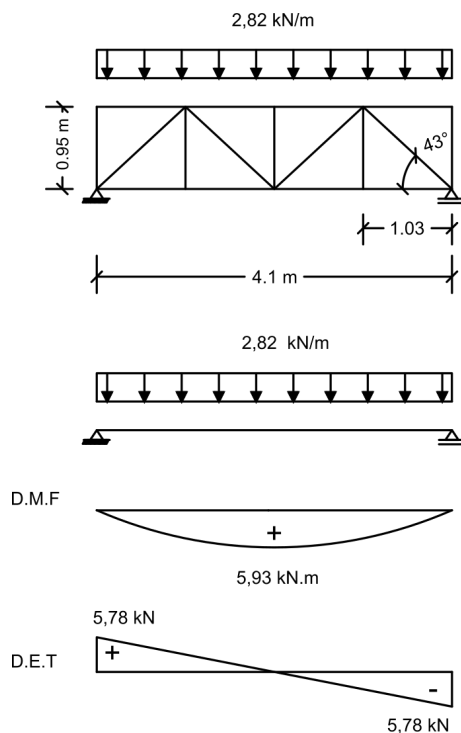


Figura 8.21 Diagrama de momentos fletores e esforço transversal.

Pré-dimensionamento das barras dos cordões

Esforço axial máximo nos cordões

$$C = T = \frac{M_{\text{máx}}}{H} = \frac{5,93}{0,95} = 6,24 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura estão indicados na tabela 8.12.

Tabela 8.12 Comprimentos de encurvadura segundo os eixos y e z

Plano de encurvadura	$L_{cr}(m)$	Eixo de encurvadura	$N_{Ed}(kN)$
Plano da estrutura	1,03	z	5,93
Fora do plano da estrutura	4,1	y	5,93

O pré-dimensionamento destas barras foi efetuado a partir dos ábacos das figuras 8.22 e 8.23 nunca ultrapassando esbeltezas superiores a 180.

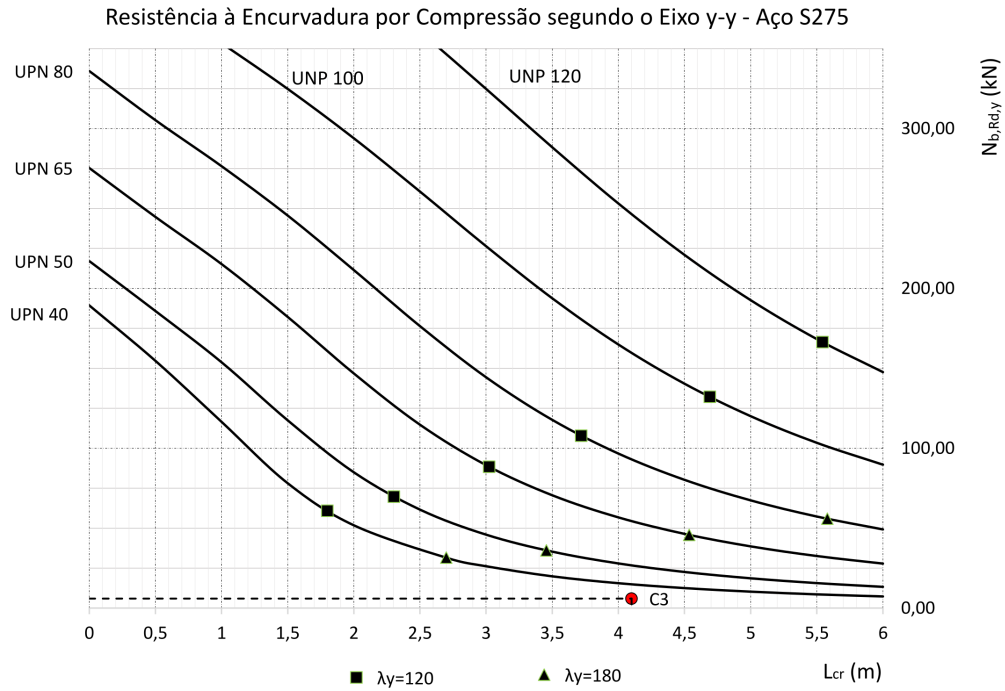


Figura 8.22 Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo y-y).

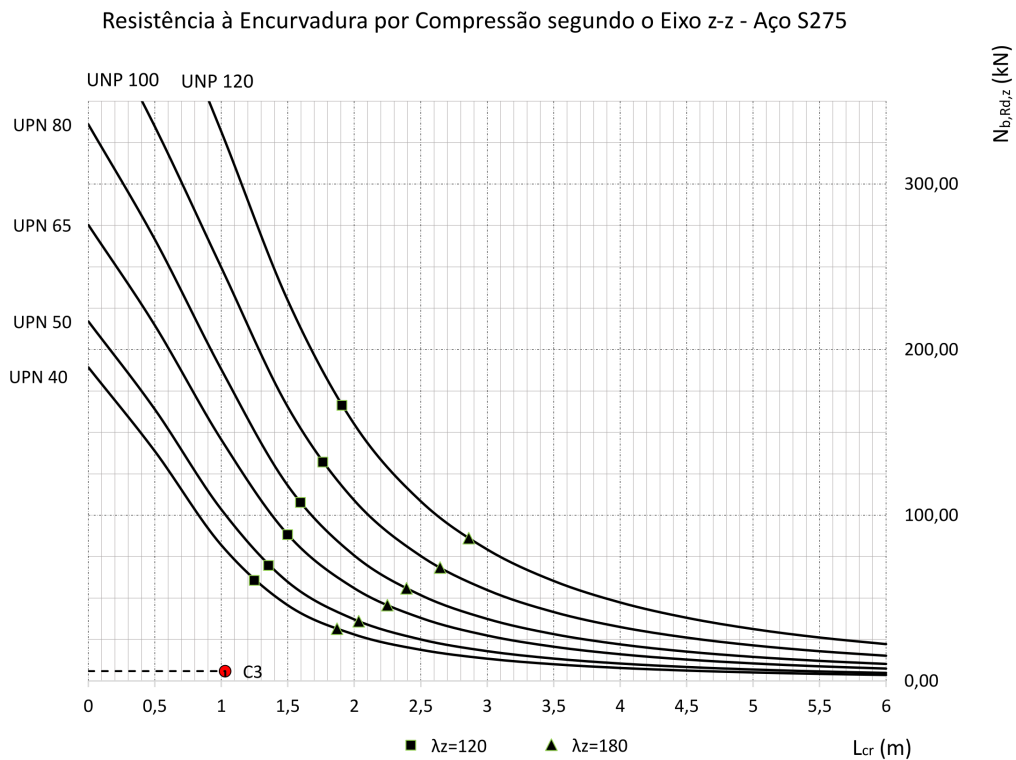


Figura 8.23 Ábaco de pré-dimensionamento dos cordões (Eixo z-z).

Solução de pré-dimensionamento: Considerou-se os cordões destas vigas perfis UPN 80.

Pré-dimensionamento das barras interiores

Esforço axial máximo nos montantes

$$M = \frac{qb}{2} = \frac{2,82 \times 1,03}{2} = 1,45 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nas diagonais

$$D = \frac{V_{\text{máx}} - M}{\sin \alpha} = \frac{5,78 - 1,45}{\sin 43} = 6,37 \text{ kN}$$

Esforço axial máximo nos prumos

$$P = qb = 2,82 \times 1,03 = 2,9 \text{ kN}$$

Os comprimentos de encurvadura considerados são os indicados na tabela 8.13.

Tabela 8.13 Comprimentos de encurvadura

Elemento	$N_{Ed}(kN)$	$L_{cr}(m)$
Montantes	1,45	0,95
Diagonais	6,37	1,4
Prumos	2,9	0,95

Para o pré-dimensionamento destas barras utilizou-se o ábaco da figura 8.24.

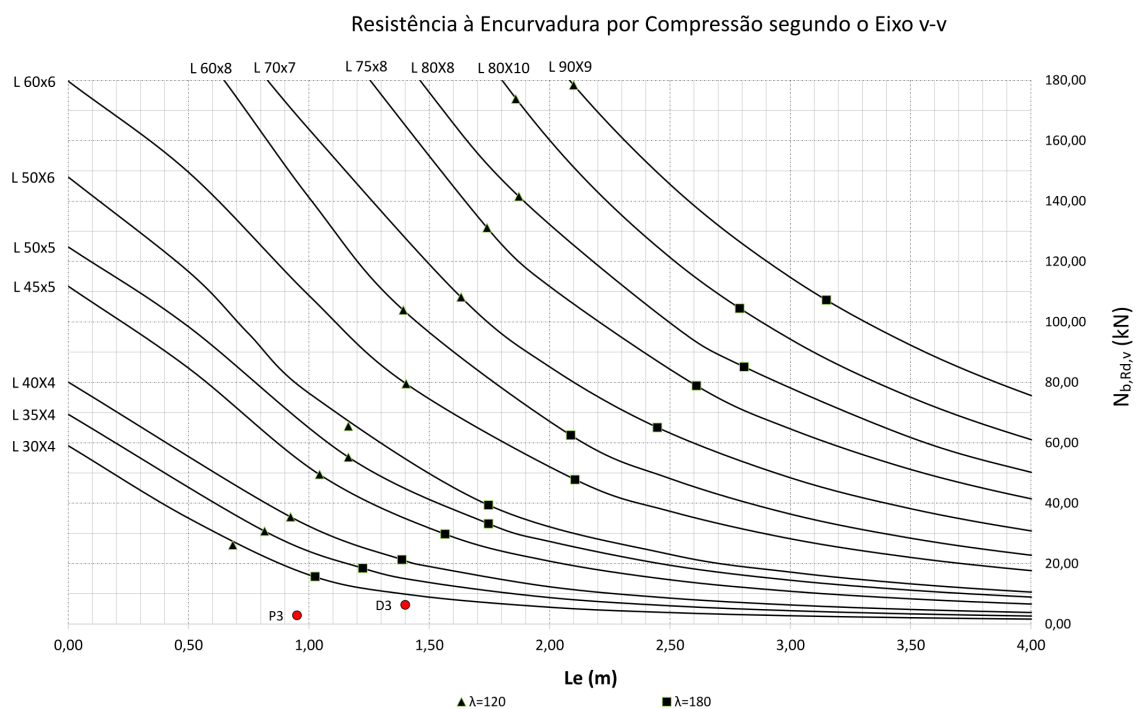


Figura 8.24 Ábacos de Pré-dimensionamento dos montantes e diagonais.

Solução de pré-dimensionamento: Optou-se para as diagonais cantoneiras L 45x5 e para os prumos L 35x4.

8.2.5 Pré-dimensionamento das madres de cobertura

O pré-dimensionamento das madres da cobertura foi realizado em relação aos estados limites últimos e de serviço tendo em conta as seguintes ações:

- Peso próprio (PP);
- Restantes Cargas Permanentes (RCP);
- Sobrecargas (SC);
- Ação do Vento ($W^{(+)}/W^{(-)}$).

Consideraram-se as combinações de ações mais desfavoráveis:

Combinação 1

$$q_{Ed} = 1,35 \times (PP + RCP) + 1,5 \times (W^{(+)} + SC)$$

Combinação 2

$$q_{Ed} = 1,0 \times (PP + RCP + SC) - 1,5 \times W^{(-)}$$

Tabela 8.14 Determinação das combinações nas madres de cobertura.

Combinação	PP(kN/m)	RCP(kN/m)	SC(kN/m)	$W^{(+)}$ (kN/m)	$W^{(-)}$ (kN/m)	q_{Ed} (kN/m)
Combinação 1	0,08	0,99	1,29	0,56	-	4,22
Combinação 2	0,08	0,99	1,29	-	2,43	-1,29

As madres de cobertura estão sujeitas a flexão desviada uma vez que os seus eixos têm um inclinação de 8 graus com a horizontal.

Na tabela 8.15 mostram-se os valores das cargas resultantes da decomposição dos momentos fletores atuantes segundo os eixos y e z.

Tabela 8.15 Momentos fletores segundo y e z.

q_{Ed}	$q_{Ed,z} = q_{Ed} \times \sin 8$	$M_{Ed,z} = \frac{ql^2}{8}$
4,22 (kN/m)	0,59 (kN/m)	1,23 (kN.m)
q_{Ed}	$q_{Ed,y} = q_{Ed} \times \cos 8$	$M_{Ed,y} = \frac{ql^2}{8}$
4,22 (kN/m)	4,18 (kN/m)	8,78 (kN.m)

O pré-dimensionamento destas vigas foi realizado a partir do ábaco de flexão desviada em perfis IPE para as classes 1 e 2, presente na figura 8.25.

Ábaco de Flexão Desviada - Perfis IPE's

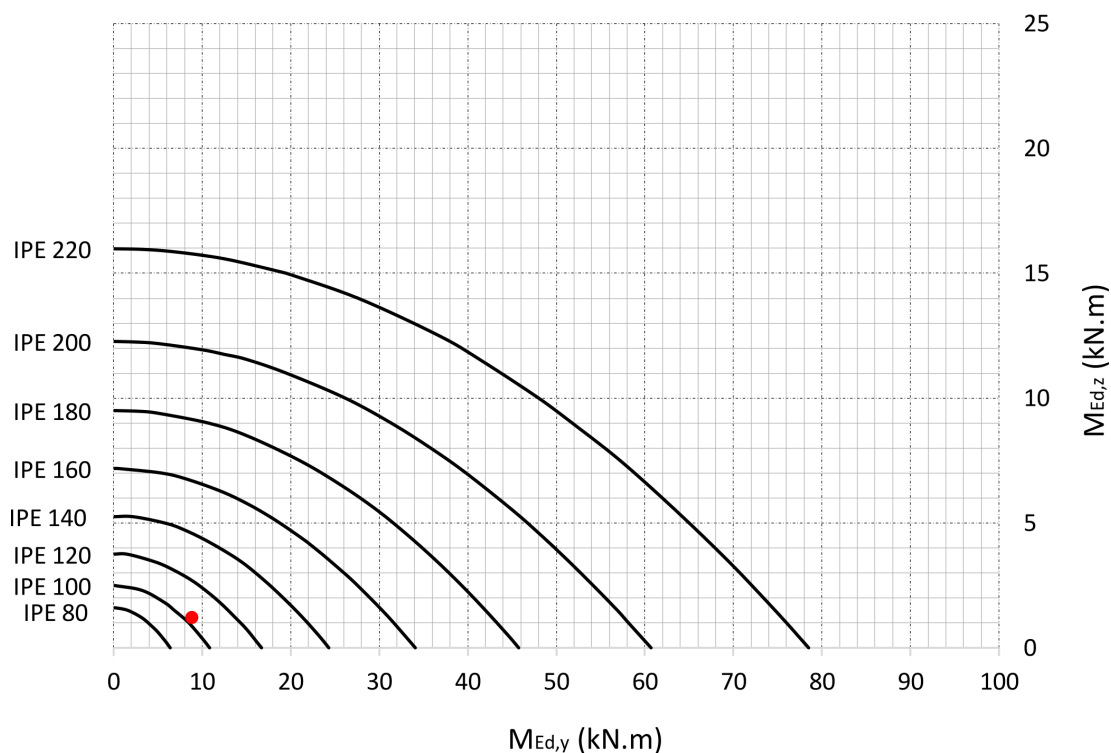


Figura 8.25 Ábaco de pré-dimensionamento.

Solução de pré-dimensionamento: Optou-se por perfis IPE 120.

8.2.6 Pré-dimensionamento das madres dos alçados

O pré-dimensionamento destas vigas foi efetuado considerando as seguintes ações:

- Peso próprio (PP);
- Restantes Cargas Permanentes (RCP);
- Ação do Vento ($W^{(-)}$).

A carga atuante de cálculo máxima corresponde à seguinte combinação:

$$q_{Ed} = 1,35 \times (PP + RCP) + 1,5 \times W^{(-)}$$

Na tabela 8.16 indica-se o valor obtido para esta ação decomposta segundo os dois eixos principais de inércia.

Tabela 8.16 Determinação das cargas das madres dos alçados laterais.

q_{Ed}	PP(kN/m)	RCP(kN/m)	$W^{(-)}$ (kN/m)	Valor (kN/m)
$q_{Ed,y}$	0,13	1,22	-	1,82
$q_{Ed,z}$	-	-	2,39	3,59

A tabela 8.16 mostra que o carregamento mais desfavorável é devido à ação do vento (segundo z).

Tal como nas madres de cobertura o pré-dimensionamento das madres dos alçados foi também realizado seguindo os mesmos critérios enunciados anteriormente, considerando que estas vigas estão sujeitas a flexão desviada.

Os valores obtidos dos momentos fletores atuantes nos alçados laterais e de topo estão indicados nas tabelas 8.17 e 8.18.

Tabela 8.17 Momentos fletores nas madres dos alçados laterais.

Momento	$q_{Ed,y}(kN/m)$	$q_{Ed,z}(kN/m)$	Vão (m)	Valor ($kN.m$)
M_z	1,82	-	7,2	11,82
M_y	-	3,59	7,2	23,23

Tabela 8.18 Momentos fletores nas madres dos alçados de topo.

Momento	$q_{Ed,y}(kN/m)$	$q_{Ed,z}(kN/m)$	Vão (m)	Valor ($kN.m$)
M_z	1,82	-	5,2	6,17
M_y	-	3,59	5,2	12,12

Para o pré-dimensionamento destas barras recorreu-se ao ábaco de flexão desviada em perfis UNP (classes 1 e 2) presente na figura 8.26.

Ábaco de Flexão Desviada - Perfis UNP

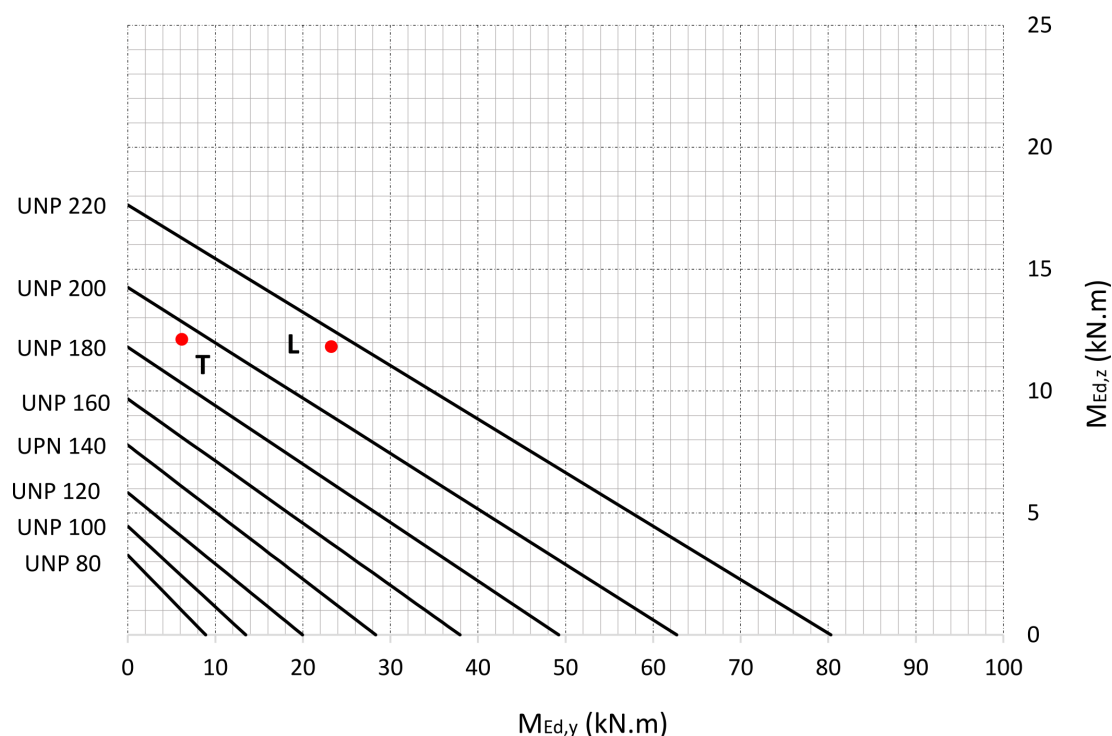


Figura 8.26 Ábaco de pré-dimensionamento.

Solução de pré-dimensionamento: Escolheram-se para as madres dos alçados de topo perfis UPN 200 e UPN 220 para os alçados laterais.

8.2.7 Pré-dimensionamento dos pilares dos alçados de topo

O pré-dimensionamento dos pilares dos alçados de topo foi realizado com base nos esforços axiais e momentos fletores atuantes nestes elementos, que funcionam fundamentalmente

como colunas-viga, através da expressão:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,Rd}} \leq 1,0$$

Nota: Nesta fase considerou-se para k_{yy} o valor unitário.

As ações consideradas no pré-dimensionamento destes elementos foram as seguintes:

- Peso próprio (PP);
- Restantes Cargas Permanentes (RCP);
- Ação do Vento ($W^{(-)}$).

O valor do esforço axial atuante foi calculado tendo em consideração as áreas de influência destes elementos, tendo presente a combinação de ação mais desfavorável:

$$N_{Ed} = 1,35 \times (PP + RCP)$$

Tabela 8.19 Esforço axial atuante nos pilares dos alçados de topo.

Esforço atuante	PP(kN)	RCP(kN)	Valor (kN)
N_{Ed}	31,92	61,06	125,52

A ação do vento provoca flexão segundo o eixo de maior inércia. O valor do momento fletor atuante considerado foi determinado com base nas áreas de influência do pilar para a ação do vento, a partir da combinação:

$$M_{Ed,y} = 1,5 \times W^{(-)}$$

O valor do momento fletor atuante nos pilares dos alçados de topo foi calculado considerando-o simplesmente apoiado e sujeito a uma carga uniformemente distribuída:

$$M_{Ed,y} = \frac{q \times L^2}{8}$$

Tabela 8.20 Momento fletor atuante nos pilares dos alçados de topo.

Esforço atuante	$W^{(-)}$ (kN/m)	Vão (m)	Valor (kN.m)
$M_{Ed,y}$	9,33	19,25	432,17

O pré-dimensionamento destes pilares foi realizado com recurso ao ábaco de elementos sujeitos a flexão composta com compressão ($N + M_y$) para os perfis da série IPE presentes na figura 8.27.

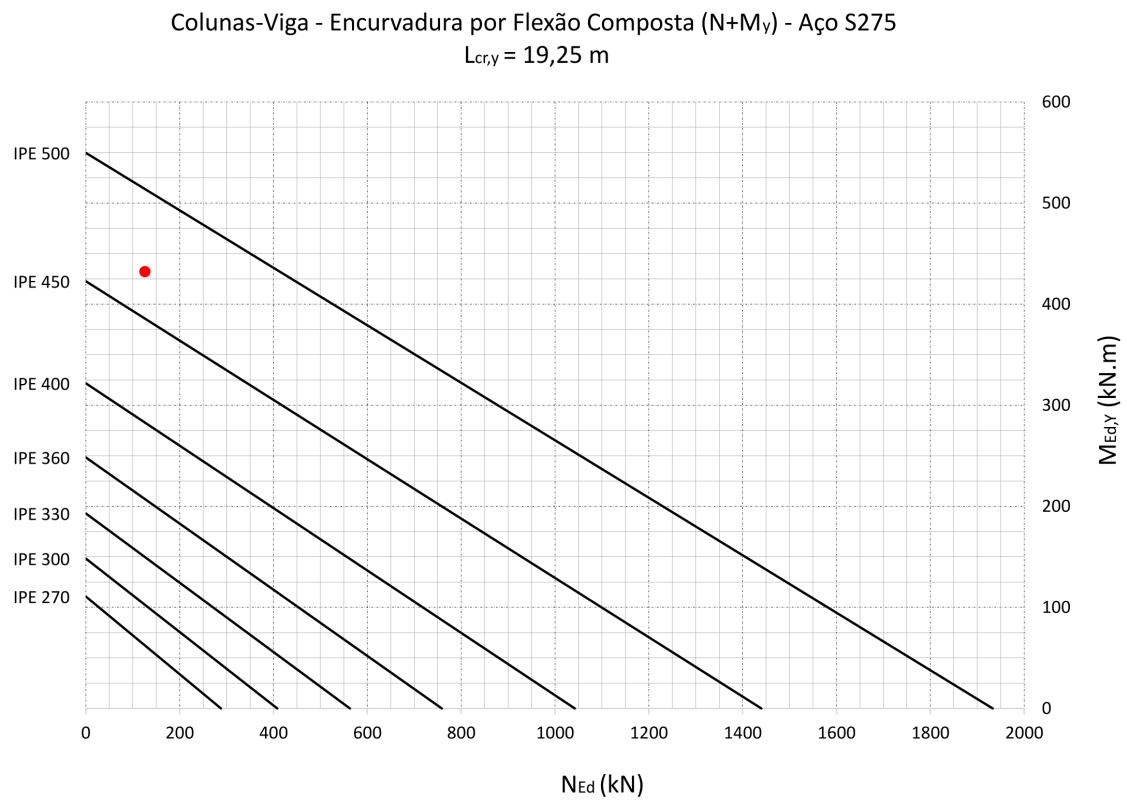


Figura 8.27 Ábaco de pré-dimensionamento dos pilares dos alçados de topo.

Solução de pré-dimensionamento: Escolheram-se perfis IPE 500.

Capítulo 9

Dimensionamento

9.1 Dimensionamento dos Elementos Metálicos

O dimensionamento de todos os elementos em aço constituintes da estrutura foi realizado em relação aos estados limites últimos e de utilização, tendo em consideração os princípios mencionados na memória descritiva deste projeto.

Os esforços nas barras foram obtidos no *software* “SAP2000” a partir das combinações de ações mais condicionantes para os estados limites últimos e de utilização.

A verificação das secções das barras e dos elementos foi efetuada através de tabelas de cálculo e recorrendo também a ábacos de dimensionamento elaborados em “Excel”, com base nas expressões de dimensionamento definidas na NP EN 1993-1-1.

De forma a facilitar a compreensão do dimensionamento apresentado para todos os elementos metálicos foram criadas diversas famílias de barras, e utilizada uma nomenclatura própria para alguns dos elementos indicada na tabela seguinte.

Tabela 9.1 Tipologia dos elementos metálicos.

Estrutura	Elementos	Tipologia
Asnas	Cordões	Coluna
	Diagonais	Coluna
	Prumos	Coluna
Vigas de Travamento	Cordões	Coluna
	Diagonais	Coluna
	Prumos	Coluna
Elementos de contraventamento	Travamentos Cruz de Sto. André	Coluna
	Tarugos	Coluna
Suporte dos revestimentos dos alçados e cobertura	Madres da cobertura	Viga
	Madres dos alçados	Viga
Elementos dos alçados de topo	Vigas	Viga
	Pilares	Coluna-Viga

Os elementos que formam as asnas e as vigas de travamento funcionam como barras bi-articuladas, sujeitos fundamentalmente a esforços de tração e/ou compressão. Por esta razão, o dimensionamento destes elementos resume-se à verificação da resistência das secções transversais a esforços axiais de compressão/tração, e à verificação à encurvadura, limitando a esbelteza a 180.

De referir, ainda, que no caso das cantoneiras isoladas, o “SAP2000” considera para a esbelteza a expressão 9.1, enquanto o EC3 define uma esbelteza efetiva a partir da expressão 9.2.

$$\bar{\lambda}_v = \frac{l_{cr,v}}{i_v} \times \frac{1}{\lambda_1} \quad (9.1)$$

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v \quad (9.2)$$

No que respeita ao dimensionamento de cantoneiras isoladas importa referir que as tabelas de cálculo e ábacos foram elaborados de acordo com a expressão 9.2.

Os elementos classificados como vigas e como colunas-vigas foram dimensionados em conformidade com a metodologia descrita na NP EN 1993-1-1 e na memória descritiva, recorrendo a tabelas de cálculo e ábacos realizados em “Excel”, e também aos *softwares* “SAP2000”, “SemiComp+” e “LTBeamN”.

9.1.1 Dimensionamento das asnas da cobertura

Na figura 9.1 encontram-se identificadas as asnas da cobertura no módulo tipo.

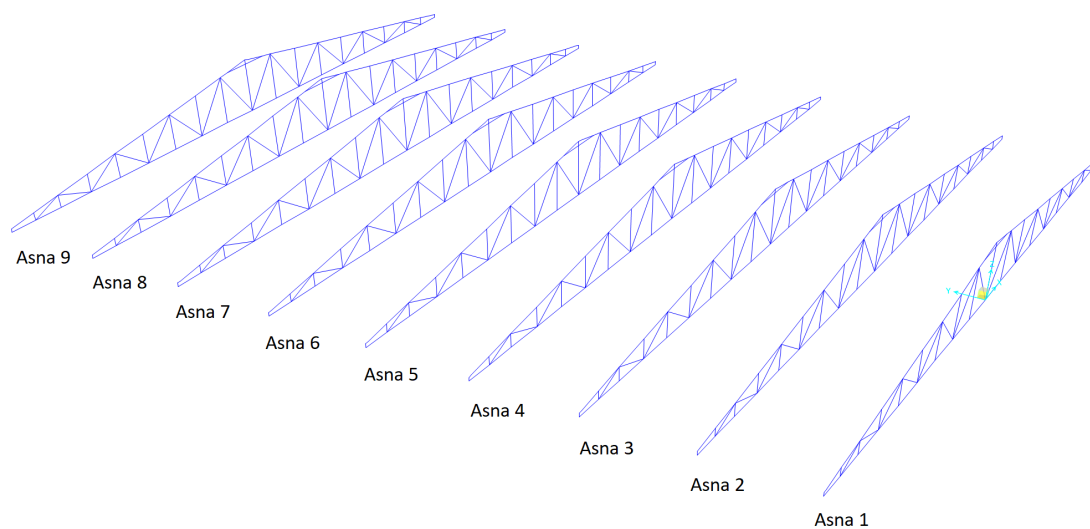


Figura 9.1 Identificação das asnas da cobertura.

Na figura 9.2 mostra-se a numeração adotada para as barras que constituem as asnas da cobertura.

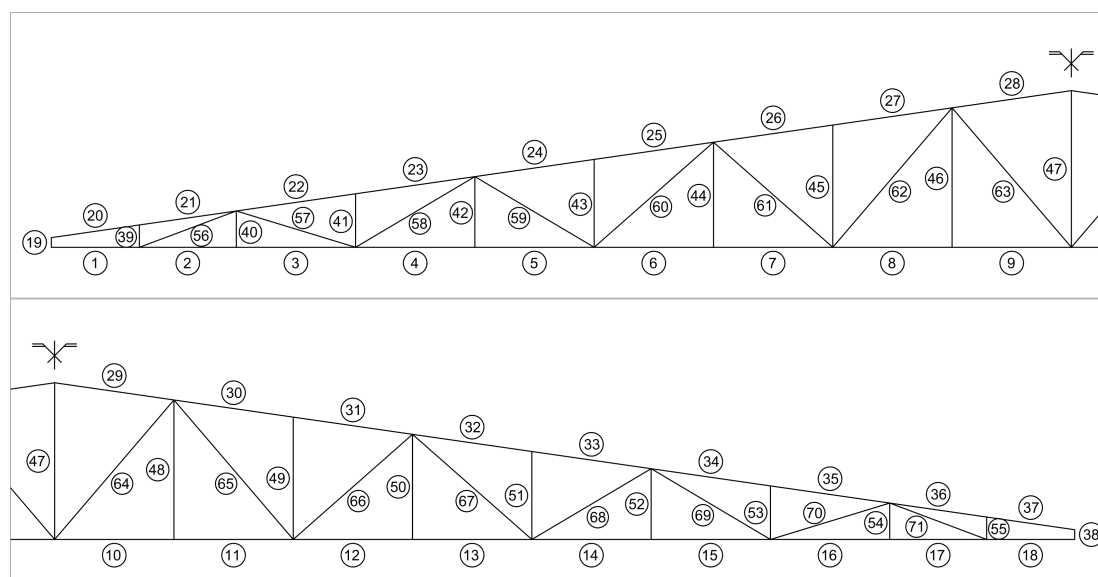


Figura 9.2 Numeração adotada nas barras das asnas da cobertura.

Nas tabelas 9.2, 9.3, 9.4 e 9.5 resumem-se os esforços axiais máximos de cálculo nas barras das asnas da cobertura, bem como as combinações mais desfavoráveis que lhes estão associadas.

Tabela 9.2 Esforços axiais máximos nos cordões inferiores das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Nº Asna	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
1	271	1	Compressão	ELU.ET1y_PR2A	105,38
1	271	4	Tração	ELU.ET1y_PR1B	113,25
2	198	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	143,54
2	234	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	180,12
3	197	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	143,54
3	233	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	180,12
4	196	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	227,13
4	232	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	307,12
5	195	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	231,44
5	267	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	329,97
6	194	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	220,33
6	266	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	312,67
7	193	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	220,33
7	265	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	312,67
8	176	1	Compressão	ELU2.Wy_PR1A (T-)	191,14
8	246	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	268,17
9	175	1	Compressão	ELU2.Wy_PR1A (T-)	191,14
9	245	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	268,17
10	174	1	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	192,47
10	244	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR1A_Wxx3 (T-)	261,13
11	173	1	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	192,47
11	243	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR1A_Wxx3 (T-)	261,13
12	224	4	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	221,02
12	260	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	306,35
13	223	4	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	221,02
13	259	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	306,35
14	204	3	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	229,97
14	258	6	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	322,75
15	221	4	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	232,07
15	221	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	297,02
16	220	4	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	-138,13
16	220	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	172,04
17	219	4	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	138,13
17	219	4	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	172,04
18	236	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	22,80
18	236	5	Tração	ELU2.Wy_PR1A (T-)	19,23

Tabela 9.3 Esforços axiais máximos nos cordões superiores das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Nº Asna	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
20	127	8	Compressão	ELU.ET1y_PR1B	41,88
20	109	7	Tração	ELU.ET1y_PR1B	42,76
21	144	8	Compressão	ELU.ET1y_PR1B	38,74
21	126	7	Tração	ELU.ET1y_PR1B	42,15
22	89	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	46,11
22	71	4	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	273,06
23	88	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	346,73
23	70	4	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	274,67
24	87	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	349,96
24	51	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	293,83
25	86	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	349,75
25	50	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	296,26
26	85	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	314,47
26	49	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	267,37
27	84	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	326,76
27	48	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	269,04
28	83	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	269,41
28	47	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	227,37
29	75	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T+)	266,29
29	39	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	227,58
30	76	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	318,13
30	40	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	269,14
31	41	6	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	303,90
31	41	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	267,49
32	96	6	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	341,95
32	42	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	296,66
33	43	3	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	343,44
33	43	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	295,21
34	80	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	330,03
34	80	5	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	267,18
35	81	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	329,21
35	81	5	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	265,63
36	82	5	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	18,35
36	82	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	23,17
37	74	5	Compressão	ELU2.Wy_PR1A (T-)	19,53
37	74	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	23,50

Tabela 9.4 Esforços axiais máximos nos prumos das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Nº Asna	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
19	618	8	Compressão	ELU.ET1y_PR1B	7,97
19	598	7	Tração	ELU.ET1y_PR1B	7,34
39	556	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1A_Wx3 (T+)	14,00
39	496	2	Tração	ELU2.Wx1_PR1B (T-)	14,97
40	554	5	Compressão	ELU2.SC_COB_PR1A_Wx3 (T-)	1,46
40	554	5	Tração	ELU1.Wy_PR2B (T+)	1,84
41	613	8	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	13,08
41	493	2	Tração	ELU2.Wx1_PR1B (T-)	15,52
42	470	1	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	6,63
42	469	2	Tração	ELU1.Wy_PR1B (T+)	10,97
43	612	8	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	13,01
43	492	2	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	14,53
44	-	-	Compressão	-	-
44	617	8	Tração	ELU1.Wxx2_PR1B (T+)	1,38
45	491	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	14,52
45	491	2	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	15,12
46	610	8	Compressão	ELU2.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	1,15
46	490	2	Tração	ELU1.Wy_PR1B (T+)	1,99
47	555	5	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	44,10
47	555	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	53,36
48	579	6	Compressão	ELU2.SC_COB_PR1A_Wxx3 (T-)	1,13
48	499	2	Tração	ELU1.Wy_PR2A (T+)	1,96
49	500	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	14,51
49	500	2	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	15,13
50	-	-	Compressão	-	-
50	601	7	Tração	ELU1.Wx2_PR2B (T+)	1,28
51	502	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T-)	12,99
51	502	2	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	14,49
52	623	8	Compressão	ELU2.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	7,27
52	503	2	Tração	ELU1.Wy_PR1B (T-)	11,92
53	504	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T-)	13,07
53	504	2	Tração	ELU2.Wxx1_PR2A (T+)	15,47
54	565	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	8,34
54	525	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	7,76
55	566	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T+)	16,13
55	506	2	Tração	ELU2.Wxx1_PR2A (T-)	14,88
38	528	3	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	3,02
38	568	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T+)	3,70

Tabela 9.5 Esforços axiais máximos nas diagonais das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Nº Asna	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
56	392	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	266,20
56	360	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	215,30
57	359	3	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	92,88
57	391	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	115,10
58	404	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	41,86
58	372	3	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	33,34
59	387	4	Compressão	ELU2.Wx2_PR2A (T-)	6,62
59	371	3	Tração	ELU2.Wx1_PR1A (T+)	8,18
60	346	2	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	18,54
60	362	3	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	21,06
61	345	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,01
61	345	2	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	31,34
62	358	3	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	34,61
62	390	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T+)	46,72
63	405	6	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	40,41
63	341	2	Tração	ELU2.Wy_PR1A (T-)	32,74
64	395	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T-)	40,46
64	347	2	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	32,30
65	364	3	Compressão	ELU2.Wy_PR1A (T-)	34,55
65	396	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wxx3 (T-)	46,60
66	353	2	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T-)	32,45
66	353	2	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	30,82
67	354	2	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	17,69
67	370	3	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T-)	20,58
68	397	5	Compressão	ELU2.Wxx2_PR1B (T-)	7,40
68	349	2	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx1 (T+)	9,44
69	398	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	44,28
69	334	1	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	36,64
70	367	3	Compressão	ELU2.Wy_PR2A (T-)	98,48
70	399	5	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	123,37
71	400	5	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	245,77
71	400	5	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	198,52

Dimensionamento dos cordões inferiores aos Estados Limites Últimos

O dimensionamento dos cordões inferiores das asnas foi realizado com recurso a uma folha de cálculo em “Excel”, cujos resultados constam nas tabelas 9.6 e 9.7. Posteriormente compararam-se os valores obtidos com os resultados do “SAP2000” (figura 9.3).

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo em “Excel”

Tabela 9.6 Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores das asnas.

Nº Barra	Esforço	SAP Frame	Nº Asna	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	Rácio N_{Ed}/N_{Rd}
1	Compressão	271	1	UPN 180	105,38	770	0,137
1	Tração	271	4	UPN 180	113,25	770	0,147
2	Compressão	198	2	UPN 180	143,54	770	0,186
2	Tração	234	4	UPN 180	180,12	770	0,234
3	Compressão	197	2	UPN 180	143,54	770	0,186
3	Tração	233	4	UPN 180	180,12	770	0,234
4	Compressão	196	2	UPN 180	227,13	770	0,295
4	Tração	232	4	UPN 180	307,12	770	0,399
5	Compressão	195	2	UPN 180	231,44	770	0,301
5	Tração	267	6	UPN 180	329,97	770	0,429
6	Compressão	194	2	UPN 180	220,33	770	0,286
6	Tração	266	6	UPN 180	312,67	770	0,406
7	Compressão	193	2	UPN 180	220,33	770	0,286
7	Tração	265	6	UPN 180	312,67	770	0,406
8	Compressão	176	1	UPN 180	191,14	770	0,248
8	Tração	246	5	UPN 180	268,17	770	0,348
9	Compressão	175	1	UPN 180	191,14	770	0,248
9	Tração	245	5	UPN 180	268,17	770	0,348
10	Compressão	174	1	UPN 180	192,47	770	0,250
10	Tração	244	5	UPN 180	261,13	770	0,339
11	Compressão	173	1	UPN 180	192,47	770	0,250
11	Tração	243	5	UPN 180	261,13	770	0,339
12	Compressão	224	4	UPN 180	221,02	770	0,287
12	Tração	260	6	UPN 180	306,35	770	0,398
13	Compressão	223	4	UPN 180	221,02	770	0,287
13	Tração	259	6	UPN 180	306,35	770	0,398
14	Compressão	204	3	UPN 180	229,97	770	0,299
14	Tração	258	6	UPN 180	322,75	770	0,419
15	Compressão	221	4	UPN 180	232,07	770	0,301
15	Tração	221	4	UPN 180	297,02	770	0,386
16	Compressão	220	4	UPN 180	-138,13	770	-0,179
16	Tração	220	4	UPN 180	172,04	770	0,223
17	Compressão	219	4	UPN 180	138,13	770	0,179
17	Tração	219	4	UPN 180	172,04	770	0,223
18	Compressão	236	5	UPN 180	22,80	770	0,030
18	Tração	236	5	UPN 180	19,23	770	0,025

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo em “Excel”

Tabela 9.7 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas cordas inferiores das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Perfil	$N_{c,Ed}$ (kN)	L (m)	Eixo y-y			Eixo z-z			Condicionante	Rácio		
					$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z			χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)
1	271	UPN 180	105,38	1,18	2,36	33,96	0,90	694,54	2,36	116,83	0,37	284,94	284,94	0,37
2	198	UPN 180	143,54	1,30	4,5	64,75	0,70	536,04	1,3	64,36	0,70	538,21	536,04	0,27
3	197	UPN 180	143,54	1,60	4,5	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,31
4	196	UPN 180	227,13	1,60	4,5	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,50
5	195	UPN 180	231,44	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,51
6	194	UPN 180	220,33	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,48
7	193	UPN 180	220,33	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,48
8	176	UPN 180	191,14	1,60	3,2	46,04	0,83	635,91	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,42
9	175	UPN 180	191,14	1,60	3,2	46,04	0,83	635,91	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,42
10	174	UPN 180	192,47	1,60	3,2	46,04	0,83	635,91	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,42
11	173	UPN 180	192,47	1,60	3,2	46,04	0,83	635,91	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,42
12	224	UPN 180	221,02	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,48
13	223	UPN 180	221,02	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,48
14	204	UPN 180	229,97	1,60	4,8	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,50
15	221	UPN 180	232,07	1,60	4,5	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	0,51
16	220	UPN 180	-138,13	1,60	4,5	64,75	0,70	536,04	1,6	79,21	0,59	456,03	456,03	-0,30
17	219	UPN 180	138,13	1,30	4,5	64,75	0,70	536,04	1,3	64,36	0,70	538,21	536,04	0,26
18	236	UPN 180	22,80	1,18	2,36	33,96	0,90	694,54	2,36	116,83	0,37	284,94	284,94	0,08

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

A verificação da segurança aos ELU nos cordões inferiores das asnas foi efetuada para a barra mais solicitada (barra 15). Os resultados podem ser consultados na figura 9.3.

```

Frame : 221      X Mid: 8,800      Combo: ELU2.Wy_PR2B (T-) Design Type: Beam
Length: 1,600   Y Mid: 12,320     Shape: UPN180      Frame Type: DCL-MRF
Loc : 1,600     Z Mid: 0,000      Class: Class 1    Rolled : Yes
PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
D/C Ratio: 0,542 = 0,511 + 0,005 + 0,026 < 1,000 OK
= NEd/(Chi_z NRk/GammaM1) + kzy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1)
+ kzz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1) (EC3 6.3.3(4)-6.62)
  
```

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-232,262	768,900	768,900

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,I	Ncr,TF	An/Ag
	768,900	865,642	1758,259	1037,155	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0,490	1417,383	0,737	0,903	0,702	539,738
MajorB(y-y)	c	0,490	1417,383	0,737	0,903	0,702	539,738
Minor (z-z)	c	0,490	920,533	0,914	1,093	0,591	454,644
MinorB(z-z)	c	0,490	920,533	0,914	1,093	0,591	454,644
Torsional TF	c	0,490	1037,155	0,861	1,033	0,624	479,758

Figura 9.3 Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

- Comparação de resultados

Tabela 9.8 Comparação dos resultados nos dois procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio Δ (%)
Secção Transversal	15 / 221	N_{Rd} (kN)	770,000	768,900	0,14
Elemento	15 / 221	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	536,037	539,738	0,69
Elemento	15 / 221	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	456,027	454,644	0,30

Dimensionamento dos cordões superiores aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo em “Excel”

Tabela 9.9 Verificação da resistência das secções transversais nos cordões superiores das asnas

Nº Barra	Esforço	SAP Frame	Nº Asna	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
20	Compressão	127	8	UPN 180	41,88	770	0,05
20	Tração	109	7	UPN 180	42,76	770	0,06
21	Compressão	144	8	UPN 180	38,74	770	0,05
21	Tração	126	7	UPN 180	42,15	770	0,05
22	Compressão	89	5	UPN 180	46,11	770	0,06
22	Tração	71	4	UPN 180	273,06	770	0,35
23	Compressão	88	5	UPN 180	346,73	770	0,45
23	Tração	70	4	UPN 180	274,67	770	0,36
24	Compressão	87	5	UPN 180	349,96	770	0,45
24	Tração	51	3	UPN 180	293,83	770	0,38
25	Compressão	86	5	UPN 180	349,75	770	0,45
25	Tração	50	3	UPN 180	296,26	770	0,38
26	Compressão	85	5	UPN 180	314,47	770	0,41
26	Tração	49	3	UPN 180	267,37	770	0,35
27	Compressão	84	5	UPN 180	326,76	770	0,42
27	Tração	48	3	UPN 180	269,04	770	0,35
28	Compressão	83	5	UPN 180	269,41	770	0,35
28	Tração	47	3	UPN 180	227,37	770	0,30
29	Compressão	75	5	UPN 180	266,29	770	0,35
29	Tração	39	3	UPN 180	227,58	770	0,30
30	Compressão	76	5	UPN 180	318,13	770	0,41
30	Tração	40	3	UPN 180	269,14	770	0,35
31	Compressão	41	6	UPN 180	303,90	770	0,39
31	Tração	41	3	UPN 180	267,49	770	0,35
32	Compressão	96	6	UPN 180	341,95	770	0,44
32	Tração	42	3	UPN 180	296,66	770	0,39
33	Compressão	43	3	UPN 180	343,44	770	0,45
33	Tração	43	3	UPN 180	295,21	770	0,38
34	Compressão	80	5	UPN 180	330,03	770	0,43
34	Tração	80	5	UPN 180	267,18	770	0,35
35	Compressão	81	5	UPN 180	329,21	770	0,43
35	Tração	81	5	UPN 180	265,63	770	0,34
36	Compressão	82	5	UPN 180	18,35	770	0,02
36	Tração	82	5	UPN 180	23,17	770	0,03
37	Compressão	74	5	UPN 180	19,53	770	0,03
37	Tração	74	5	UPN 180	23,50	770	0,03

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo em “Excel”

Tabela 9.10 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas cordas superiores das asnas.

Nº Barra	SAP Frame	Perfil	$N_{c,Ed}$ (kN)	L (m)	Eixo y-y				Eixo z-z				Condicionante	Rácio
					$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
20	127	UPN 180	41,88	1,19	2,38	34,24	0,90	693,19	1,19	58,91	0,74	568,18	568,18	0,07
21	144	UPN 180	38,74	1,31	1,31	18,85	0,99	763,28	1,31	64,85	0,70	535,46	535,46	0,07
22	89	UPN 180	46,11	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,10
23	88	UPN 180	346,73	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,77
24	87	UPN 180	349,96	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,78
25	86	UPN 180	349,75	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,78
26	85	UPN 180	314,47	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,70
27	84	UPN 180	326,76	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,73
28	83	UPN 180	269,41	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,60
29	75	UPN 180	266,29	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,59
30	76	UPN 180	318,13	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,71
31	41	UPN 180	303,90	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,67
32	96	UPN 180	341,95	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,76
33	43	UPN 180	343,44	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,76
34	80	UPN 180	330,03	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,73
35	81	UPN 180	329,21	1,62	1,62	23,31	0,97	743,19	1,62	80,20	0,59	450,67	450,67	0,73
36	82	UPN 180	18,35	1,31	1,31	18,85	0,99	763,28	1,31	64,85	0,70	535,46	535,46	0,03
37	74	UPN 180	19,53	1,19	2,38	34,24	0,90	693,19	1,19	58,91	0,74	568,18	568,18	0,03

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

A verificação da segurança aos ELU nos cordões superiores das asnas foi efetuada para a barra mais solicitada (barra 24). Os resultados estão indicados na figura 9.4.

```

Frame : 87      X Mid: -7,200      Combo: ELU1.SC_COB_FR1B_Design Type: Brace
Length: 1,617  Y Mid: 16,427      Shape: UPN180      Frame Type: DCL-MRF
Loc : 1,617    Z Mid: 1,063      Class: Class 1      Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
D/C Ratio: 0,855 = 0,777 + 0,034 + 0,043 < 1,000 OK
= NEd/(Chi_z NRk/GammaM1) + kzy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1)
+ kzz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1) (EC3 6.3.3(4)-6.62)

AXIAL FORCE DESIGN
      Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
      Force    Capacity  Capacity
Axial  -349,894  768,900  768,900

      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T      Ncr,TF      An/Ag
      768,900     865,642    1743,302   1665,332    1,000

      Curve  Alpha      Ncr      LambdaBar      Phi      Chi      Nb,Rd
Major (y-y)  c  0,490    10731,574    0,268    0,552    0,966    742,451
MajorB(y-y)  c  0,490    10731,574    0,268    0,552    0,966    742,451
Minor (z-z)  c  0,490     901,833    0,923    1,104    0,586    450,226
MinorB(z-z)  c  0,490     901,833    0,923    1,104    0,586    450,226
Torsional TF  c  0,490    1665,332    0,679    0,848    0,737    566,942

```

Figura 9.4 Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

- Comparação de resultados

Tabela 9.11 Comparação dos resultados pelos dois procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	24 / 87	N_{Rd} (kN)	770,000	768,900	0,14
Elemento	24 / 87	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	743,191	742,451	0,10
Elemento	24 / 87	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	450,672	450,226	0,10

Dimensionamento dos prumos aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.12 Verificação da resistência das secções transversais nos prumos das asnas.

Nº Barra	Esforço	SAP Frame	Nº Asna	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
19	Compressão	618	8	UPN 180	7,97	770	0,01
19	Tração	598	7	UPN 180	7,34	770	0,01
39	Compressão	556	5	2UPN 180	14,00	1540	0,01
39	Tração	496	2	2UPN 180	14,97	1540	0,01
40	Compressão	554	5	2L 40X5	1,46	208,45	0,01
40	Tração	554	5	2L 40X5	1,84	208,45	0,01
41	Compressão	613	8	2L 40X5	13,08	208,45	0,06
41	Tração	493	2	2L 40X5	15,52	208,45	0,07
42	Compressão	470	1	2L 40X5	6,63	208,45	0,03
42	Tração	469	2	2L 40X5	10,97	208,45	0,05
43	Compressão	612	8	2L 40X5	13,01	208,45	0,06
43	Tração	492	2	2L 40X5	14,53	208,45	0,07
44	Compressão	-	-	4L 80X8	-	1353	-
44	Tração	617	8	4L 80X8	1,38	1353	0,00
45	Compressão	491	2	2L 40X5	14,52	208,45	0,07
45	Tração	491	2	2L 40X5	15,12	208,45	0,07
46	Compressão	610	8	2L 40X5	1,15	208,45	0,01
46	Tração	490	2	2L 40X5	1,99	208,45	0,01
47	Compressão	555	5	2L 40X5	44,10	208,45	0,21
47	Tração	555	5	2L 40X5	53,36	208,45	0,26
48	Compressão	579	6	2L 40X5	1,13	208,45	0,01
48	Tração	499	2	2L 40X5	1,96	208,45	0,01
49	Compressão	500	2	2L 40X5	14,51	208,45	0,07
49	Tração	500	2	2L 40X5	15,13	208,45	0,07
50	Compressão	-	-	4L 80X8	-	1353	-
50	Tração	601	7	4L 80X8	1,28	1353	0,00
51	Compressão	502	2	2L 40X5	12,99	208,45	0,06
51	Tração	502	2	2L 40X5	14,49	208,45	0,07
52	Compressão	623	8	2L 40X5	7,27	208,45	0,03
52	Tração	503	2	2L 40X5	11,92	208,45	0,06
53	Compressão	504	2	2L 40X5	13,07	208,45	0,06
53	Tração	504	2	2L 40X5	15,47	208,45	0,07
54	Compressão	565	5	2L 40X5	8,34	208,45	0,04
54	Tração	525	3	2L 40X5	7,76	208,45	0,04
55	Compressão	566	5	2UPN 180	16,13	1540	0,01
55	Tração	506	2	2UPN 180	14,88	1540	0,01
38	Compressão	528	3	UPN 180	3,02	770	0,00
38	Tração	568	5	UPN 180	3,70	770	0,00

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel”

A principal função dos prumos nas asnas é a redução do comprimento de encurvadura dos cordões no plano da estrutura. Note-se que, na maior parte das barras, o esforço axial não assume valores elevados pelo que nessas situações o critério de dimensionamento resume-se à limitação da esbelteza a valores não superiores a $\lambda = 180$. Os resultados obtidos podem ser consultados na tabela 9.13.

Tabela 9.13 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nos prumos das asnas.

Nº Barra	Perfil	Eixo y-y							Eixo z-z							Condicionante	Rácio	Solução Ótima			Rácios Finais
		$N_{c,Ed}$	$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_y \leq 0,2$	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_z \leq 0,2$	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	$N_{b,Rd,z}$ (kN)			$N_{c,Ed} / N_{b,Rd,z}$	Perfil	λ_z	
19	UPN 180	7,97	0,13	1,87	0,02	Sim	Desprezar encurvadura	0,13	6,44	0,07	Sim	Desprezar encurvadura	-	-	-	-	UPN 180	6,44	-	-	
39	2UPN 180	14,00	0,3	8,64	0,10	Sim	Desprezar encurvadura	0,3	10,98	0,13	Sim	Desprezar encurvadura	-	-	-	-	2UPN 180	10,98	-	-	
40	2L 40X5	1,46	0,49	4,77	0,05	Sim	Desprezar encurvadura	0,49	40,77	0,47	Não	0,90	187,07	187,07	0,01	2L 35X4 // 180	46,62	127,39	0,011		
41	2L 40X5	13,08	0,72	7,04	0,08	Sim	Desprezar encurvadura	0,72	60,15	0,69	Não	0,79	164,20	164,20	0,08	2L 35X4 // 180	68,50	107,38	0,122		
42	2L 40X5	6,63	0,95	9,29	0,11	Sim	Desprezar encurvadura	0,95	79,37	0,91	Não	0,65	135,92	135,92	0,05	2L 35X4 // 180	90,38	83,88	0,079		
43	2L 40X5	13,01	1,18	11,53	0,13	Sim	Desprezar encurvadura	1,18	98,58	1,14	Não	0,51	107,21	107,21	0,12	2L 35X4 // 180	112,26	63,18	0,206		
44	4L 80X8	-	1,41	-	-	-	-	1,41	-	-	-	-	-	-	-	-	4L 80X8	-	-	-	
45	2L 40X5	14,52	1,64	16,03	0,18	Sim	Desprezar encurvadura	1,64	137,01	1,58	Não	0,31	65,66	65,66	0,22	2L 35X4 // 180	156,02	37,11	0,391		
46	2L 40X5	1,15	1,87	18,28	0,21	Não	1,00	207,67	1,87	156,23	1,80	Não	0,25	52,56	52,56	0,02	2L 35X4 // 180	177,90	29,45	0,039	
47	2L 40X5	44,10	2,1	20,53	0,24	Não	0,99	205,75	2,1	175,44	2,02	Não	0,21	42,86	42,86	1,03	2L 45X5 // 180	155,52	60,11	0,734	
48	2L 40X5	1,13	1,87	18,28	0,21	Não	1,00	207,67	1,87	156,23	1,80	Não	0,25	52,56	52,56	0,02	2L 35X4 // 180	177,90	29,45	0,038	
49	2L 40X5	14,51	1,64	16,03	0,18	Sim	Desprezar encurvadura	1,64	137,01	1,58	Não	0,31	65,66	65,66	0,22	2L 35X4 // 180	156,02	37,11	0,391		
50	4L 80X8	-	1,41	-	-	-	-	1,41	-	-	-	-	-	-	-	-	4L 80X8	-	-	-	
51	2L 40X5	12,99	1,18	11,53	0,13	Sim	Desprezar encurvadura	1,18	98,58	1,14	Não	0,51	107,21	107,21	0,12	2L 35X4 // 180	112,26	63,18	0,206		
52	2L 40X5	7,27	0,95	9,29	0,11	Sim	Desprezar encurvadura	0,95	79,37	0,91	Não	0,65	135,92	135,92	0,05	2L 35X4 // 180	90,38	83,88	0,087		
53	2L 40X5	13,07	0,72	7,04	0,08	Sim	Desprezar encurvadura	0,72	60,15	0,69	Não	0,79	164,20	164,20	0,08	2L 35X4 // 180	68,50	107,38	0,122		
54	2L 40X5	8,34	0,49	4,77	0,05	Sim	Desprezar encurvadura	0,49	40,77	0,47	Não	0,90	187,07	187,07	0,04	2L 35X4 // 180	46,62	127,39	0,065		
55	2UPN 180	16,13	0,3	8,64	0,10	Sim	Desprezar encurvadura	0,3	10,98	0,13	Sim	Desprezar encurvadura	-	-	-	-	2UPN 180	10,98	-	-	
38	UPN 180	3,02	0,13	1,87	0,02	Sim	Desprezar encurvadura	0,13	6,44	0,07	Sim	Desprezar encurvadura	-	-	-	-	UPN 180	6,44	-	-	

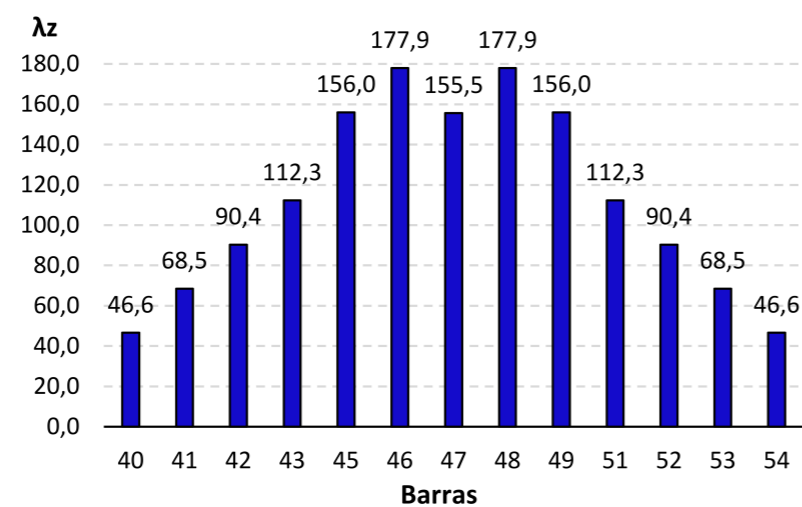


Figura 9.5 Esbeltezas nos prumos das asnas - solução ótima.

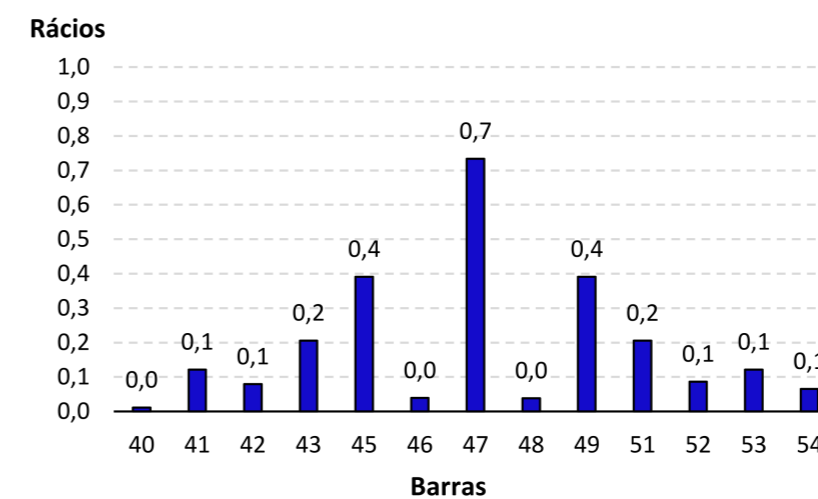


Figura 9.6 Rácios obtidos nos prumos das asnas - solução ótima.

- Verificação da resistência das secções transversais com base na “solução ótima”.

Tabela 9.14 Verificação da resistência das secções transversais da solução ótima.

Nº Barra	Esforço	Perfil	$N_{t,Ed}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{t,Ed}/N_{t,Rd}$
19	Tração	UPN 180	7,34	770	0,01
39	Tração	2UPN 180	14,97	1540	0,01
40	Tração	2L 35X4 // 180	1,84	146,85	0,01
41	Tração	2L 35X4 // 180	15,52	146,85	0,11
42	Tração	2L 35X4 // 180	10,97	146,85	0,07
43	Tração	2L 35X4 // 180	14,53	146,85	0,10
44	Tração	4L 80X8	1,38	1353	0,00
45	Tração	2L 35X4 // 180	15,12	146,85	0,10
46	Tração	2L 35X4 // 180	1,99	146,85	0,01
47	Tração	2L 45X5 //180	53,36	236,5	0,23
48	Tração	2L 35X4 // 180	1,96	146,85	0,01
49	Tração	2L 35X4 // 180	15,13	146,85	0,10
50	Tração	4L 80X8	1,28	1353	0,00
51	Tração	2L 35X4 // 180	14,49	146,85	0,10
52	Tração	2L 35X4 // 180	11,92	146,85	0,08
53	Tração	2L 35X4 // 180	15,47	146,85	0,11
54	Tração	2L 35X4 // 180	7,76	146,85	0,05
55	Tração	2UPN 180	14,88	1540	0,01
38	Tração	UPN 180	3,70	770	0,00

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

A verificação da segurança aos ELU nos prumos das asnas foi efetuada para a barra mais solicitada (barra 47 / Frame 555).

```

Frame : 555      X Mid: 0,000      Combo: ELU2.Wy_PR2A (T-)Design Type: Column
Length: 2,100   Y Mid: 16,427     Shape: 2L 45X5 // 180   Frame Type: DCL-MRF
Loc : 2,100     Z Mid: 1,050     Class: Class 3         Rolled : No

```

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.1.1(1)-6.46)

```

D/C Ratio: 0,958 = 0,958 < 1,000 OK
            = (NEd/Nb,Rd)      (EC3 6.3.1.1(1)-6.46)

```

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity
Axial	-44,268	236,637	236,637

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	236,637	266,410	58,849	58,849	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0,490	4346,649	0,233	0,535	0,983	232,623
MajorB(y-y)	c	0,490	4346,649	0,233	0,535	0,983	232,623
Minor (z-z)	c	0,490	73,666	1,792	2,496	0,236	55,892
MinorB(z-z)	c	0,490	73,666	1,792	2,496	0,236	55,892
Torsional TF	c	0,490	58,849	2,005	2,953	0,195	46,215

Figura 9.7 Verificação da resistência das secções e encurvadura no “SAP2000”.

- Comparação de resultados

Tabela 9.15 Comparação dos resultados obtidos pelos dois procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	47 / 555	N_{Rd} (kN)	236,500	236,637	0,06
Elemento	47 / 555	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	233,703	232,623	0,46
Elemento	47 / 555	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	60,106	55,892	7,54

Analisando os resultados obtidos conclui-se que existe uma diferença significativa na resistência à encurvadura por compressão da barra em ambos os eixos, que se justifica pelo facto do “SAP2000” considerar a curva de encurvadura c ($\alpha = 0,49$), enquanto que deveria considerar a curva b ($\alpha = 0,34$).

Dimensionamento das diagonais aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.16 Verificação da resistência das secções transversais nas diagonais das asnas.

Nº Barra	Esforço	SAP Frame	Nº Asna	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
56	Compressão	392	5	2L 80X8	266,20	676,5	0,39
56	Tração	360	3	2L 80X8	215,30	676,5	0,32
57	Compressão	359	3	2L 60X6	92,88	380,05	0,24
57	Tração	391	5	2L 60X6	115,10	380,05	0,30
58	Compressão	404	5	2L 40X5	41,86	208,45	0,20
58	Tração	372	3	2L 40X5	33,34	208,45	0,16
59	Compressão	387	4	2L 40X5	6,62	208,45	0,03
59	Tração	371	3	2L 40X5	8,18	208,45	0,04
60	Compressão	346	2	2L 40X5	18,54	208,45	0,09
60	Tração	362	3	2L 40X5	21,06	208,45	0,10
61	Compressão	345	2	2L 40X5	33,01	208,45	0,16
61	Tração	345	2	2L 40X5	31,34	208,45	0,15
62	Compressão	358	3	2L 40X5	34,61	208,45	0,17
62	Tração	390	5	2L 40X5	46,72	208,45	0,22
63	Compressão	405	6	2L 45X5	40,41	236,5	0,17
63	Tração	341	2	2L 45X5	32,74	236,5	0,14
64	Compressão	395	5	2L 45X5	40,46	236,5	0,17
64	Tração	347	2	2L 45X5	32,30	236,5	0,14
65	Compressão	364	3	2L 40X5	34,55	208,45	0,17
65	Tração	396	5	2L 40X5	46,60	208,45	0,22
66	Compressão	353	2	2L 40X5	32,45	208,45	0,16
66	Tração	353	2	2L 40X5	30,82	208,45	0,15
67	Compressão	354	2	2L 40X5	17,69	208,45	0,08
67	Tração	370	3	2L 40X5	20,58	208,45	0,10
68	Compressão	397	5	2L 40X5	7,40	208,45	0,04
68	Tração	349	2	2L 40X5	9,44	208,45	0,05
69	Compressão	398	5	2L 40X5	44,28	208,45	0,21
69	Tração	334	1	2L 40X5	36,64	208,45	0,18
70	Compressão	367	3	2L 60X6	98,48	380,05	0,26
70	Tração	399	5	2L 60X6	123,37	380,05	0,32
71	Compressão	400	5	2L 80X8	245,77	676,5	0,36
71	Tração	400	5	2L 80X8	198,52	676,5	0,29

- Verificação das barras à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.17 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão nas diagonais das asnas.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	Eixo y-y						Eixo z-z						Condicionante	Rácio	Solução Ótima			Rácios Finais
			$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_y \leq 0,2$	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_z \leq 0,2$	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)			$N_{b,Rd,z}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd,z}$	Perfil	
56	2L 80X8	266,20	1,388	12,05	0,14	Sim	Desprezar Encurvadura	1,388	57,27	0,66	Não	0,81	545,25	545,25	0,49	2L 80X10 // 180	57,66	667,35	0,399	
57	2L 60X6	92,88	1,673	15,43	0,18	Sim	Desprezar Encurvadura	1,673	92,12	1,06	Não	0,56	212,37	212,37	0,44	2L 60X8 // 180	93,12	274,04	0,339	
58	2L 40X5	41,86	1,86	18,18	0,21	Não	1,00	207,75	1,86	155,39	1,79	Não	0,25	53,05	53,05	0,79	2L 50X5 // 180	123,09	98,80	0,424
59	2L 40X5	6,62	1,86	18,18	0,21	Não	1,00	207,75	1,86	155,39	1,79	Não	0,25	53,05	53,05	0,12	2L 35X4 // 180	176,95	29,74	0,223
60	2L 40X5	18,54	2,132	20,84	0,24	Não	0,99	205,48	2,132	178,12	2,05	Não	0,20	41,72	41,72	0,44	2L 40X4 // 180	176,97	34,30	0,541
61	2L 40X5	33,01	2,132	20,84	0,24	Não	0,99	205,48	2,132	178,12	2,05	Não	0,20	41,72	41,72	0,79	2L 40X5 // 180	178,12	41,72	0,791
62	2L 40X5	34,61	2,461	24,06	0,28	Não	0,97	202,71	2,461	205,60	2,37	Não	0,15	32,17	32,17	1,08	2L 50X5 // 180	162,86	61,92	0,559
63	2L 45X5	40,41	2,461	23,74	0,27	Não	0,97	230,30	2,461	182,26	2,10	Não	0,19	45,42	45,42	0,89	2L 50X5 // 180	162,86	61,92	0,653
64	2L 45X5	40,46	2,461	23,74	0,27	Não	0,97	230,30	2,461	182,26	2,10	Não	0,19	45,42	45,42	0,89	2L 50X5 // 180	162,86	61,92	0,653
65	2L 40X5	34,55	2,461	24,06	0,28	Não	0,97	202,71	2,461	205,60	2,37	Não	0,15	32,17	32,17	1,07	2L 50X5 // 180	162,86	61,92	0,558
66	2L 40X5	32,45	2,132	20,84	0,24	Não	0,99	205,48	2,132	178,12	2,05	Não	0,20	41,72	41,72	0,78	2L 40X5 // 180	178,12	41,72	0,778
67	2L 40X5	17,69	2,132	20,84	0,24	Não	0,99	205,48	2,132	178,12	2,05	Não	0,20	41,72	41,72	0,42	2L 40X4 // 180	176,97	34,30	0,516
68	2L 40X5	7,40	1,86	18,18	0,21	Não	1,00	207,75	1,86	155,39	1,79	Não	0,25	53,05	53,05	0,14	2L 35X4 // 180	176,95	29,74	0,249
69	2L 40X5	44,28	1,86	18,18	0,21	Não	1,00	207,75	1,86	155,39	1,79	Não	0,25	53,05	53,05	0,83	2L 50X5 // 180	123,09	98,80	0,448
70	2L 60X6	98,48	1,673	15,43	0,18	Sim	Desprezar Encurvadura	1,673	92,12	1,06	Não	0,56	212,37	212,37	0,46	2L 60X8 // 180	93,12	274,04	0,359	
71	2L 80X8	245,77	1,388	12,05	0,14	Sim	Desprezar Encurvadura	1,388	57,27	0,66	Não	0,81	545,25	545,25	0,45	2L 80X10 // 180	57,66	667,35	0,368	

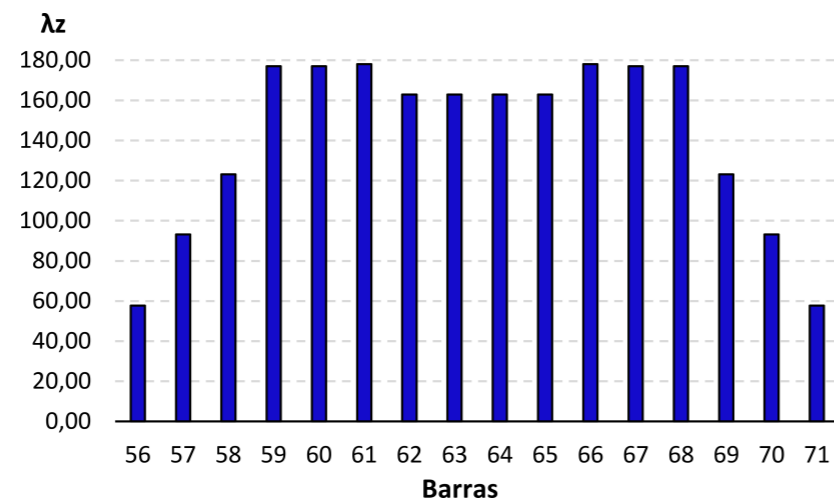


Figura 9.8 Esbeltezas nas diagonais das asnas - solução ótima.

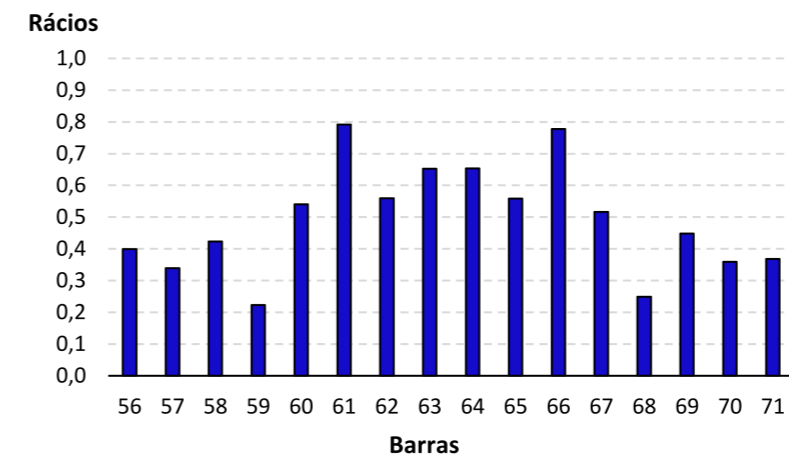


Figura 9.9 Rácios obtidos nas diagonais das asnas - solução ótima.

- Verificação da resistência das secções transversais para a “solução ótima”.

Tabela 9.18 Verificação da resistência das secções transversais da solução ótima.

Nº Barra	Esforço	Perfil	N_{Ed} (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{t,Ed}/N_{t,Rd}$
56	Tração	2L 80X10 // 180	215,30	830,5	0,26
57	Tração	2L 60X8 // 180	115,10	496,7	0,23
58	Tração	2L 50X5 // 180	33,34	264,0	0,13
59	Tração	2L 35X4 // 180	8,18	146,85	0,06
60	Tração	2L 40X4 // 180	21,06	208,45	0,10
61	Tração	2L 40X4 // 180	31,34	208,45	0,15
62	Tração	2L 50X5 // 180	46,72	264,00	0,18
63	Tração	2L 50X5 // 180	32,74	264,00	0,12
64	Tração	2L 50X5 // 180	32,30	264,00	0,12
65	Tração	2L 50X5 // 180	46,60	264,00	0,18
66	Tração	2L 40X4 // 180	30,82	208,45	0,15
67	Tração	2L 40X4 // 180	20,58	208,45	0,10
68	Tração	2L 35X4 // 180	9,44	146,85	0,06
69	Tração	2L 40X5 // 180	36,64	208,45	0,18
70	Tração	2L 60X8 // 180	123,37	496,7	0,25
71	Tração	2L 80X10 // 180	198,52	830,5	0,24

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

A verificação da segurança aos ELU nas diagonais das asnas foi efetuada para a barra barra 56 (Frame 392).

```

Frame : 392      X Mid: -11,850      Combo: ELU1.SC_COB_PR1B_Design Type: Brace
Length: 1,388    Y Mid: 16,427      Shape: 2L 80X10 // 180  Frame Type: DCL-MRF
Loc  : 1,388    Z Mid: 0,244      Class: Class 3          Rolled : No

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.1.1(1)-6.46)
D/C Ratio: 0,665 = 0,665 < 1,000 OK
              = (Ned/Nb,Rd)      (EC3 6.3.1.1(1)-6.46)

AXIAL FORCE DESIGN

      Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
      Force    Capacity   Capacity
Axial  -267,765  838,750  838,750

      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T      Ncr,TF      An/Ag
      838,750     944,280     683,973     683,973     1,000

      Curve  Alpha      Ncr      LambdaBar      Phi      Chi      Nb,Rd
Major (y-y)  c  0,490  43722,268     0,139     0,495     1,000     838,750
MajorB(y-y)  c  0,490  43722,268     0,139     0,495     1,000     838,750
Minor (z-z)  c  0,490  1837,698     0,676     0,845     0,740     620,459
MinorB(z-z)  c  0,490  1837,698     0,676     0,845     0,740     620,459
Torsional TF  c  0,490  683,973     1,107     1,335     0,480     402,882

```

Figura 9.10 Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

- Comparação de resultados

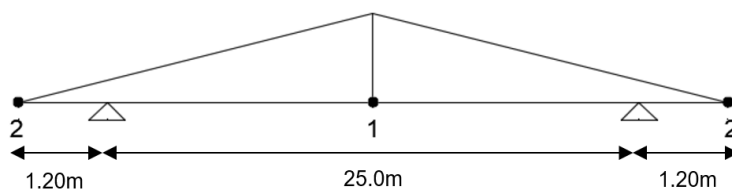
Tabela 9.19 Comparação dos resultados.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	56 / 392	N_{Rd} (kN)	830,500	838,750	0,98
Elemento	56 / 392	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	830,500	838,750	0,98
Elemento	56 / 392	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	667,348	620,459	7,56

Tal como nos prumos constata-se que as discrepâncias entre os resultados obtidos na folha de cálculo e no “SAP2000” devem-se à utilização de diferentes curvas de encurvadura.

Dimensionamento das asnas da cobertura aos Estados Limites de Serviço

A verificação dos estados limites de serviço foi realizada através do controlo das flechas nos nós 1 (consola) e 2 (meio-vão) indicados na figura 9.11.

**Figura 9.11** Identificação dos nós.

Os deslocamentos máximos considerados para o nó 1 não devem ser superiores a:

$$\delta_{adm} = L/300 \quad (9.3)$$

Os deslocamentos máximos considerados para o nó 2 não devem ser superiores a:

$$\delta_{adm} = 2L/300 \quad (9.4)$$

A verificação aos estados limites de utilização foi efetuada para estes nós, de todas as consolas, para as combinações mais condicionantes dos estados limites de serviço.

Na tabela 9.20 e na figura 9.12 indicam-se os nós das asnas com maiores flechas e a respetiva verificação.

Tabela 9.20 Verificação das flechas nos pontos 1 e 2 para as combinações condicionantes.

Ponto	Joint SAP	Asna	Combinação condicionante	Vão (m)	δ_{adm} (mm)	δ_v (mm)	Rácio
1	278	6	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	25,0	83,3	42,6	0,51
2	270	6	ELS.SC_COB_PR1A_Wxx3 (T+)	1,2	8,0	7,1	0,89

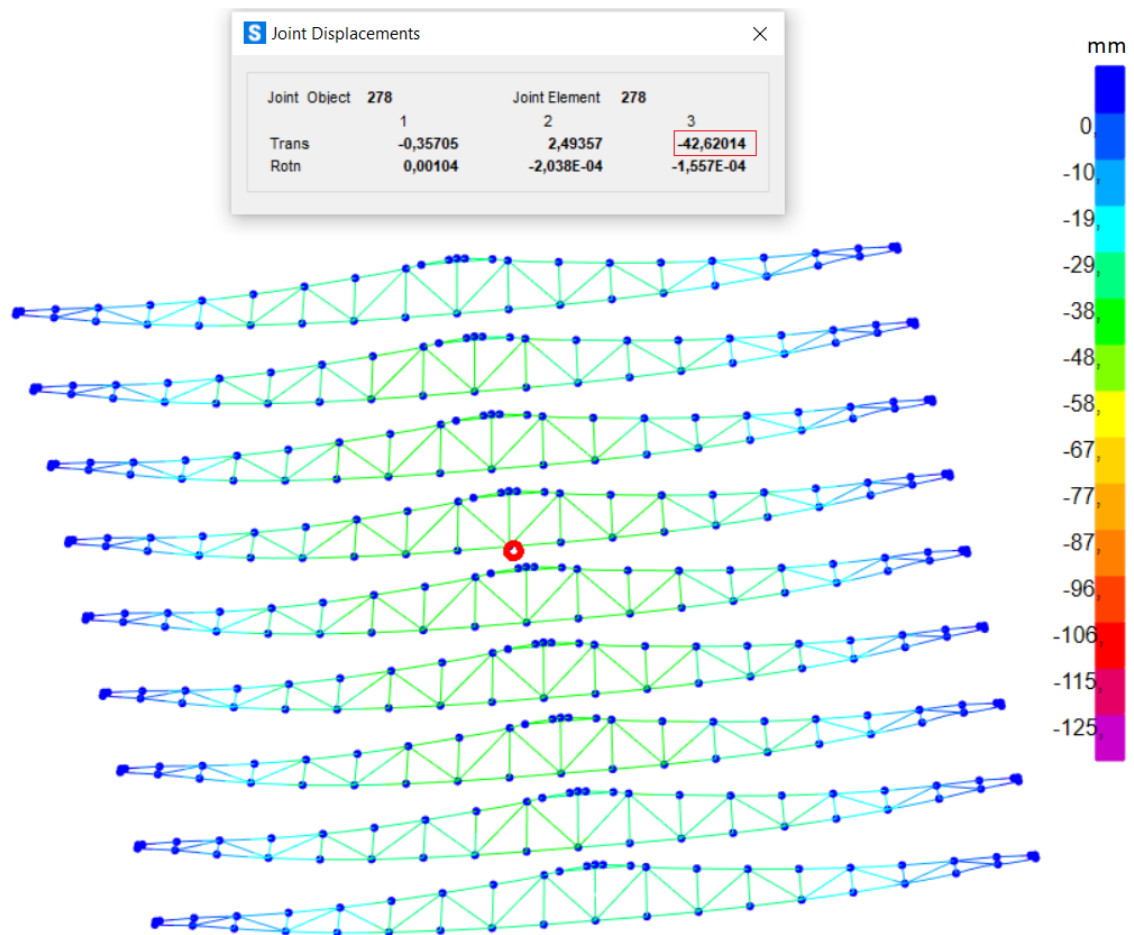


Figura 9.12 Flechas verticais máximas.

Com base nas verificações anteriores conclui-se que se encontra satisfeito o critério de verificação aos estados limites de serviço.

9.1.2 Dimensionamento da viga de travamento 1

A figura mostra a numeração que foi adotada para as barras da viga.

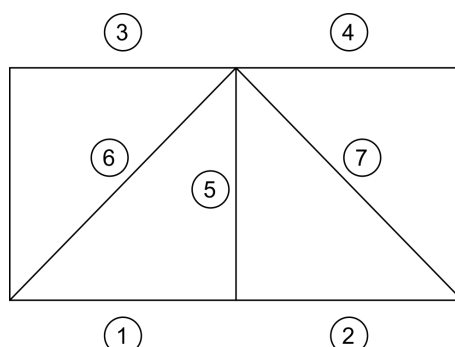


Figura 9.13 Numeração das barras da viga de travamento 1.

Na tabela 9.21 indicam-se os esforços axiais máximos para as combinações mais desfavoráveis.

Tabela 9.21 Esforços axiais máximos nas barras da viga VT1.

Nº Barra	Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
1	1155	Compressão	ELU1.Wy_PR1A (T+)	29,017
1	1155	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	22,075
2	1154	Compressão	ELU1.Wy_PR1A (T+)	29,109
2	1154	Tração	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	22,137
3	1139	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	35,129
3	1139	Tração	ELU2.Wy_PR1A (T-)	42,308
4	1138	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	35,082
4	1138	Tração	ELU2.Wy_PR1A (T-)	42,934
5	1178	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	0,147
5	1184	Tração	ELU1.SC_COB_PR1A_Wx3 (T+)	0,716
6	1145	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	11,305
6	1145	Tração	ELU1.Wy_PR2B (T+)	12,25
7	1146	Compressão	ELU1.Wy_PR2B (T+)	13,334
7	1172	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	10,5

Dimensionamento da viga de travamento VT1 aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.22 Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores.

Nº Barra	SAP Frame Label	Esforço	Perfil	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
1	1155	Compressão	UNP 80	ELU1.Wy_PR1A (T+)	29,017	303,05	0,096
1	1155	Tração	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	22,075	303,05	0,073
2	1154	Compressão	UNP 80	ELU1.Wy_PR1A (T+)	29,109	303,05	0,096
2	1154	Tração	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2B_Wx3 (T-)	22,137	303,05	0,073
3	1139	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	35,129	303,05	0,116
3	1139	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR1A (T-)	42,308	303,05	0,140
4	1138	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	35,082	303,05	0,116
4	1138	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR1A (T-)	42,934	303,05	0,142
5	1178	Compressão	L 60X6	ELU2.Wy_PR1B (T-)	0,147	190,03	0,001
5	1184	Tração	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR1A_Wx3 (T+)	0,716	190,03	0,004
6	1145	Compressão	L 90X9	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	11,305	426,25	0,027
6	1145	Tração	L 90X9	ELU1.Wy_PR2B (T+)	12,25	426,25	0,029
7	1146	Compressão	L 90X9	ELU1.Wy_PR2B (T+)	13,334	426,25	0,031
7	1172	Tração	L 90X9	ELU2.Wy_PR1B (T-)	10,5	426,25	0,025

- Verificação à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos cordões inferiores e superiores

Tabela 9.23 Verificação à encurvadura por compressão - Cordões inferiores e superiores

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo y-y						Eixo z-z						Condicionante	Rácio
				$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_y \leq 0,2$	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_z \leq 0,2$	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
1	UNP 80	29,02	2,054	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	2,054	154,44	1,78	Não	0,24	72,48	72,48	0,40
2	UNP 80	29,11	2,054	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	2,054	154,44	1,78	Não	0,24	72,48	72,48	0,40
3	UNP 80	35,13	2,054	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	2,054	154,44	1,78	Não	0,24	72,48	72,48	0,48
4	UNP 80	35,08	2,054	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	2,054	154,44	1,78	Não	0,24	72,48	72,48	0,48

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos prumos e diagonais

Tabela 9.24 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Diagonais

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo v-v						Rácio		Solução Ótima			
				$L_{cr,v}$ (m)	λ_v	$\bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,v}$	$\bar{\lambda}_{eff,v} \leq 0,2$	χ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd,v}$ (kN)	Perfil	λ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	Rácio $N_{c,Ed} / N_{b,Rd,v}$
5	L 60X6	0,15	2,1	2,1	179,49	2,07	1,80	Não	0,31	40,56	0,004	L 60X6	179,49	40,56	0,004
6	L 90X9	11,31	2,871	2,871	164,06	1,89	1,67	Não	0,29	121,81	0,093	L 90X9	164,06	121,81	0,093
7	L 90X9	13,33	2,871	2,871	164,06	1,89	1,67	Não	0,29	121,81	0,109	L 90X9	164,06	121,81	0,109

Nas figuras 9.14 e 9.15 indicam-se as esbeltezas e os rácios calculados.

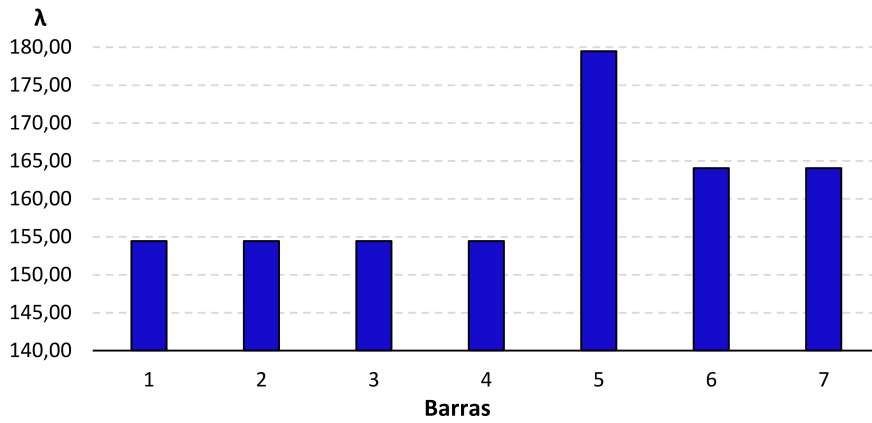


Figura 9.14 Esbeltezas das barras da viga VT1.



Figura 9.15 Rácios das barras da viga VT1.

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”.

Cordão mais esforçado

```

Frame : 1139      X Mid: 0,000      Combo: ELU1.SC_COB_PRI8_Design Type: Beam
Length: 2,054    Y Mid: 21,561     Shape: UPN80      Frame Type: DCL-MRF
Loc : 1,643     Z Mid: 2,100     Class: Class 1   Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
D/C Ratio: 0,502 = 0,485 + 0,003 + 0,014 < 1,000 OK
= NEd/(Chi_z NRk/GammaM1) + kzy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1)
+ kzz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1) (EC3 6.3.3(4)-6.62)
    
```

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity
Axial	-35,028	303,050	303,050

	Np1,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag	Nb,Rd
	303,050	341,179	838,807	120,982	1,000	
Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c 0,490	130,004	1,527	1,991	0,306	92,736
MajorB(y-y)	c 0,490	130,004	1,527	1,991	0,306	92,736
Minor (z-z)	c 0,490	95,352	1,783	2,477	0,238	72,217
MinorB(z-z)	c 0,490	95,352	1,783	2,477	0,238	72,217
Torsional TF	c 0,490	120,982	1,583	2,091	0,289	87,635

Figura 9.16 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 3 (Frame 1139).

Prumo mais esforçado

Frame : 1178 X Mid: 0,000 Combo: ELU2.Wy_PR1B (T-) Design Type: Column
 Length: 2,100 Y Mid: 6,160 Shape: L60X6 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 2,100 Z Mid: 1,050 Class: Class 3 Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
 D/C Ratio: 0,004 = 0,004 + 0,000 + 0,000 < 1,000 OK
 = $N_{Ed}/(\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{zy} (M_y, Ed+N_{Ed} e_{Ny})/(\chi_{LT} M_y, R_k/\gamma_{M1})$
 + $k_{zz} (M_z, Ed+N_{Ed} e_{Nz})/(M_z, R_k/\gamma_{M1})$ (EC3 6.3.3(4)-6.62)

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned Force	Nc, Rd Capacity	Nt, Rd Capacity
Axial	-0,154	189,998	189,998

	Npl, Rd	Nu, Rd	Ncr, T	Ncr, TF	An/Ag
	189,998	213,903	629,056	153,488	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb, Rd
Major (y-y)	b	0,340	172,016	1,051	1,197	0,565	107,359
MajorB(y-y)	b	0,340	172,016	1,051	1,197	0,565	107,359
Minor (z-z)	b	0,340	42,201	2,122	3,078	0,188	35,799
MinorB(z-z)	b	0,340	42,201	2,122	3,078	0,188	35,799
Torsional TF	b	0,340	153,488	1,113	1,274	0,528	100,269

Figura 9.17 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 5 (Frame 1178).

Diagonal mais esforçada

Frame : 1146 X Mid: 0,000 Combo: ELU1.Wy_PR2B (T+) Design Type: Brace
 Length: 2,871 Y Mid: 3,032 Shape: L90X9 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 0,000 Z Mid: 1,050 Class: Class 3 Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
 D/C Ratio: 0,168 = 0,144 + 0,000 + 0,024 < 1,000 OK
 = $N_{Ed}/(\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{zy} (M_y, Ed+N_{Ed} e_{Ny})/(\chi_{LT} M_y, R_k/\gamma_{M1})$
 + $k_{zz} (M_z, Ed+N_{Ed} e_{Nz})/(M_z, R_k/\gamma_{M1})$ (EC3 6.3.3(4)-6.62)

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned Force	Nc, Rd Capacity	Nt, Rd Capacity
Axial	-13,820	426,800	426,800

	Npl, Rd	Nu, Rd	Ncr, T	Ncr, TF	An/Ag
	426,800	480,499	1408,500	405,703	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb, Rd
Major (y-y)	b	0,340	467,039	0,956	1,085	0,625	266,824
MajorB(y-y)	b	0,340	467,039	0,956	1,085	0,625	266,824
Minor (z-z)	b	0,340	115,379	1,923	2,643	0,224	95,810
MinorB(z-z)	b	0,340	115,379	1,923	2,643	0,224	95,810
Torsional TF	b	0,340	405,703	1,026	1,166	0,581	247,893

Figura 9.18 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 7 (Frame 1146).

- Comparação de resultados

Tabela 9.25 Comparação dos resultados para os dois procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	3 / 1139	N_{Rd} (kN)	303,050	303,050	0,00
	Elemento	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	72,48	72,217	0,36
Secção Transversal	5 / 1178	N_{Rd} (kN)	190,030	189,998	0,02
	Elemento	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	40,560	35,799	13,30
Secção Transversal	7 / 1146	N_{Rd} (kN)	426,250	426,800	0,13
	Elemento	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	121,810	95,810	27,14

As diferenças nas barras 5 e 7 devem-se ao facto do “SAP2000” não calcular a resistência à encurvadura por compressão em cantoneiras a partir da esbelteza efetiva $\lambda_{eff,v}$.

Dimensionamento da viga VT1 aos Estados Limites de Serviço

A verificação dos estados limites de serviço foi efetuada verificando a flecha no nó a meio vão da viga.

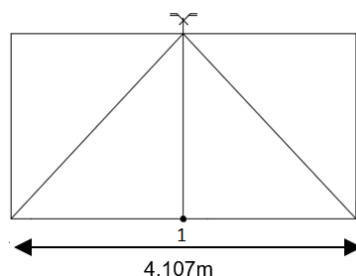


Figura 9.19 Identificação do nó 1.

Os apoios da viga de travamento VT1 estão apoiados nas asnas, acompanhando assim a sua deformada. Neste sentido, as flechas máximas foram calculadas a partir da diferença entre o deslocamento vertical máximo no nó 1 e o deslocamento nas secções de apoio da viga.

O deslocamento vertical máximo admissível absoluto é:

$$\delta_{adm,abs} = \delta_{v,asna} + L/200 \quad (9.5)$$

A verificação das flechas com base nestas premissas encontra-se indicada na tabela 9.26.

Tabela 9.26 Verificação das flechas em termos absolutos.

Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,abs}$ (mm)	$\delta_{v,abs}$ (mm)	Rácio absoluto
611	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	4,107	63,16	36,77	0,61

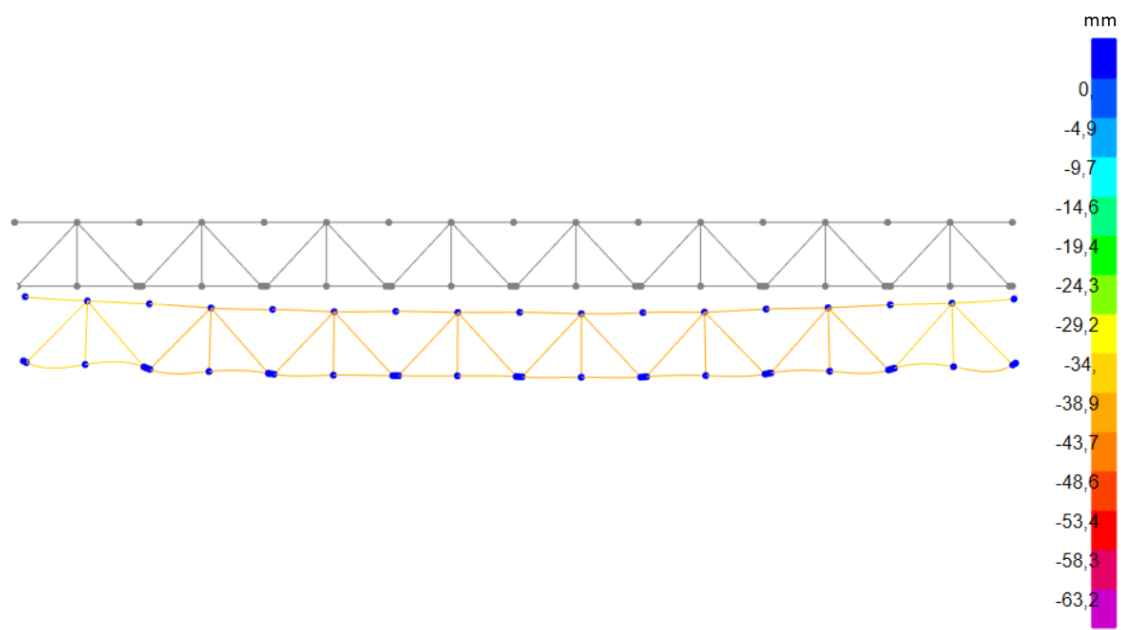


Figura 9.20 Flecha absoluta no “SAP2000”.

O critério de verificação aos estados limites de utilização tem que ser considerado em termos relativos e não absolutos. Assim, o deslocamento vertical máximo admissível relativo é:

$$\delta_{adm,rel} = L/250 \quad (9.6)$$

Na tabela 9.27 encontram-se as verificações realizadas respeitantes aos estados limites de serviço para a viga.

Tabela 9.27 Verificação das flechas em termos relativos.

Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
611	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	4,107	16,43	1,72	0,10

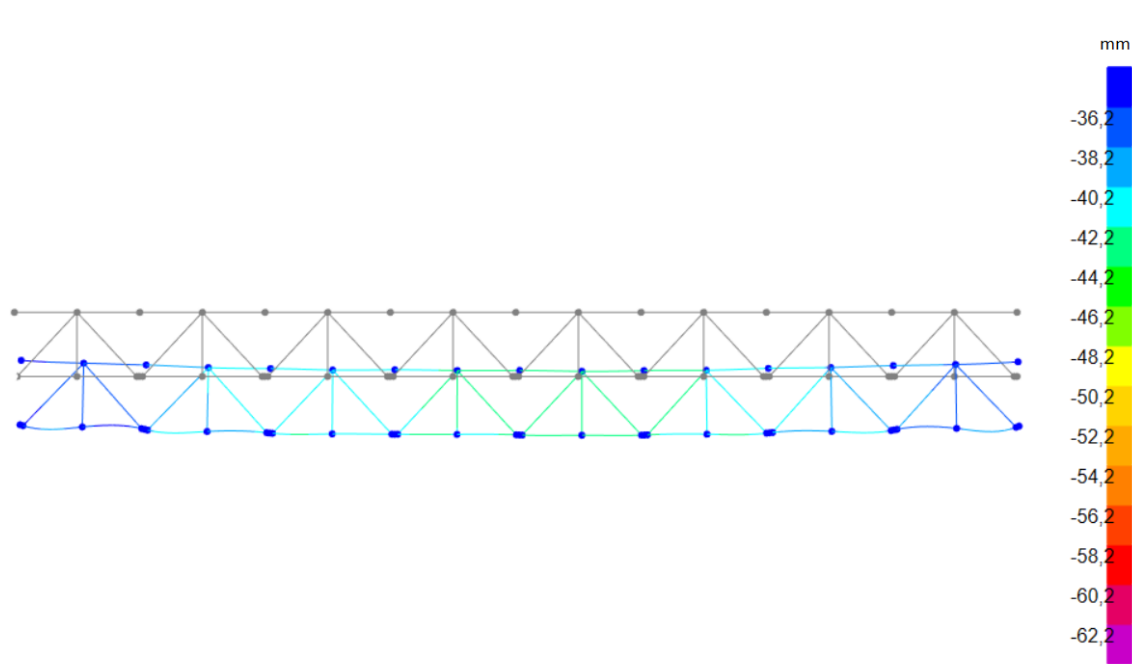


Figura 9.21 Deformada da viga.

Analisando os resultados conclui-se que a solução adotada cumpre as condições de segurança aos estados limites de utilização. O rácio é bastante reduzido uma vez que as vigas de travamento só estão sujeitas ao peso próprio, servindo apenas para reduzir o comprimento de encurvadura das barras dos cordões das asnas no plano de menor inércia.

9.1.3 Dimensionamento da viga de travamento Tipo 2

Na figura 9.22 estão identificadas as barras da viga de travamento VT2.

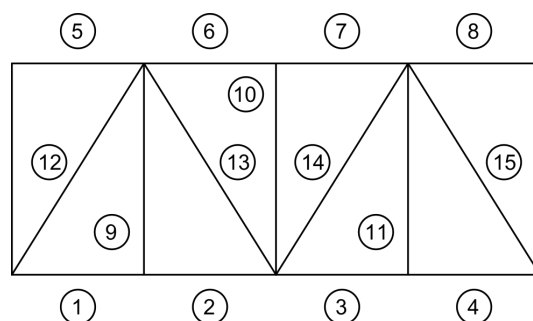


Figura 9.22 Identificação das barras da viga.

A tabela 9.28 resume os esforços axiais máximos que atuam nas barras da viga.

Tabela 9.28 Esforços axiais máximos nas barras.

Nº Barra	Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
1	955	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	36,817
1	895	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	30,681
2	990	Compressão	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,114
2	990	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	24,667
3	991	Compressão	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,206
3	975	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	25,176
4	992	Compressão	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,402
4	976	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	25,351
5	921	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	32,516
5	925	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,696
6	906	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,524
6	926	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,313
7	907	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,524
7	927	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,313
8	908	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,933
8	928	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,49
9	1023	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	1,463
9	1082	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	1,921
10	1127	Compressão	ELU.ET1x_PR1B	0,265
10	1127	Tração	ELU.ET1x_PR2A	0,023
11	1084	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	0,83
11	1125	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T-)	1,892
12	1019	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	14,429
12	959	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	13,289
13	960	Compressão	ELU2.Wy_PR2B (T-)	12,208
13	1020	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,284
14	1022	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,041
14	1018	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	12,786
15	1079	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	14,306
15	1021	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,132

Dimensionamento da viga de travamento VT2 aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.29 Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores da viga VT2.

Nº Barra	SAP Frame Label	Esforço	Perfil	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
1	955	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	36,817	303,05	0,12
1	895	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	30,681	303,05	0,10
2	990	Compressão	UNP 80	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,114	303,05	0,10
2	990	Tração	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	24,667	303,05	0,08
3	991	Compressão	UNP 80	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,206	303,05	0,10
3	975	Tração	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	25,176	303,05	0,08
4	992	Compressão	UNP 80	ELU1.Wy_PR1A (T+)	30,402	303,05	0,10
4	976	Tração	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	25,351	303,05	0,08
5	921	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	32,516	303,05	0,11
5	925	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,696	303,05	0,12
6	906	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,524	303,05	0,11
6	926	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,313	303,05	0,12
7	907	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,524	303,05	0,11
7	927	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,313	303,05	0,12
8	908	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T+)	33,933	303,05	0,11
8	928	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	37,49	303,05	0,12
9	1023	Compressão	L 50X5	ELU2.Wy_PR2B (T-)	1,463	132,00	0,01
9	1082	Tração	L 50X5	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	1,921	132,00	0,01
10	1127	Compressão	L 50X5	ELU.ET1x_PR1B	0,265	132,00	0,00
10	1127	Tração	L 50X5	ELU.ET1x_PR2A	0,023	132,00	0,00
11	1084	Compressão	L 50X5	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	0,83	132,00	0,01
11	1125	Tração	L 50X5	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T-)	1,892	132,00	0,01
12	1019	Compressão	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	14,429	190,03	0,08
12	959	Tração	L 60X6	ELU2.Wy_PR2B (T-)	13,289	190,03	0,07
13	960	Compressão	L 60X6	ELU2.Wy_PR2B (T-)	12,208	190,03	0,06
13	1020	Tração	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,284	190,03	0,06
14	1022	Compressão	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,041	190,03	0,06
14	1018	Tração	L 60X6	ELU2.Wy_PR2B (T-)	12,786	190,03	0,07
15	1079	Compressão	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	14,306	190,03	0,08
15	1021	Tração	L 60X6	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	12,132	190,03	0,06

- Verificação à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos cordões inferiores e superiores

Tabela 9.30 Verificação à encurvadura por compressão - Cordões inferiores e superiores.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo y-y						Eixo z-z						Condicionante	Rácio
				$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_y \leq 0,2$	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_z \leq 0,2$	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
1	UNP 80	36,82	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,40
2	UNP 80	30,11	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,32
3	UNP 80	30,21	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,33
4	UNP 80	30,40	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,33
5	UNP 80	32,52	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,35
6	UNP 80	33,52	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,36
7	UNP 80	33,52	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,36
8	UNP 80	33,933	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,37

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos prumos e diagonais

Tabela 9.31 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Diagonais

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo v-v							Rácio	Solução Ótima			
				$L_{cr,v}$ (m)	λ_v	$\bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,v}$	$\bar{\lambda}_{eff,v} \leq 0,2$	χ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)		$N_{c,Ed} / N_{b,Rd,v}$ (kN)	Perfil	λ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)
9	L 50X5	1,463	1,639	1,639	168,97	1,95	1,71	Não	0,27	36,25	0,040	L 50X5	168,97	36,25	0,040
10	L 50X5	0,265	1,639	1,639	168,97	1,95	1,71	Não	0,27	36,25	0,007	L 50X5	168,97	36,25	0,007
11	L 50X5	0,83	1,639	1,639	168,97	1,95	1,71	Não	0,27	36,25	0,023	L 50X5	168,97	36,25	0,023
12	L 60X6	14,429	1,885	1,885	161,11	1,86	1,65	Não	0,29	55,63	0,259	L 60X6	161,1	55,63	0,398
13	L 60X6	12,208	1,885	1,885	161,11	1,86	1,65	Não	0,29	55,63	0,219	L 60X6	161,11	55,63	0,337
14	L 60X6	12,041	1,885	1,885	161,11	1,86	1,65	Não	0,29	55,63	0,216	L 60X6	161,11	55,63	0,332
15	L 60X6	14,306	1,885	1,885	161,11	1,86	1,65	Não	0,29	55,63	0,257	L 60X6	161,11	55,63	0,395

As figuras 9.23 e 9.24 mostram as esbeltezas e os rácios obtidos nas barras da viga.

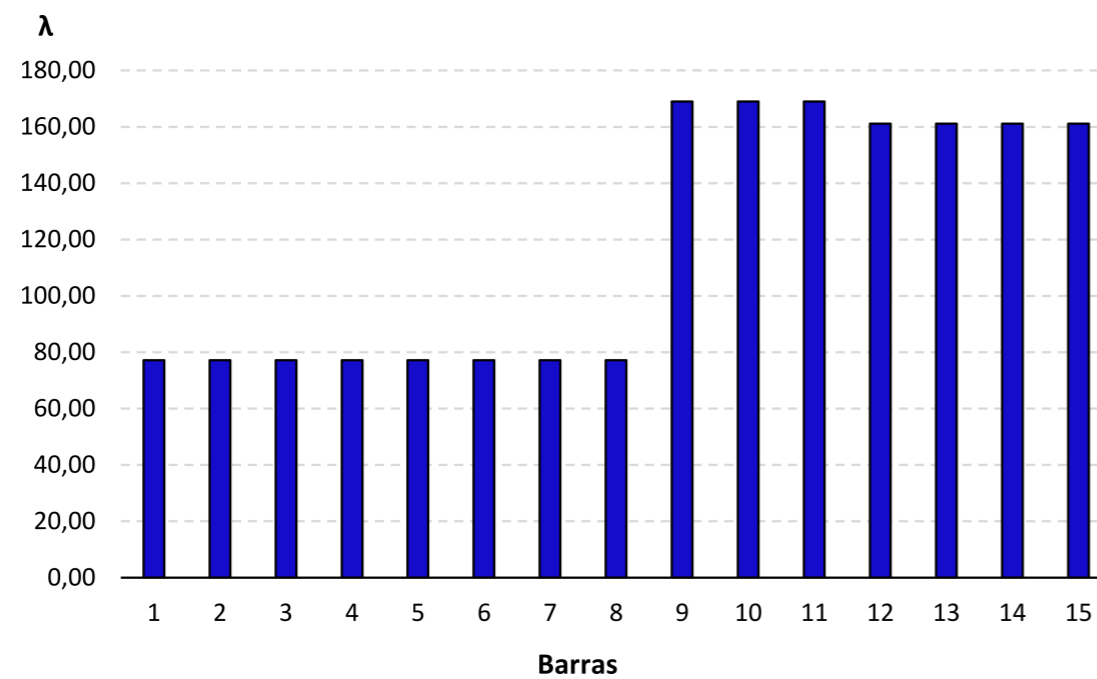


Figura 9.23 Esbeltezas obtidas nas barras da viga VT2.

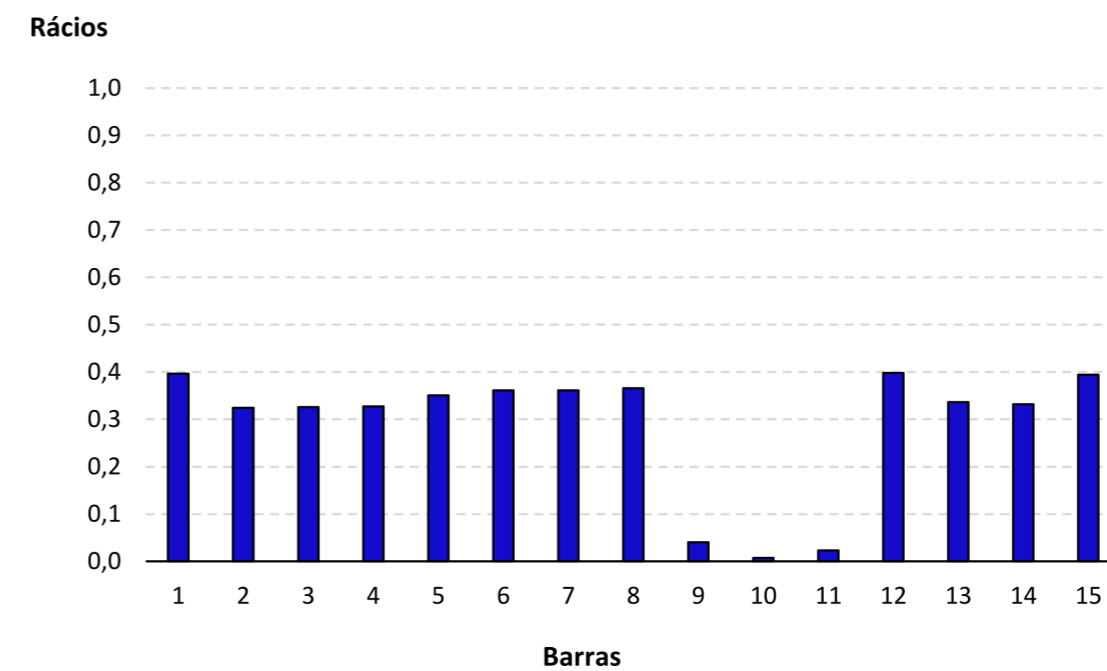


Figura 9.24 Rácios obtidos nas barras da viga VT2.

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”

Cordão mais esforçado

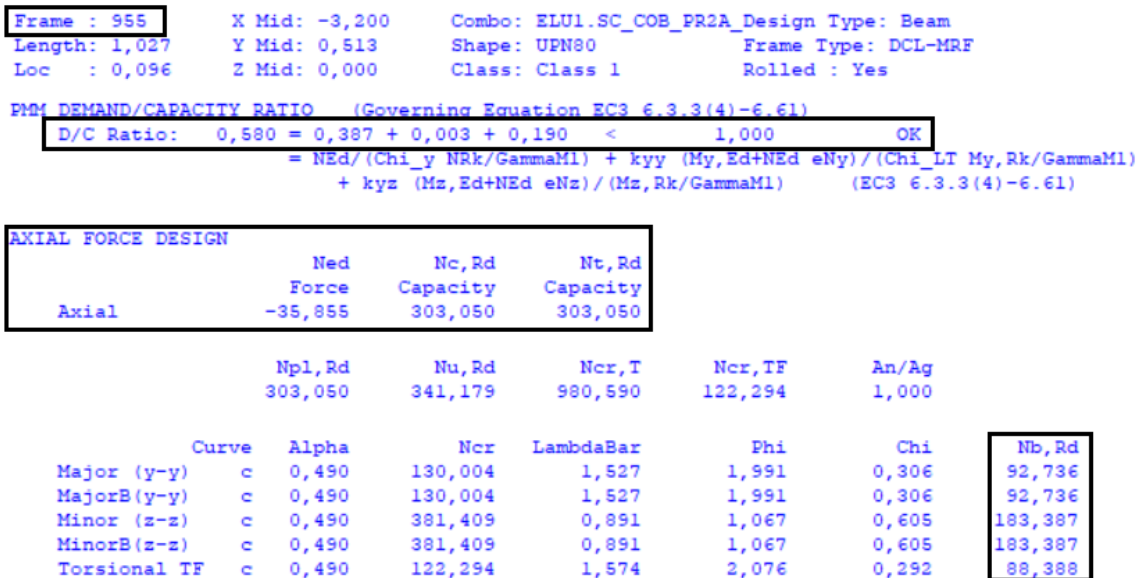


Figura 9.25 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 1 (Frame 955).

Prumo mais esforçado

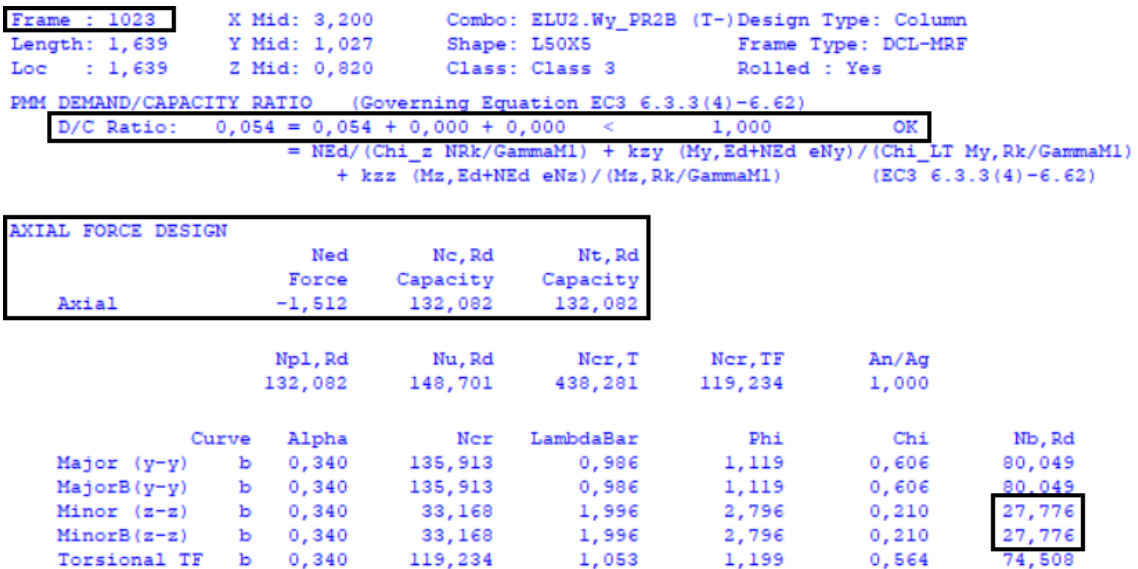


Figura 9.26 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 9 (Frame 1023).

Diagonal mais esforçada

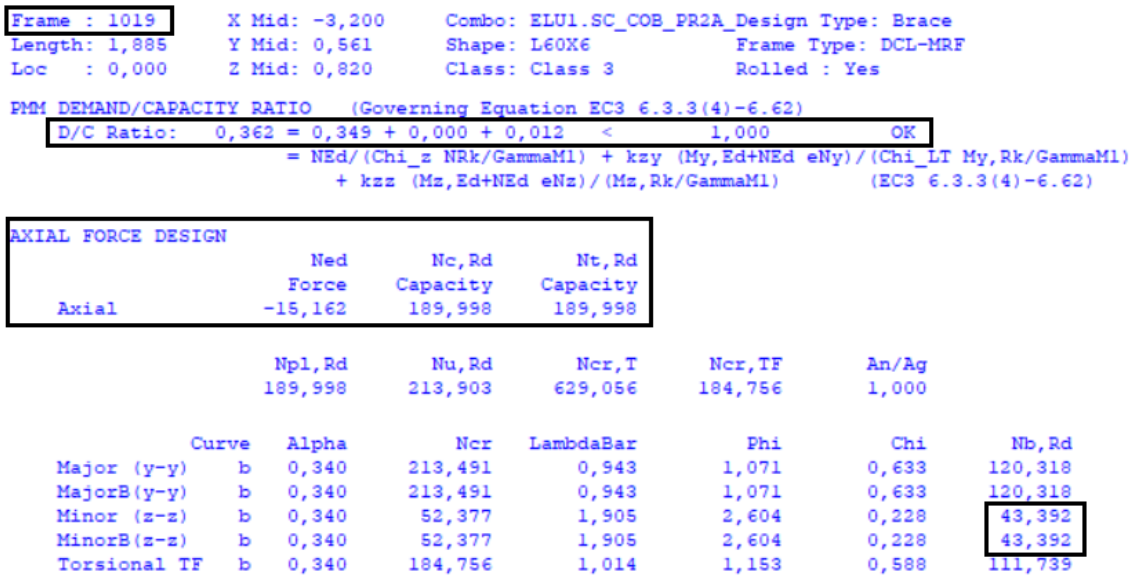


Figura 9.27 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 12 (Frame 1019).

- Comparação de resultados

Tabela 9.32 Comparação dos resultados obtidos pelos dois procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	1 / 955	N_{Rd} (kN)	303,050	303,050	0,00
Elemento	1 / 955	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	92,77	92,736	0,04
Secção Transversal	9 / 1023	N_{Rd} (kN)	132,000	132,082	0,06
Elemento	9 / 1023	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	36,250	27,776	30,51
Secção Transversal	12 / 1019	N_{Rd} (kN)	190,030	189,998	0,02
Elemento	12 / 1019	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	55,630	43,392	28,20

As diferenças entre os dois procedimentos resulta do facto do “SAP2000” não calcular a resistência à encurvadura por compressão a partir da esbelteza efetiva $\lambda_{eff,v}$.

Dimensionamento da viga VT2 aos Estados Limites de Serviço

A verificação dos estados limites de serviço foi efetuada para o nó 1 (meio-vão), indicado na figura 9.29.

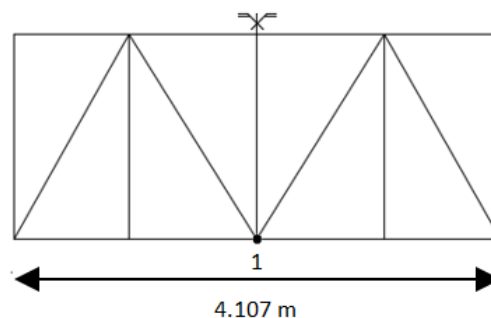


Figura 9.28 Identificação do nó 1.

O deslocamento vertical máximo admissível relativo é:

$$\delta_{adm,rel} = L/250 \quad (9.7)$$

Na tabela 9.33 e na figura 9.29 indicam-se os resultados referentes aos estudos realizados.

A verificação das flechas nas vigas VT2 encontra-se apresentada na tabela 9.33.

Tabela 9.33 Verificação das flechas relativas.

Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
548	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	4,107	16,43	1,89	0,12

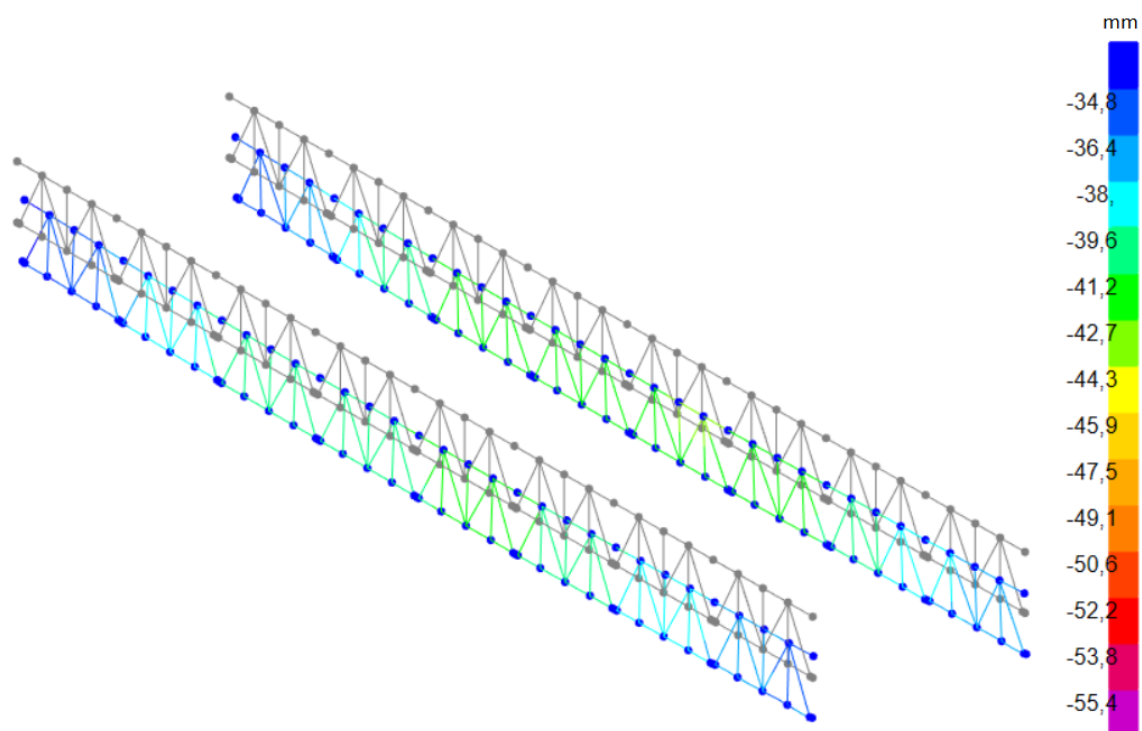


Figura 9.29 Flecha relativa no “SAP2000” para as vigas VT2.

9.1.4 Dimensionamento da viga de travamento tipo 3

A figura 9.30 mostra a numeração considerada para as barras da viga de travamento VT3.

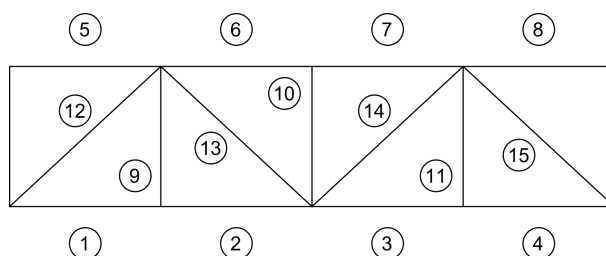


Figura 9.30 Identificação das barras da viga.

Na tabela 9.34 indicam-se os esforços axiais para as barras da viga.

Tabela 9.34 Esforços axiais máximos atuantes nas barras da viga VT3.

Nº Barra	Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
1	655	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	35,768
1	655	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	35,143
2	716	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	28,471
2	722	Tração	ELU.ET1y_PR1B	26,962
3	723	Compressão	ELU.ET1y_PR2A	30,438
3	723	Tração	ELU.ET1y_PR1B	35,368
4	724	Compressão	ELU.ET1y_PR2A	35,767
4	724	Tração	ELU.ET1y_PR1B	39,492
5	708	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	37,627
5	692	Tração	ELU2.Wy_PR2B (T-)	33,556
6	658	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	29,208
6	685	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	32,774
7	659	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	29,208
7	686	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	32,774
8	671	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	31,747
8	687	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	34,736
9	783	Compressão	ELU1.Wy_PR1B (T+)	1,189
9	783	Tração	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	1,613
10	887	Compressão	ELU.ET1y_PR2A	0,292
10	860	Tração	ELU.ET1x_PR1B	0,077
11	852	Compressão	ELU.ET1y_PR1B	0,715
11	885	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	1,601
12	779	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	14,345
12	779	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	13,016
13	838	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	12,48
13	780	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	12,355
14	781	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	12,137
14	781	Tração	ELU2.Wy_PR2A (T-)	12,908
15	840	Compressão	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	14,536
15	782	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	11,717

Dimensionamento da viga de travamento VT3 aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.35 Verificação da resistência das secções transversais nos cordões inferiores e superiores da viga VT3.

Nº Barra	SAP Frame Label	Esforço	Perfil	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
1	655	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	35,768	303,05	0,12
1	655	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR1B (T-)	35,143	303,05	0,12
2	716	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	28,471	303,05	0,09
2	722	Tração	UNP 80	ELU.ET1y_PR1B	26,962	303,05	0,09
3	723	Compressão	UNP 80	ELU.ET1y_PR2A	30,438	303,05	0,10
3	723	Tração	UNP 80	ELU.ET1y_PR1B	35,368	303,05	0,12
4	724	Compressão	UNP 80	ELU.ET1y_PR2A	35,767	303,05	0,12
4	724	Tração	UNP 80	ELU.ET1y_PR1B	39,492	303,05	0,13
5	708	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	37,627	303,05	0,12
5	692	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2B (T-)	33,556	303,05	0,11
6	658	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	29,208	303,05	0,10
6	685	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR1B (T-)	32,774	303,05	0,11
7	659	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	29,208	303,05	0,10
7	686	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR1B (T-)	32,774	303,05	0,11
8	671	Compressão	UNP 80	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	31,747	303,05	0,10
8	687	Tração	UNP 80	ELU2.Wy_PR2A (T-)	34,736	303,05	0,11
9	783	Compressão	L 35X4	ELU1.Wy_PR1B (T+)	1,189	73,43	0,02
9	783	Tração	L 35X4	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	1,613	73,43	0,02
10	887	Compressão	L 35X4	ELU.ET1y_PR2A	0,292	73,43	0,00
10	860	Tração	L 35X4	ELU.ET1x_PR1B	0,077	73,43	0,00
11	852	Compressão	L 35X4	ELU.ET1y_PR1B	0,715	73,43	0,01
11	885	Tração	L 35X4	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T-)	1,601	73,43	0,02
12	779	Compressão	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	14,345	118,25	0,12
12	779	Tração	L 45X5	ELU2.Wy_PR2A (T-)	13,016	118,25	0,11
13	838	Compressão	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	12,48	118,25	0,11
13	780	Tração	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	12,355	118,25	0,10
14	781	Compressão	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	12,137	118,25	0,10
14	781	Tração	L 45X5	ELU2.Wy_PR2A (T-)	12,908	118,25	0,11
15	840	Compressão	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR2A_Wxx3 (T+)	14,536	118,25	0,12
15	782	Tração	L 45X5	ELU1.SC_COB_PR1B_Wxx3 (T+)	11,717	118,25	0,10

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos cordões inferiores e superiores

Tabela 9.36 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Cordões inferiores e superiores.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo y-y						Eixo z-z						Condicionante	Rácio
				$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	$\bar{\lambda}_y \leq 0,2$	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	$\bar{\lambda}_z$	$\bar{\lambda}_z \leq 0,2$	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
1	UNP 80	35,768	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,39
2	UNP 80	28,471	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,31
3	UNP 80	30,438	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,33
4	UNP 80	35,767	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,39
5	UNP 80	37,627	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,41
6	UNP 80	29,208	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,31
7	UNP 80	29,208	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,31
8	UNP 80	31,747	1,027	4,108	132,52	1,53	Não	0,31	92,77	1,027	77,22	0,89	Não	0,61	183,75	92,77	0,34

- Verificação dos elementos à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel” nos prumos e diagonais

Tabela 9.37 Verificação dos elementos à encurvadura por compressão - Prumos e Diagonais.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo v-v							Rácio	Solução Ótima			
				$L_{cr,v}$ (m)	λ_v	$\bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{eff,v}$	$\bar{\lambda}_{eff,v} \leq 0,2$	χ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)		$N_{c,Ed} / N_{b,Rd,v}$ (kN)	Perfil	λ_v	$N_{b,Rd,v}$ (kN)
9	L 35X4	1,463	0,948	0,948	139,41	1,61	1,47	Não	0,35	25,84	0,057	L 35X4	139,41	25,84	0,057
10	L 35X4	0,265	0,948	0,948	139,41	1,61	1,47	Não	0,35	25,84	0,010	L 35X4	139,41	25,84	0,010
11	L 35X4	0,83	0,948	0,948	139,41	1,61	1,47	Não	0,35	25,84	0,032	L 35X4	139,41	25,84	0,032
12	L 45X5	14,429	1,329	1,329	152,76	1,76	1,58	Não	0,31	37,11	0,389	L 45X5	152,76	37,11	0,389
13	L 45X5	12,208	1,329	1,329	152,76	1,76	1,58	Não	0,31	37,11	0,329	L 45X5	152,76	37,11	0,329
14	L 45X5	12,041	1,329	1,329	152,76	1,76	1,58	Não	0,31	37,11	0,324	L 45X5	152,76	37,11	0,324
15	L 45X5	14,306	1,329	1,329	152,76	1,76	1,58	Não	0,31	37,11	0,386	L 45X5	152,76	37,11	0,386

As figuras 9.31 e 9.32 mostram as esbeltezas e os rácios obtidos nas barras da viga VT3.

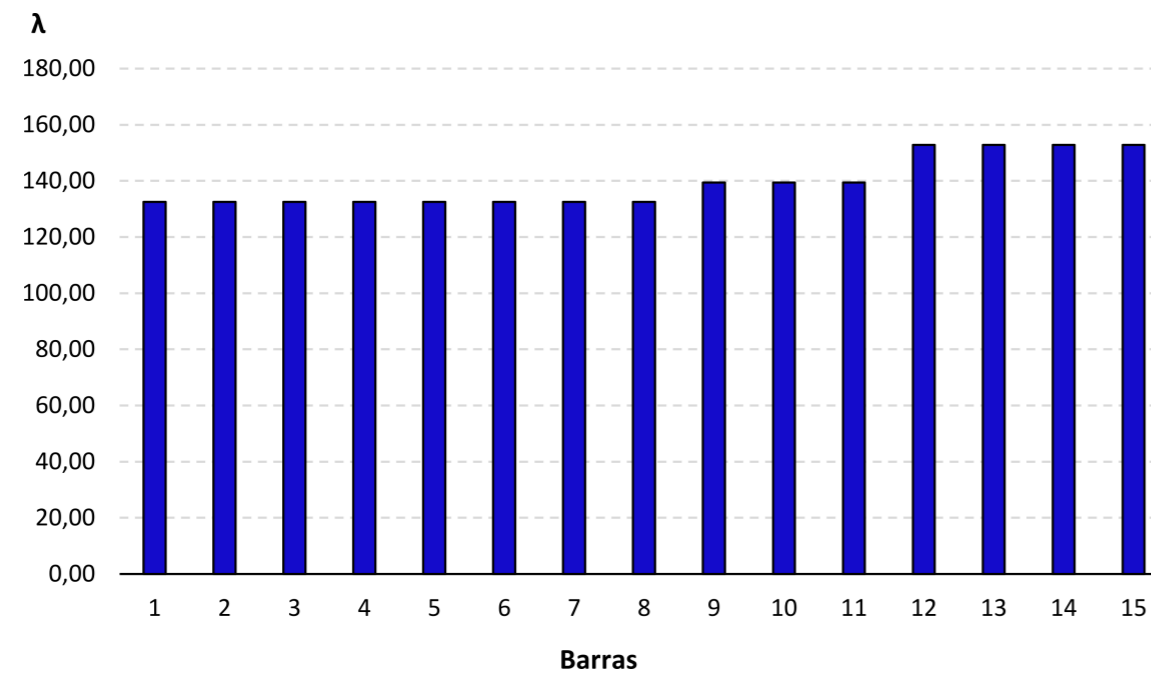


Figura 9.31 Esbeltezas obtidas nas barras.

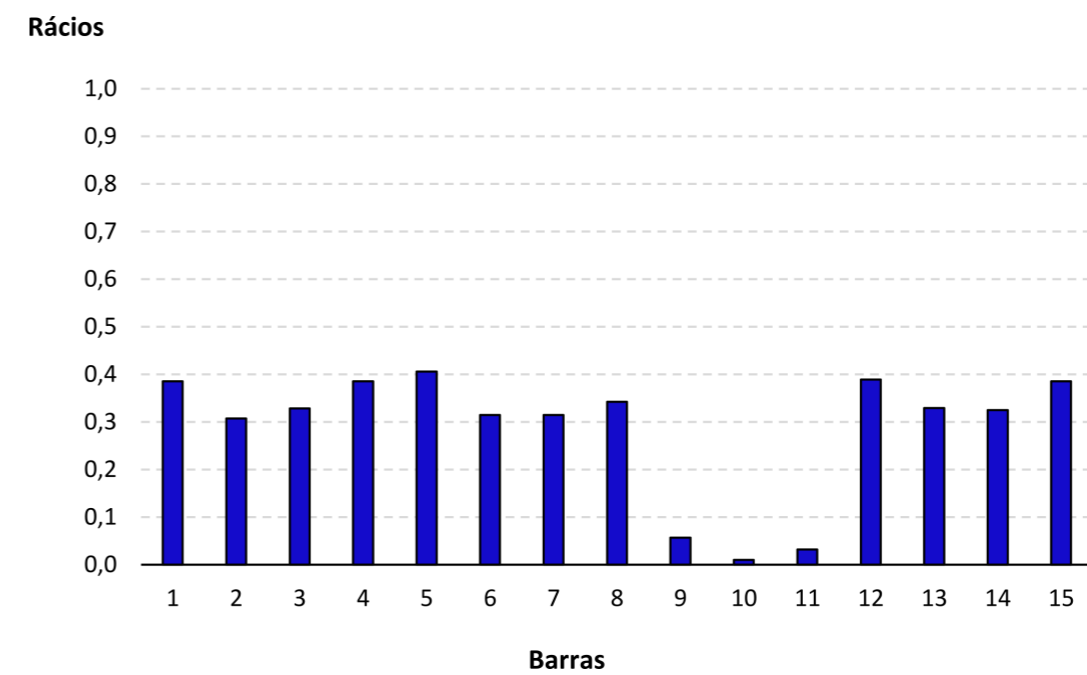


Figura 9.32 Rácios obtidos nas barras.

- Verificação da resistência das secções e encurvadura a partir do “SAP2000”

Cordão mais esforçado

Frame : 708	X Mid: 8,000	Combo: ELU1.SC_COB_PR2A	Design Type: Beam
Length: 1,027	Y Mid: 29,261	Shape: UPN80	Frame Type: DCL-MRF
Loc : 1,027	Z Mid: 0,948	Class: Class 1	Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.1.1(1)-6.46)

D/C Ratio:	0,412 = 0,412	<	1,000	OK
	= (Ned/Nb,Rd)		(EC3 6.3.1.1(1)-6.46)	

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-36,445	303,050	303,050

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	303,050	341,179	980,590	122,294	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0,490	130,004	1,527	1,991	0,306	92,736
MajorB(y-y)	c	0,490	130,004	1,527	1,991	0,306	92,736
Minor (z-z)	c	0,490	381,409	0,891	1,067	0,605	183,387
MinorB(z-z)	c	0,490	381,409	0,891	1,067	0,605	183,387
Torsional TF	c	0,490	122,294	1,574	2,076	0,292	88,388

Figura 9.33 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 5 (Frame 708).

Prumo mais esforçado

Frame : 783	X Mid: -8,000	Combo: ELU1.Wy_PR1B (T+)	Design Type: Column
Length: 0,948	Y Mid: 1,027	Shape: L35X4	Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0,948	Z Mid: 0,474	Class: Class 3	Rolled : Yes

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)

D/C Ratio:	0,053 = 0,053 + 0,000 + 0,000	<	1,000	OK
	= NEd/(Chi_z NRk/GammaM1) + kzy (My,Ed+NED eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1) + kzz (Mz,Ed+NED eNz)/(Mz,Rk/GammaM1)		(EC3 6.3.3(4)-6.62)	

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-1,140	73,343	73,343

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	73,343	82,570	321,917	94,580	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	b	0,340	109,255	0,819	0,941	0,712	52,253
MajorB(y-y)	b	0,340	109,255	0,819	0,941	0,712	52,253
Minor (z-z)	b	0,340	26,997	1,648	2,105	0,293	21,488
MinorB(z-z)	b	0,340	26,997	1,648	2,105	0,293	21,488
Torsional TF	b	0,340	94,580	0,881	1,003	0,674	49,406

Figura 9.34 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 9 (Frame 783).

Diagonal mais esforçada

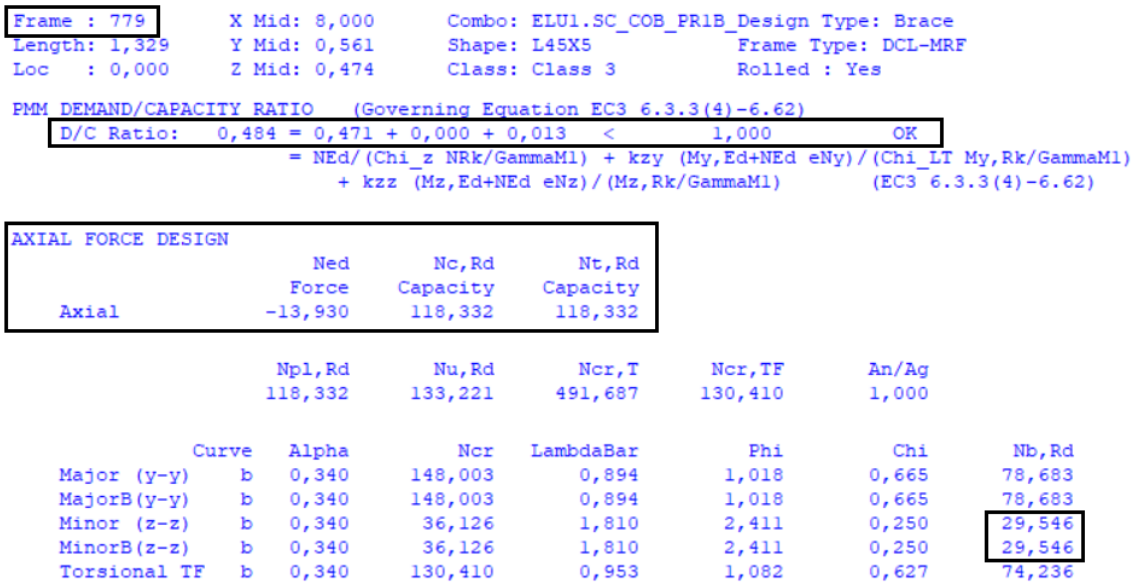


Figura 9.35 Verificação da resistência das secções e encurvadura - Barra 12 (Frame 779).

- Comparação de resultados

Tabela 9.38 Rácios comparativos do dimensionamento em ambos os procedimentos.

Resistência	Barra / Frame	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	5 / 708	N_{Rd} (kN)	303,050	303,050	0,00
Elemento	5 / 708	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	92,77	92,736	0,04
Secção Transversal	9 / 783	N_{Rd} (kN)	73,43	73,343	0,12
Elemento	9 / 783	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	25,840	21,488	20,25
Secção Transversal	12 / 779	N_{Rd} (kN)	118,250	118,332	0,07
Elemento	12 / 779	$N_{b,Rd,v}$ (kN)	37,110	29,546	25,60

As diferenças nas barras 9 e 12 devem-se ao facto do “SAP2000” verificar a encurvadura por compressão a partir da esbelteza efetiva $\lambda_{eff,v}$.

Dimensionamento da viga VT3 aos Estados Limites de Serviço

A verificação dos estados limites de serviço na viga VT2 foi efetuada no nó 1 (meio-vão) da viga.

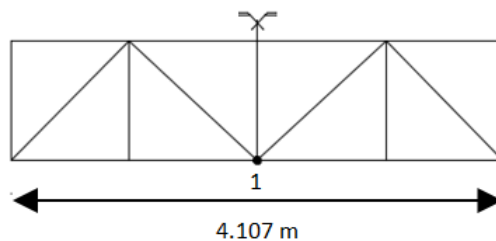


Figura 9.36 Vão da viga e posição do nó 1.

O deslocamento vertical máximo admissível relativo é dado por:

$$\delta_{adm,rel} = L/250 \quad (9.8)$$

Na tabela 9.39 e na figura 9.39 indicam-se os resultados realizados na verificação da deformação.

Tabela 9.39 Verificação das flechas relativas para as vigas VT3.

Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
437	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	4,107	20,54	0,89	0,04

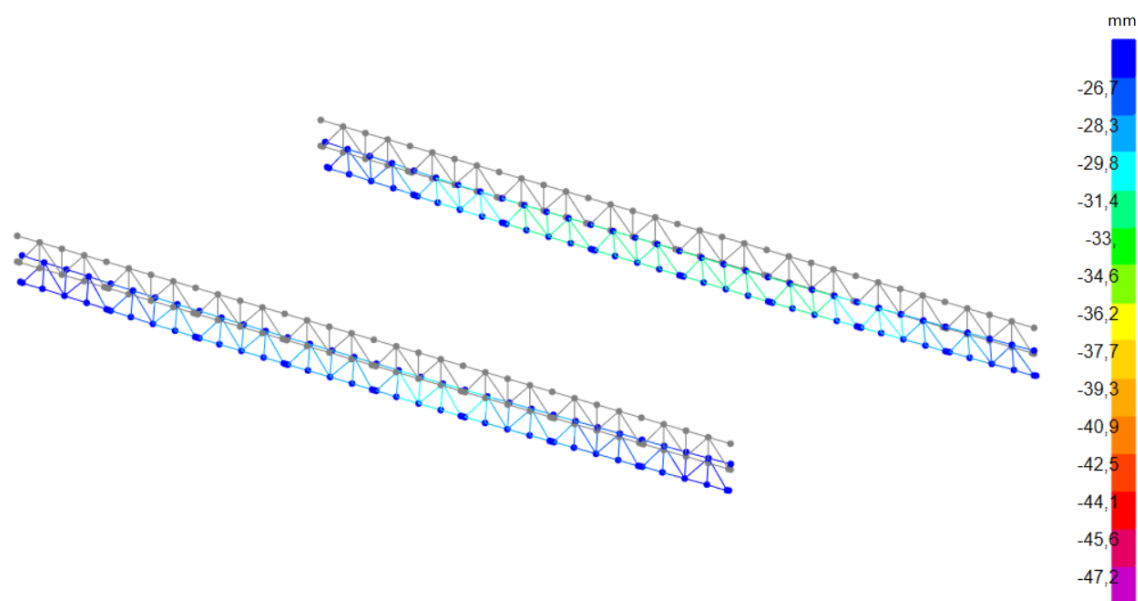


Figura 9.37 Flechas relativas no “SAP2000”.

Encontra-se satisfeito o critério de verificação de segurança das vigas VT3 aos estados limites de utilização.

9.1.5 Dimensionamento das madres da cobertura

As madres da cobertura foram dimensionadas como vigas contínuas apoiadas nas asnas, e funcionam independentemente entre as juntas de dilatação que dividem o Hangar.

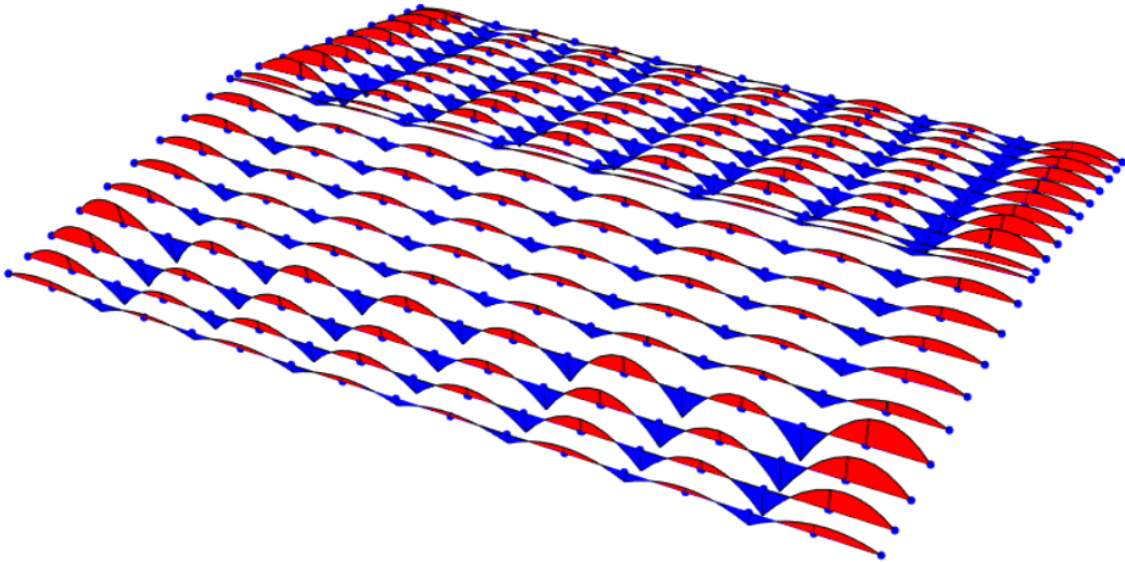


Figura 9.38 Diagramas de momentos fletores M_y .

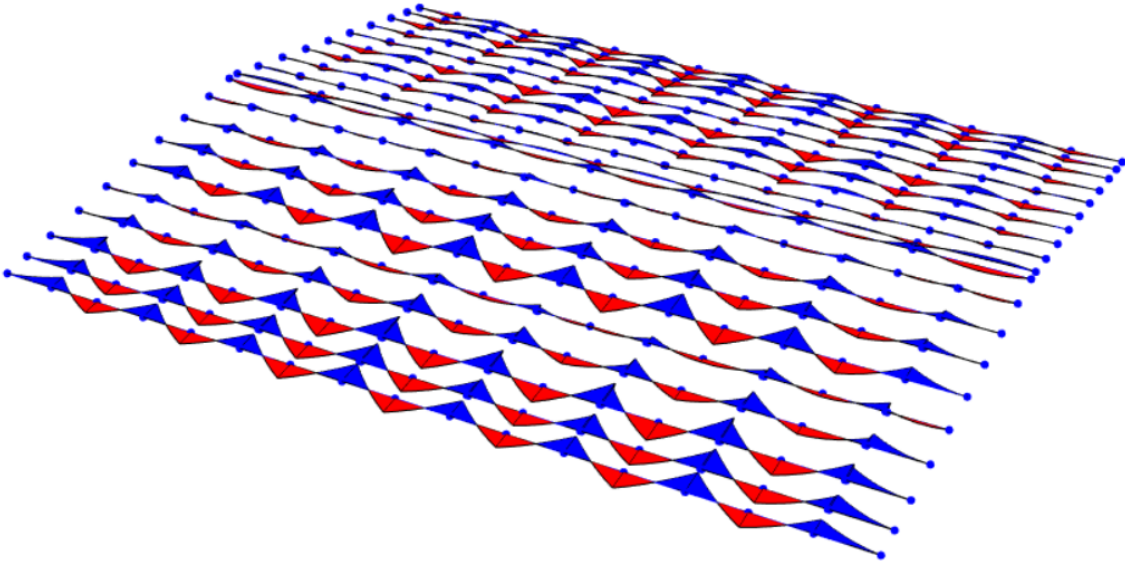


Figura 9.39 Diagramas de momentos fletores M_z .

Na figura 9.40 e na tabela 9.40 encontram-se indicadas as madres mais esforçadas e os esforços de cálculo a que estão sujeitas.

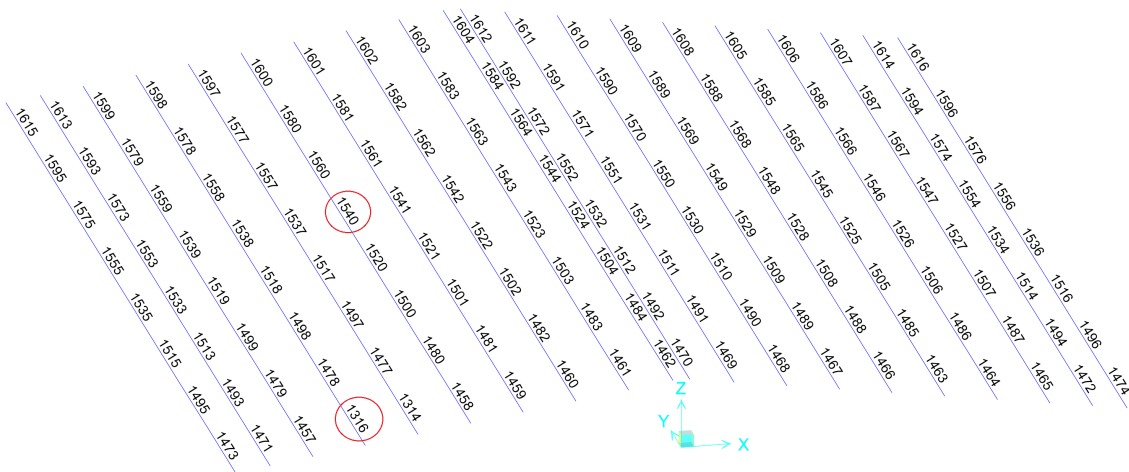


Figura 9.40 Madres de cobertura mais esforçadas.

Tabela 9.40 Esforços máximos de cálculo nas madres da cobertura.

Frame Label	Combinação	$V_{z,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$V_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$
1540	ELU1.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	5,54	3,76	0,72	0,52
1316	ELU2.Wx1_PR1A (T+)	8,34	5,85	1,1	0,15

Foi verificada a segurança a esforços isolados (V_z , M_y , V_y e M_z) e combinados (flexão + esforço transversal) para as secções mais solicitadas. De referir que estas vigas encontram-se travadas a meio-vão por tarugos que tem como papel principal diminuir os momentos fletores segundo z, bem como limitar o comprimento de bambeamento destes elementos, conforme se mostra na figura 9.41.

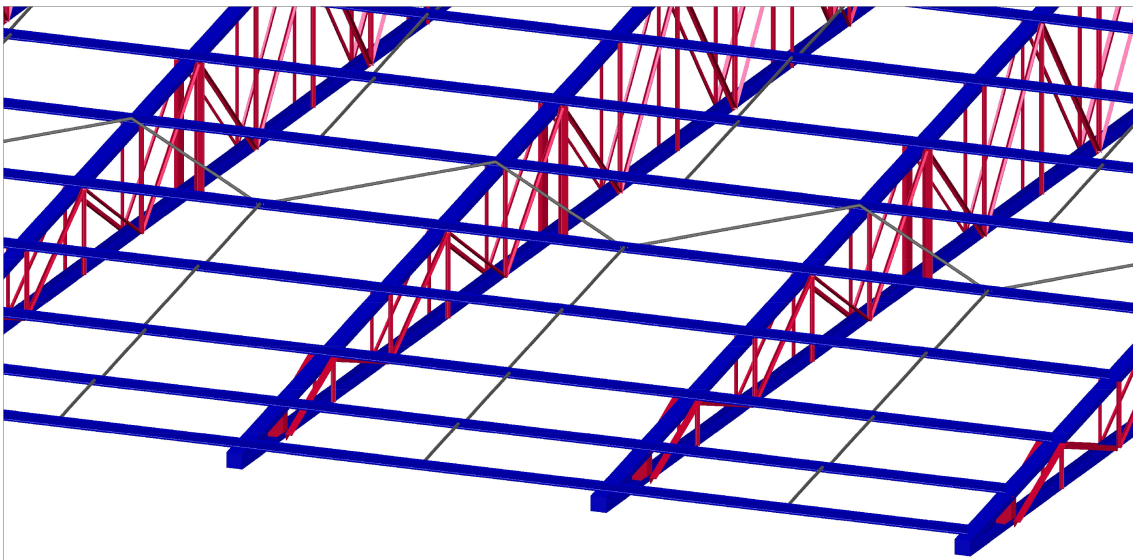


Figura 9.41 Posição dos tarugos nas madres.

Dimensionamento das madres da cobertura aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.41 Esforços de cálculo na barra 1316.

Perfil	Barra	Esforços Atuantes					Classe da Secção		
		N_{Ed} (kN)	$V_{y,Ed}$ (kN)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	$M_{z,Ed}$ (kN.m)	Flexão	Compressão	Class. Geral
IPE 120	1316	0	1,1	8,34	5,85	0,15	1	1	1

Tabela 9.42 Verificação da resistência da secção transversal da barra 1316.

Esforços Resistentes Simples				Flexão Desviada com Esforço Transverso							Rácio	
$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)	$V_{z,Ed} \leq 0,5 V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$	α	$V_{y,Ed} \leq 0,5 V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}$	β	$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}\right)^\beta$
128,03	100,18	16,70	3,73	Desprezar E.T.	16,70	0,35	2,00	Desprezar E.T.	3,73	0,04	1,00	0,16

- Verificação da resistência das secções transversais a partir do software “SemiComp+”

SEMICOMP Cross-Section Check

Choose method: EN 1993-1-1 (elastic Resistance)

$N_{Ed} = 0,000$ kN
 $M_{y,Ed} = 5,850$ kNm
 $M_{z,Ed} = 0,150$ kNm
 $V_{z,Ed} = 8,340$ kN
 $V_{y,Ed} = 1,100$ kN

Reference values for classification:

$c/t_w = 21,227$, $\alpha_{web} = 0,500$, $\psi_{web} = -1,000$, $\epsilon = 0,924$
 $c/t_f = 3,619$, $\alpha_{flange} = 1,000$, $\psi_{flange} = 0,903$, $\epsilon_{mod,c/3/4} = NaN$

Boundaries	Class 1	Class 2	Class 3
$c/t_w \leq c/t_{w,max}$	66,558	76,727	114,628
$c/t_f \leq c/t_{f,max}$	8,320	9,244	12,839

Cross section class = 1

Results:
 $M_{pl,y,Rd} = 16,70$ kNm, $M_{pl,z,Rd} = 3,73$ kNm, $V_{pl,z,Rd} = 100,11$ kN
 $M_{el,y,Rd} = 14,56$ kNm, $M_{el,z,Rd} = 2,38$ kNm, $V_{pl,y,Rd} = 128,03$ kN
 $N_{Rd} = 363,28$ kN

EN 1993-1-1, 6.2.3 / 6.2.4

Tension or compression
 $U_{(6.5)/(6.9)} = 0,000 \leq 1,0$ ok

EN 1993-1-1, 6.2.5

Bending moment
 $U_{strong A} = 0,350 \leq 1,0$ ok
 $U_{weak A} = 0,040 \leq 1,0$ ok

EN 1993-1-1, 6.2.6

Shear
 $U_{z-plastic} = 0,083 \leq 1,0$ ok, $U_{y-plastic} = 0,009 \leq 1,0$ ok
 $U_{z-elastic} = 0,114 \leq 1,0$ ok, $U_{y-elastic} = 0,013 \leq 1,0$ ok
 $h_w/t_w = 25,273 \leq 72\epsilon/\eta = 55,465$ ok

EN 1993-1-1, 6.2.9

Bending and axial force
 $U_{(6.41)/(6.42)} = 0,163 \leq 1,0$ ok, $UF = 0,371$

Comment: Shear Interaction is not considered within this software tool. If the utilization for shear is higher than 0.5, an additional check for shear interaction is necessary.

Figura 9.42 Verificação da resistência da secção transversal da barra 1316 através do “SemiComp+”.

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral a partir da folha de cálculo “Excel”

Na verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral foi necessário primeiro determinar o momento crítico M_{cr} , no caso de vigas com secção transversal constante e duplamente simétrica sujeitas a cargas uniformemente distribuídas constantes em todo o vão segundo o eixo de menor inércia, e aplicada abaixo ou acima do seu centro de corte é dada por:

$$M_{cr} = C1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_W}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{0,5} - (C_2 z_g) \right\} \quad (9.9)$$

Os fatores C1 e C2 dependem da forma do diagrama de momentos fletores e das condições de apoio da viga, da posição dos travamentos laterais e do ponto de aplicação da carga. Os diagramas de esforço transverso (V_z) e momento fletor (M_y) encontram-se representados também na figura 9.43.

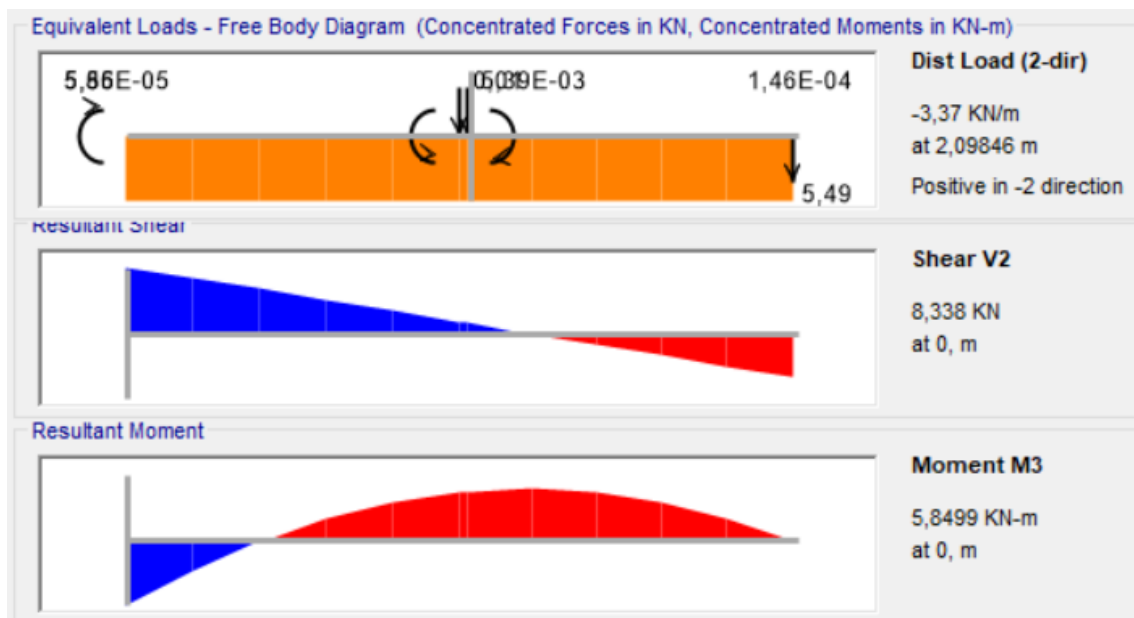


Figura 9.43 Diagramas de esforço transverso (V_z) e momento fletor (M_y).

Analisando o diagrama de momentos fletores na figura 9.43 verifica-se que se trata de uma viga encastrada-apoiada. Na figura 9.44 que se apresenta na página seguinte, estão indicados os valores de C1 e C2 em função das condições de apoio para os diversos tipos de carregamento.

Tendo presente que este caso não consta entre os mencionados na figura 9.44, considerou-se conservativamente o equivalente a uma viga simplesmente apoiada e sujeita a uma carga uniformemente distribuída ($C1=1,132$ e $C2= 0,459$). Para o coeficiente k_z adotou-se o valor unitário (rotações livres nas secções extremas em torno do eixo de menor inércia) e para o coeficiente k_w tomou-se, também, o valor unitário (empenamento livre em ambas as extremidades). Dado que a combinação condicionante provém da acção do vento, e que essas mesmas cargas se encontram aplicadas no banzo superior do elemento, $z_g (< 0)$ assume um efeito estabilizante uma vez que o ponto de aplicação se encontra na parte tracionada, contribuindo deste modo para o equilíbrio do elemento.

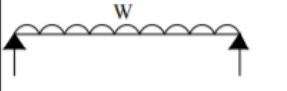

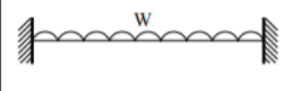
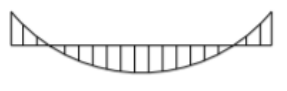
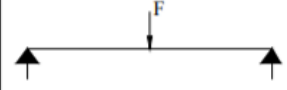
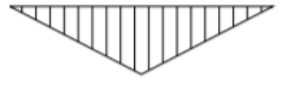
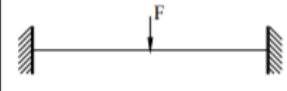

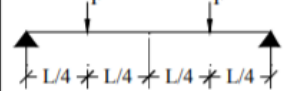
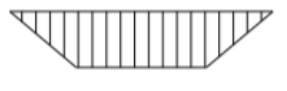
Tipo de cargas e condições de apoio	Diagrama de momentos	Valor de K	Valor dos factores		
			C1	C2	C3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Figura 9.44 Valores dos factores C1, C2 e C3 e valores correspondentes do factor K.

O cálculo do momento crítico M_{cr} encontra-se indicado na tabela 9.43.

Tabela 9.43 Determinação do momento crítico.

Perfil	Barra	L (m)	$l_{cr,z}$ (m)	k_z	k_w	C1	C2	z_g (mm)	M_{cr} (kN.m)
IPE 120	1316	4,1	2,05	1,0	1,0	1,132	0,459	-60	22,73

A verificação da segurança à encurvadura lateral está sumarizada na tabela 9.44 onde se indicam todos os parâmetros necessários à determinação de $M_{b,Rd}$.

Tabela 9.44 Verificação da segurança à encurvadura lateral na barra 1316.

Perfil	Barra	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,rd}$ (KN.m)	$M_{y,Ed} / M_{b,Rd}$
IPE 120	1316	22,73	0,86	0,21	0,76	12,72	0,46

- Determinação do momento crítico a partir do *software* “LTBeam”

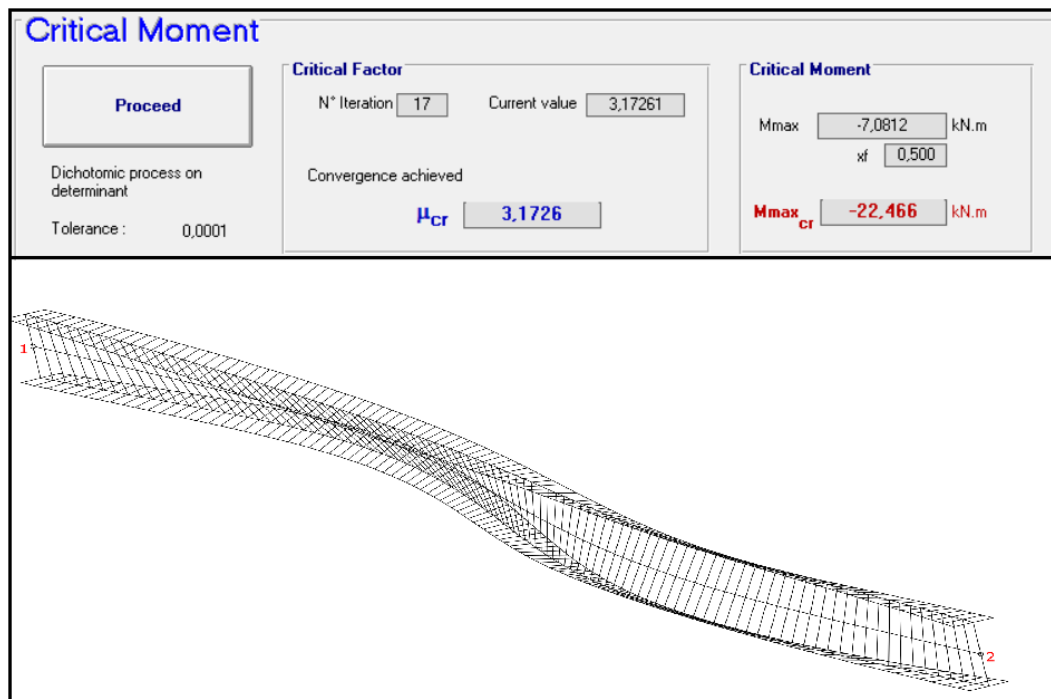


Figura 9.45 Cálculo do momento crítico no *software* “LTBeam” e deformada 3D.

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral a partir do *software* “A3C 2.93”

- Member resistance - Lateral torsional buckling

LTB is calculated by using:	EN 1993-1-1 § 6.3.2.2
LT buckling curve:	a
Imperfection factor	$\alpha_{LT} = 0,21$
Limit relative slenderness:	$\lambda_{LT,0} = 0,2$
Criterion (Segment 2):	$\Gamma_{LT,max} = 0,442 < 1 \Rightarrow \text{Satisfied}$
Segment 1 (Between restraints No. 1 & 2)	
Buckling length:	$L_{cr,z} = 2,05 \text{ m}$
Factors C_i	$C_1 = 1,312$
	$C_2 = 0,13$
Elastic critical moment for lateral-torsional buckling calculated by using the usual formula of M_{cr}	$M_{cr} = 22,316 \text{ kNm}$
Non-dimensional slenderness	$\lambda_{LT} = 0,983 > \lambda_{LT,0}$
Reduction factor	$\chi_{LT} = 0,678$
Correction factor	$k_c = 0,873$
Factor f	$f = 0,941$
Reduction factor modified	$\chi_{LT,mod} = 0,72$
LTB resistance	$M_{b,Rd} = 15,525 \text{ kNm}$
Criterion	$\Gamma_{LT} = 0,442 < 1 \Rightarrow \text{Satisfied}$

Figura 9.46 Resistência à encurvadura lateral no *software* “A3C 2.93”.

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral no software “Semi-Comp+”

SEMICOMP Member Check

Choose method for member check

Method 2 (EN 1993-1-1 Annex B)

Choose method for cross-section resistance

EN 1993-1-1:2010-12

Perform member design check

Section classification for member design check (based on 1. order cross-section forces)

Reference values for classification in the worst section along the member

$c/t_w = 21,227$	$\alpha_{web} = 0,500$	$\psi_{web} = -1,000$	$\varepsilon = 0,924$
$c/t_f = 3,619$	$\alpha_{flange} = 1,000$	$\psi_{flange} = 1,000$	

Boundaries	Class 1	Class 2	Class 3
$c/t_w \leq c/t_{w,max}$	66,558	76,727	114,628
$c/t_f \leq c/t_{f,max}$	8,320	9,244	12,730

Member class = 1

Note: This tool is only applicable to Class 1 to 3. For Class 4 elastic cross-section values are used for all calculations. The user should check if parts of member are Class 4 in the “Additional info”-sheet.

Member Check

$N_{Rd} = 363,281$ kN $M_{y,Rd} = 16,699$ kNm $M_{z,Rd} = 3,735$ kNm	$M_{pl,y,Rd} = 16,699$ kNm $M_{pl,z,Rd} = 3,735$ kNm $M_{el,y,Rd} = 14,564$ kNm $M_{el,z,Rd} = 2,378$ kNm	$N_{Ed} = 0,000$ kN $M_{y,Ed,max} = 5,850$ kNm $M_{z,Ed,max} = 0,000$ kNm
--	--	---

<p><i>Strong axis buckling</i></p> $L_{cr,y} = 4,100$ m $N_{cr,y} = 391,779$ kN $\alpha_y = 0,21$ [-] $\lambda_y = 0,963$ [-] $\chi_y = 0,691$ [-]	<p><i>Weak axis buckling</i></p> $L_{cr,z} = 2,050$ m $N_{cr,z} = inf.$ kN $\alpha_z = 0,34$ [-] $\lambda_z = 0,000$ [-] $\chi_z = 1,000$ [-]	<p><i>Lateral torsional buckling</i></p> $M_{cr} = 22,730$ kNm $\alpha_{LT} = 0,34$ [-] $\lambda_{LT} = 0,857$ [-] $\chi_{LT,mod} = 0,821$ [-] $f_{mod} = 0,956$ [-]
--	---	--

EN 1993-1-1, 6.3.3

Uniform member in bending and axial compression

<p>Eq. (6.61): $U = 0,000 \leq 1,0$ ok</p> <p>Eq. (6.62): $U = 0,000 \leq 1,0$ ok</p>	<p><i>Global interaction factors</i></p> $k_{yy} = 0,000$ $k_{yz} = 0,000$ $k_{zy} = 0,000$ $k_{zz} = 0,000$
---	---

Cross-section check at each end of the member

<p>Left end: $U = 0,350 \leq 1,0$ ok</p> <p>Right end: $U = 0,000 \leq 1,0$ ok</p>	<p>$UF = 0,350$</p> <p>$UF = 0,000$</p>
--	---

Additional member checks

EN 1993-1-1, 6.3.1

Strong axis flexural buckling check

Eq. (6.46): $N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,000 \leq 1,0$ ok

Weak axis flexural buckling check

Eq. (6.46): $N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,000 \leq 1,0$ ok

EN 1993-1-1, 6.3.2

Lateral torsional buckling

Eq. (6.54): $M_{Ed}/M_{b,Rd} = 0,427 \leq 1,0$ ok

Figura 9.47 Resistência do elemento à encurvadura lateral a partir do “SemiComp+”.

- Comparação de resultados

Tabela 9.45 Resistência da secção transversal - barra 1316.

Resistência da secção transversal				
Esforço		Folha de Cálculo	Semicomp+	Desvio
Esforço Transverso	$V_{z,Rd}$ (kN)	100,18	100,11	0,07
Esforço Transverso	$V_{y,Rd}$ (kN)	128,03	128,03	0
Flexão	$M_{y,Rd}$ (kN.m)	16,70	16,70	0
Flexão	$M_{z,Rd}$ (kN.m)	3,73	3,73	0
Rácio	Flexão Desviada	0,16	0,16	0

Tabela 9.46 Resistência do elemento à encurvadura lateral - barra 1316.

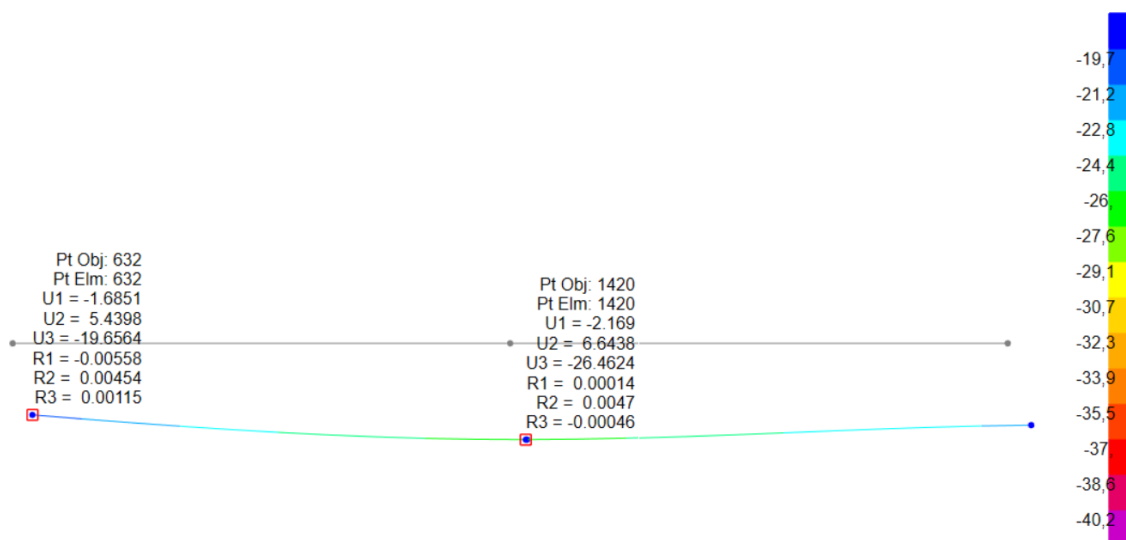
Resistência do elemento à encurvadura lateral					
Parâmetro	Folha de Cálculo	A3C	LTBeam	Semicomp+	Desvio (%)
M_{cr}	22,73	22,316	22,47	-	1,82
$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}$	0,46	0,44	-	0,43	6,52

Verifica-se que os desvios entre os diferentes métodos utilizados no dimensionamento das madres da cobertura são pouco expressivos, e que a utilização de perfis IPE 120 é suficiente para garantir os critérios de dimensionamento aos estados limites últimos.

Dimensionamento das madres de cobertura aos Estados Limites de Serviço

As madres da cobertura funcionam sobre apoios elásticos materializados pelas asnas, razão pela qual se seguiu o mesmo raciocínio do utilizado nas vigas de travamento entre asnas na verificação da segurança em relação os estados limites de serviço (determinação da flecha máxima admissível).

Na figura 9.48 apresentam-se os deslocamentos máximos nos nós da madre em estudo.

**Figura 9.48** Flecha vertical na madre 1316.

Na tabela 9.47 resumem-se as verificações realizadas para a verificação das deformações. O deslocamento vertical máximo admissível relativo é $\delta_{adm,rel} = L/200$.

Tabela 9.47 Verificação da flecha relativa para a madre 1316.

Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
757	ELS.SC_COB_PR2A_Wx3 (T-)	4,107	20,54	6,80	0,33

Pelos resultados da tabela 9.47 conclui-se que se encontra satisfeito o critério de verificação aos estados limites de serviço nas madres da cobertura.

9.1.6 Dimensionamento dos travamentos ao nível dos cordões inferiores das asnas

Os travamentos em Cruz de Santo André, colocados nas barras dos cordões das asnas, têm a função de garantir a estabilidade global da estrutura da cobertura e funcionam essencialmente com esforços de tração e de compressão. A figura 9.49 identifica e localiza estas barras.

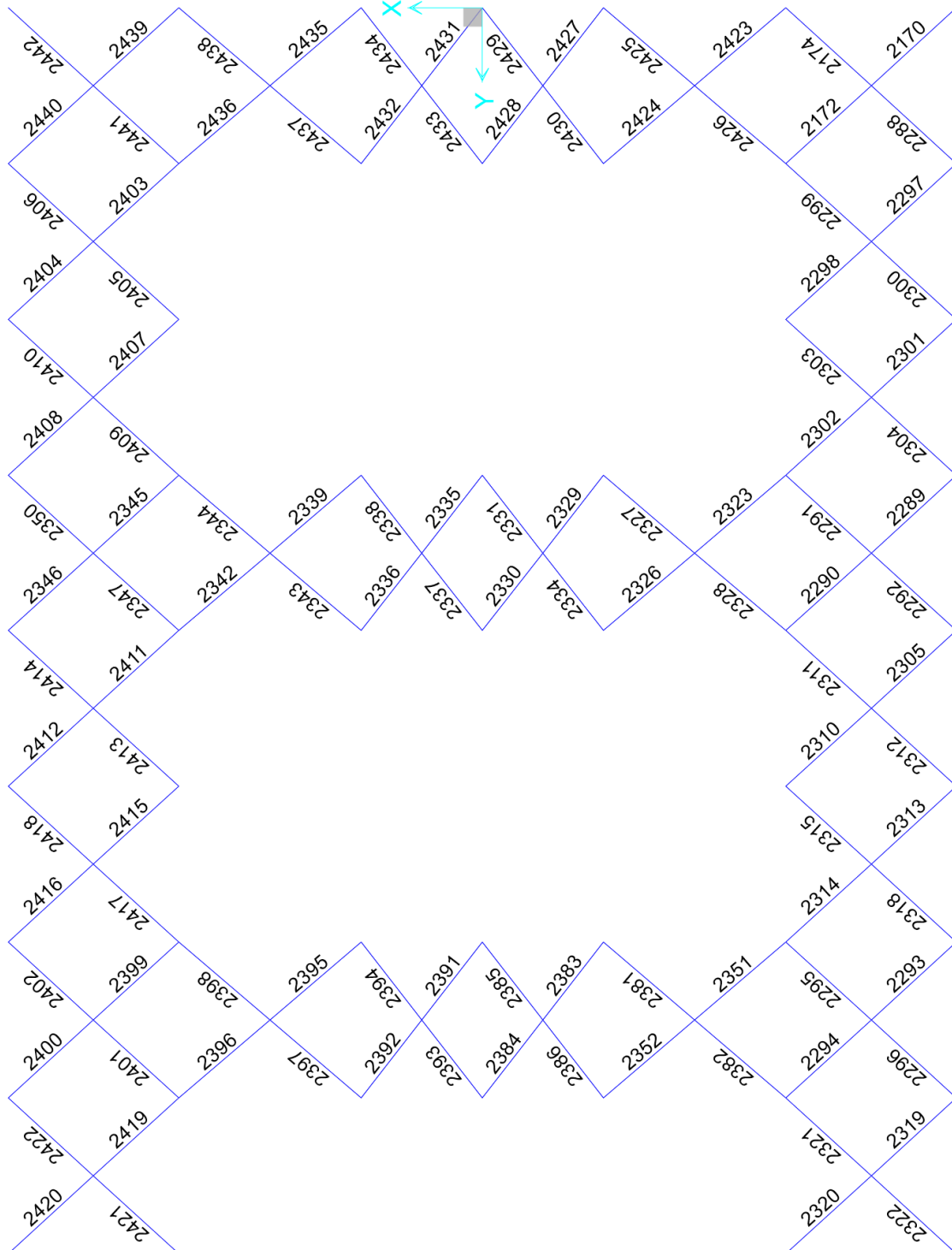


Figura 9.49 Identificação das barras dos travamentos inferiores.

Identificaram-se três grupos de barras que se diferenciam entre si pelo fato de apresentarem diferentes comprimentos de encurvadura, conforme se mostra na figura 9.50.

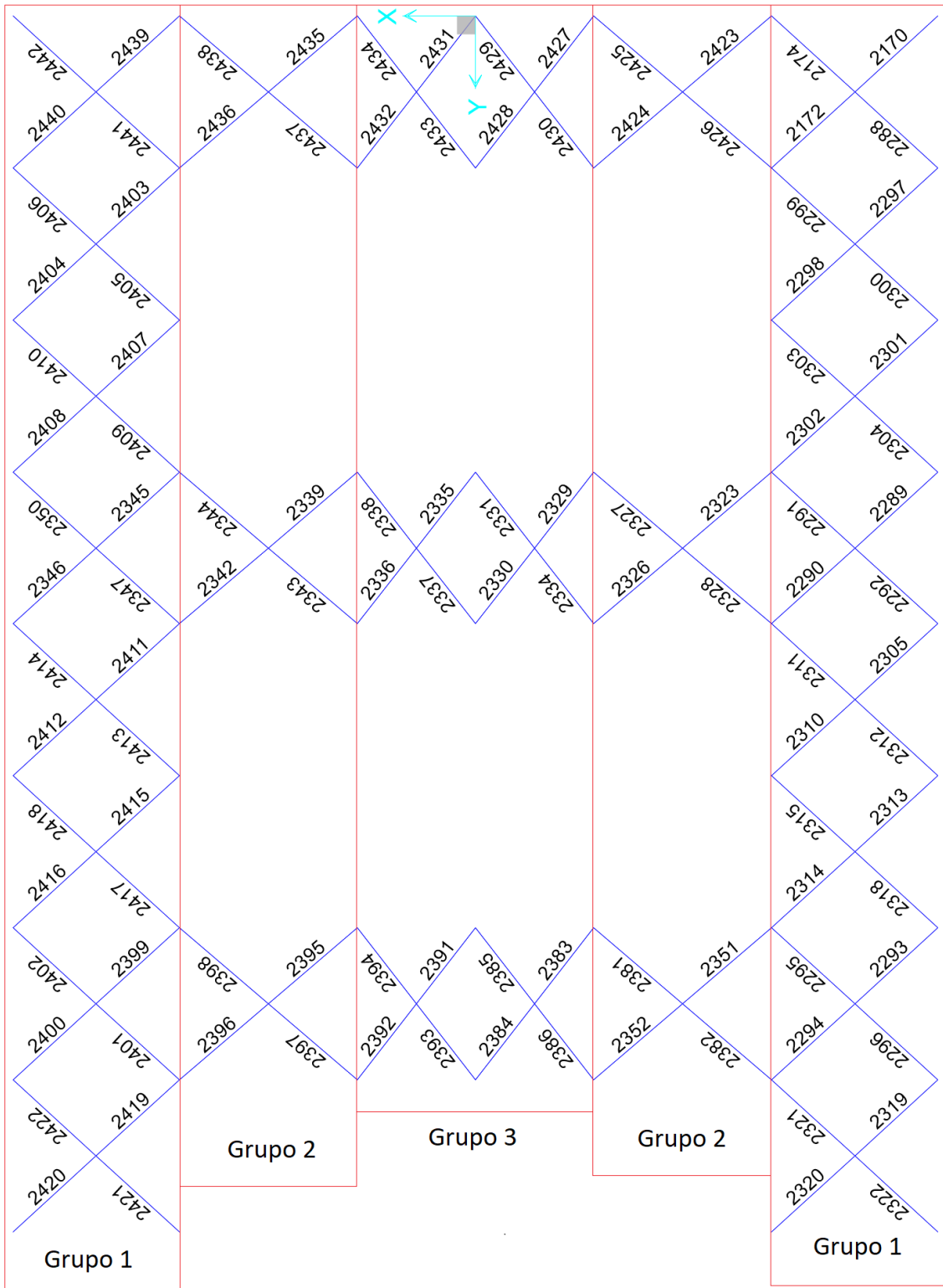


Figura 9.50 Identificação dos grupos de barras.

Tabela 9.48 Comprimentos de Encurvadura para cada um dos grupos.

Comprimento de Encurvadura	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
l_{cr} (m)	6,09	6,32	5,21

Na tabela 9.49 indicam-se os esforços máximos de compressão e de tração para as combinações mais desfavoráveis nas barras mais solicitadas de cada um dos grupos.

Tabela 9.49 Esforços axiais máximos nas barras.

Grupo	Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
Grupo 1	2410	Compressão	ELU.ET1y_PR1B	66,591
Grupo 1	2412	Tração	ELU.ET1y_PR1B	82,477
Grupo 2	2426	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	61,489
Grupo 2	2351	Tração	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	87,915
Grupo 3	2337	Compressão	ELU2.Wy_PR1B (T-)	25,452
Grupo 3	2336	Tração	ELU.ET1y_PR1B	33,658

A metodologia adotada na verificação da resistência aos Estados Limites Últimos destas barras passou pela identificação das barras mais esforçadas em cada um dos grupos e, posteriormente, proceder à verificação da resistência das secções transversais e da encurvadura por compressão.

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.50 Verificação da resistência das secções transversais

Barra	Esforço	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
2410	Compressão	CHS 101.6 x 5	66,591	418,00	0,16
2412	Tração	CHS 101.6 x 5	82,477	418,00	0,20
2426	Compressão	CHS 101.6 x 5	61,489	418,00	0,15
2351	Tração	CHS 101.6 x 5	87,915	418,00	0,21
2337	Compressão	CHS 60.3 x 5	25,452	327,25	0,08
2336	Tração	CHS 60.3 x 5	33,658	327,25	0,10

Tabela 9.51 Verificação da resistência das barras à encurvadura por compressão.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L_{cr}	λ	χ	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd}$ (kN)
2410	CHS 101.6 x 5	66,591	6,09	178,07	0,21	88,89	0,75
2426	CHS 101.6 x 5	61,489	6,32	184,80	0,20	82,97	0,74
2337	CHS 60.3 x 5	25,452	5,21	274,21	0,09	30,68	0,83

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”

Barra 2410

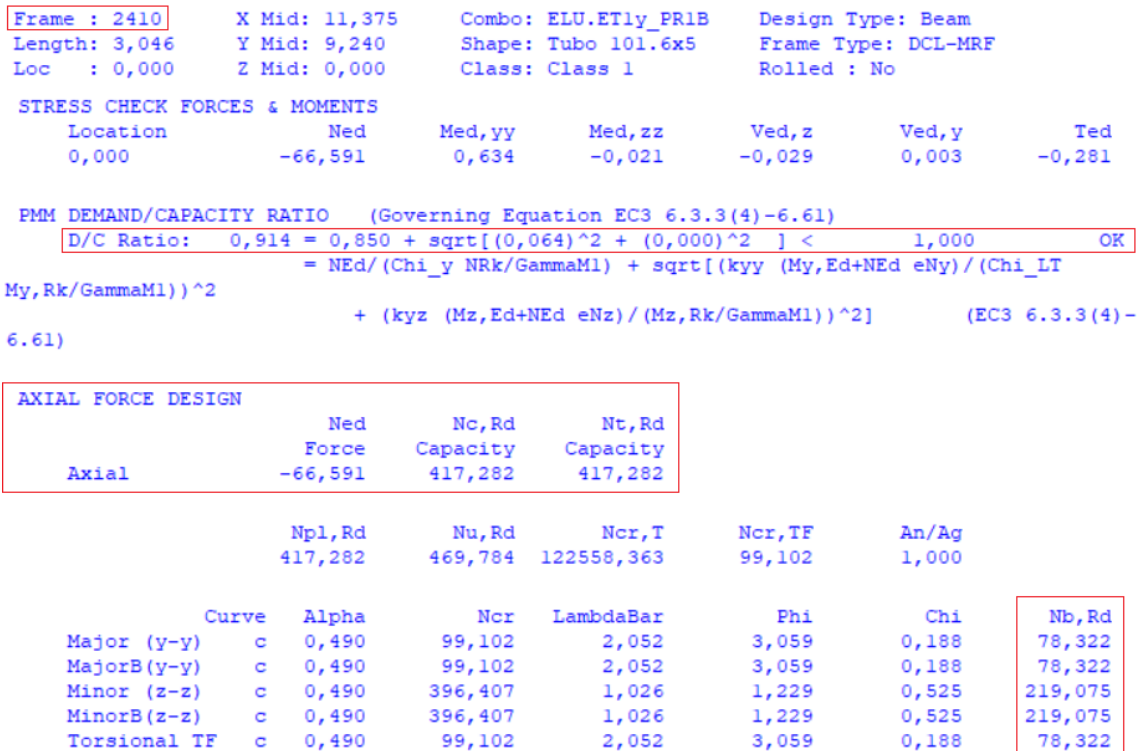


Figura 9.51 Verificação da segurança na barra 2410.

Barra 2337

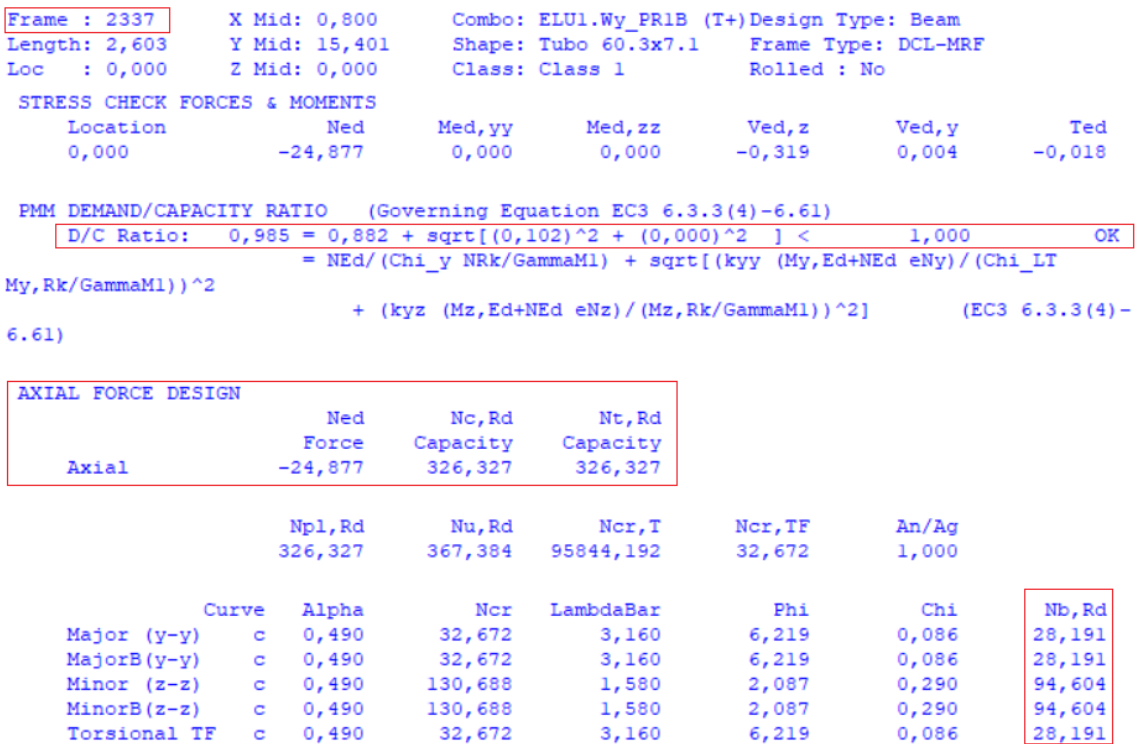


Figura 9.52 Verificação da segurança na barra 2337.

- Comparação de resultados

Tabela 9.52 Comparação dos resultados para os dois procedimentos.

Resistência	Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	2410	N_{Rd} (kN)	418,00	417,28	0,17
Elemento	2410	$N_{b,Rd}$ (kN)	88,89	78,32	13,50
Secção Transversal	2337	N_{Rd} (kN)	327,25	326,33	0,28
Elemento	2337	$N_{b,Rd}$ (kN)	30,68	28,19	8,85

As diferenças na resistência à encurvadura por compressão nas barras 2410 e 2337 devem-se à utilização de diferentes curvas de encurvadura pelo *software* “SAP2000”.

9.1.7 Dimensionamento dos travamentos ao nível dos cordões superiores das asnas

Na figura 9.53 encontram-se identificadas as barras destes travamentos.

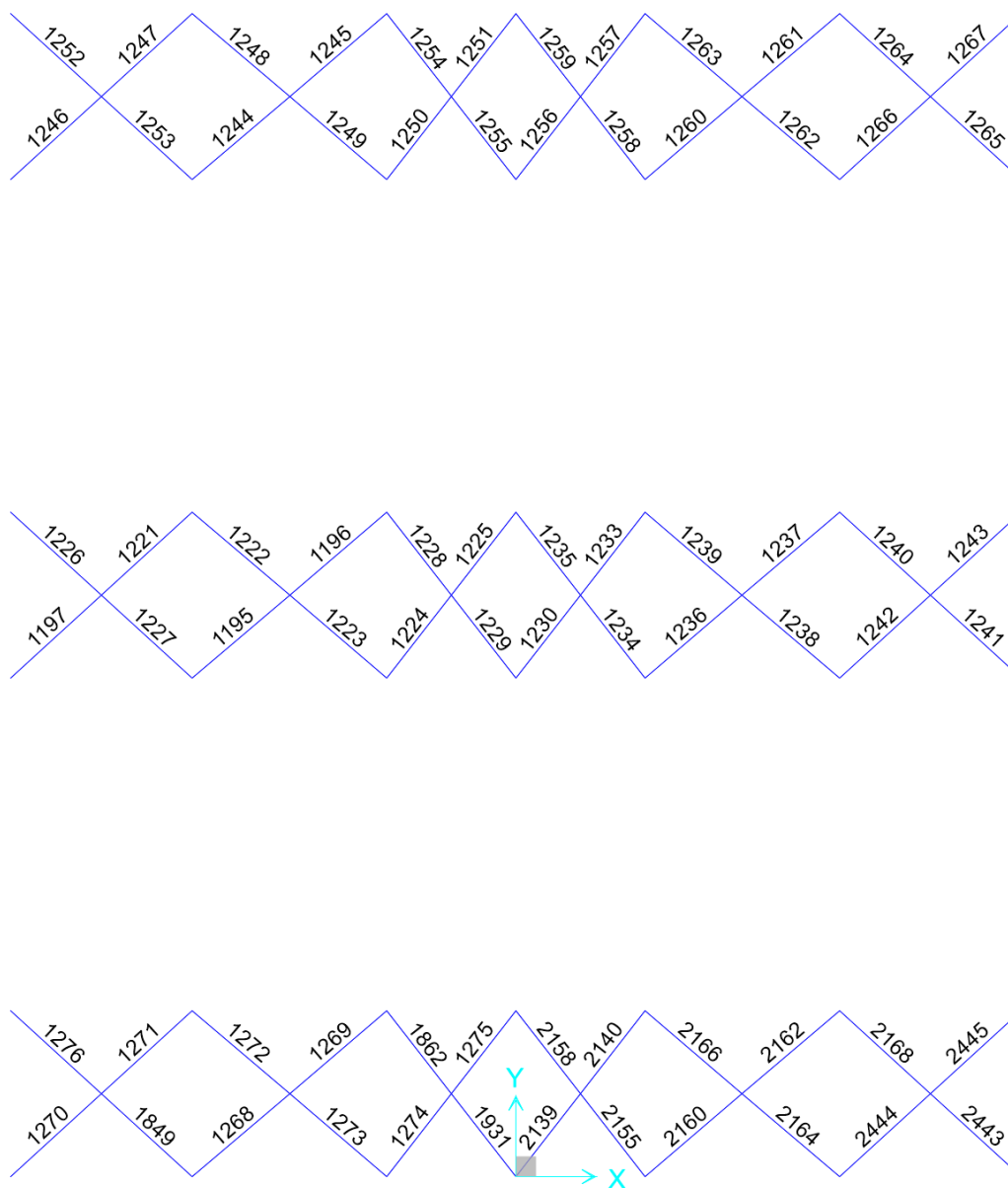


Figura 9.53 Identificação das barras dos travamentos.

Analogamente ao procedimento adotado no dimensionamento dos travamentos inferiores das asnas, consideraram-se também três grupos diferentes de barras, cujos comprimentos se encontram apresentados na tabela 9.53.

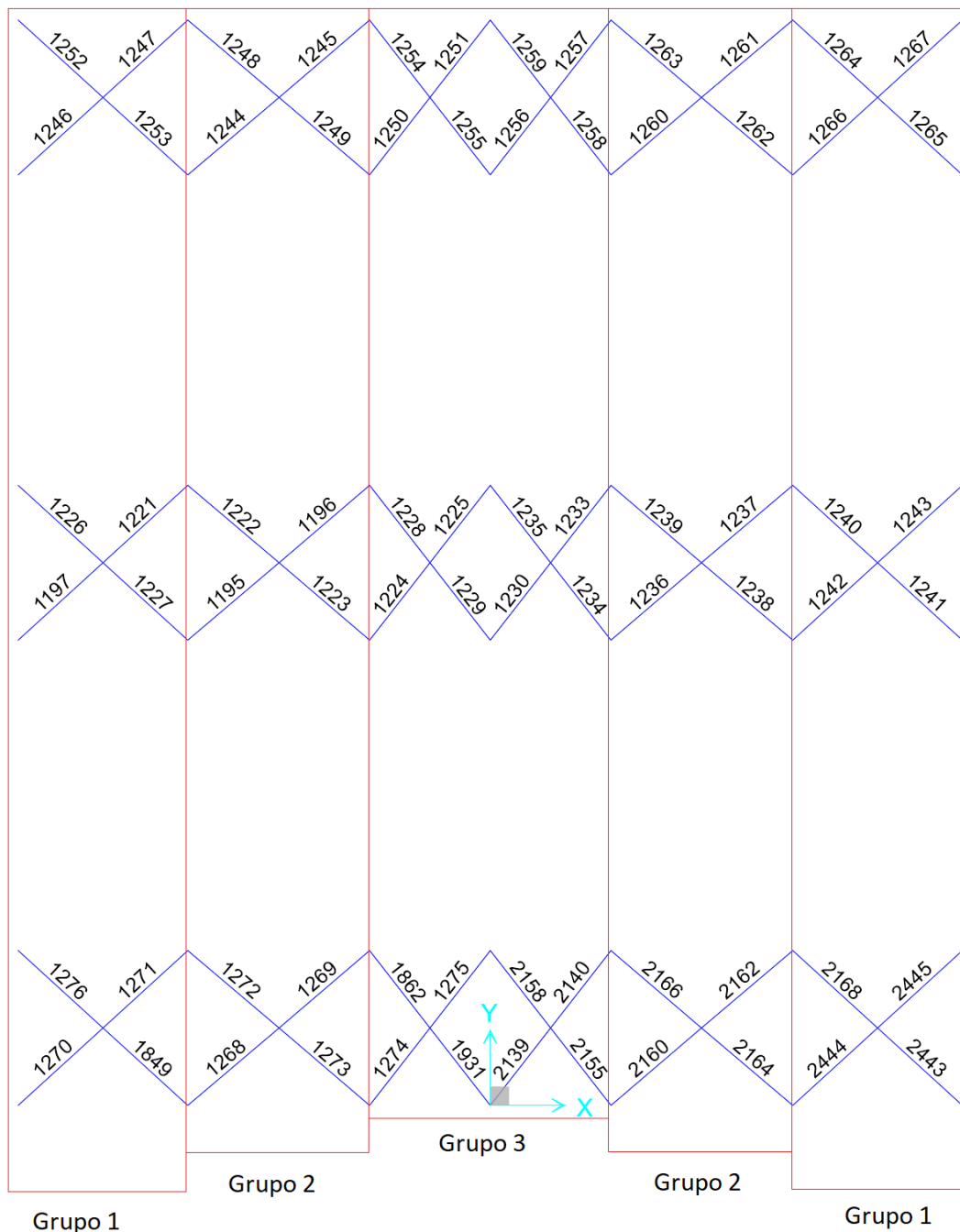


Figura 9.54 Identificação dos grupos de barras.

Tabela 9.53 Comprimentos de Encurvadura para cada um dos grupos.

Comprimento de encurvadura	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
l_{cr} (m)	6,13	6,35	5,23

Na tabela 9.54 indicam-se os esforços máximos de compressão e de tração nas barras mais esforçadas de cada um dos grupos, bem como as combinações mais desfavoráveis.

Tabela 9.54 Esforços axiais máximos nas barras dos diferentes grupos.

Grupo	Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
Grupo 1	1252	Compressão	ELU1. (T+) _PR1A_ Wx3	13,663
Grupo 1	1849	Tração	ELU2. (T+) _PR2B_ Wy	12,591
Grupo 2	1222	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	79,988
Grupo 2	1196	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	64,798
Grupo 3	1228	Compressão	ELU1.SC_COB_PR1B_Wx3 (T+)	26,899
Grupo 3	1225	Tração	ELU2.Wy_PR1B (T-)	24,923

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.55 Verificação da resistência das secções transversais.

Barra	Esforço	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
1252	Compressão	CHS 76.1 x 3.2	13,663	201,58	0,07
1849	Tração	CHS 76.1 x 3.2	12,591	201,58	0,06
1222	Compressão	CHS 114.3 x 3.6	79,988	344,30	0,23
1196	Tração	CHS 114.3 x 3.6	64,798	344,30	0,19
1228	Compressão	CHS 76.1 x 3.2	26,899	201,58	0,13
1225	Tração	CHS 76.1 x 3.2	24,923	201,58	0,12

Tabela 9.56 Verificação da resistência dos elementos à encurvadura por compressão.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L_{cr}	λ	χ	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd}$ (kN)
1252	CHS 76.1 x 3.2	13,663	6,13	237,60	0,12	24,89	0,55
1222	CHS 114.3 x 3.6	79,988	6,35	153,01	0,28	86,19	0,93
1228	CHS 76.1 x 3.2	26,899	5,23	202,71	0,17	33,64	0,80

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”

Barra 1222

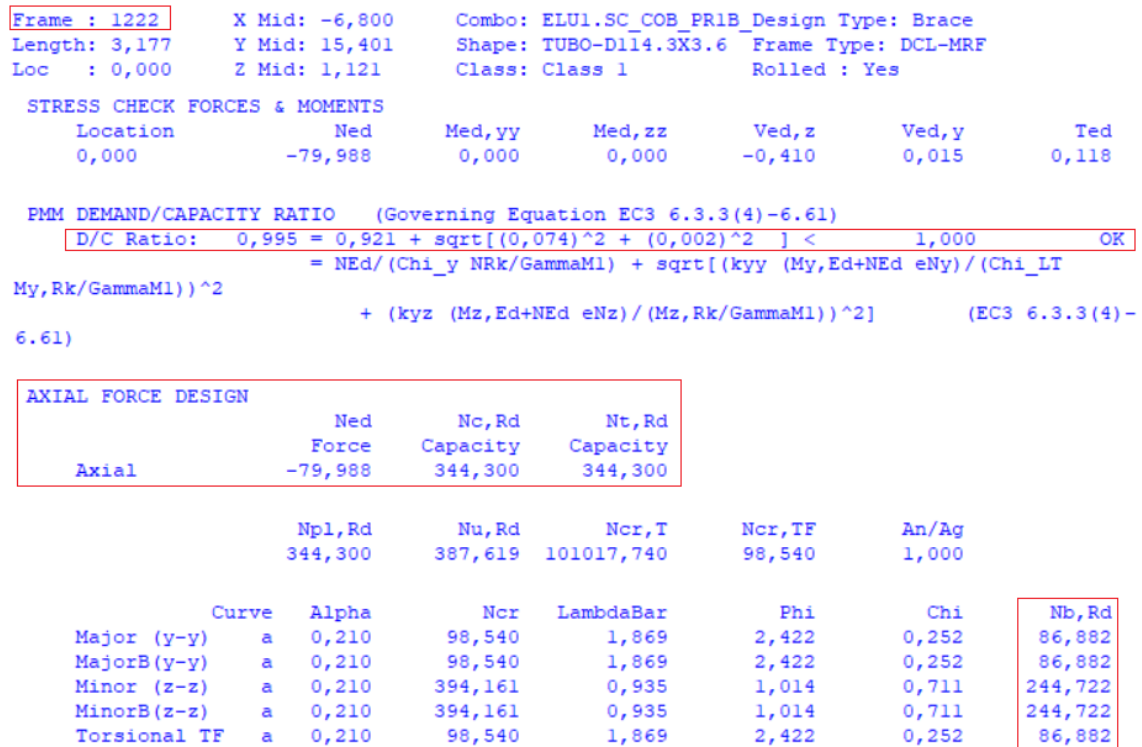


Figura 9.55 Verificação da segurança na barra 1222.

Barra 1228

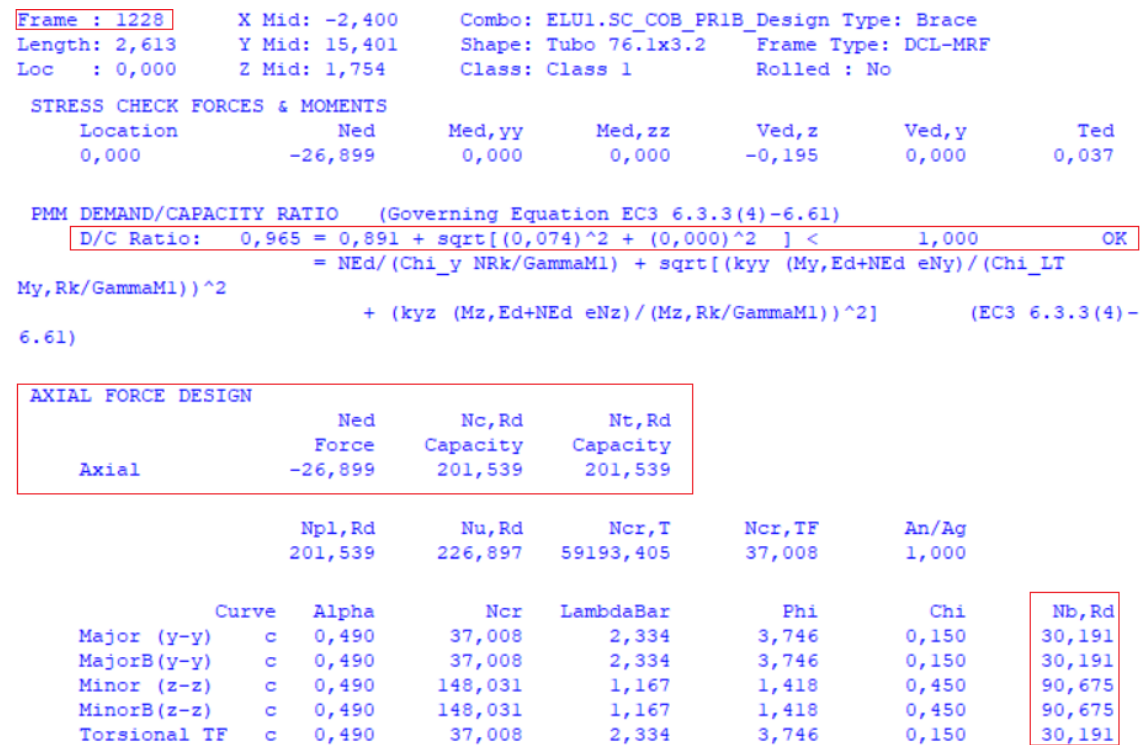


Figura 9.56 Verificação da segurança na barra 1228.

- Comparação de resultados

Tabela 9.57 Comparação dos resultados em ambos os procedimentos.

Resistência	Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	1252	N_{Rd} (kN)	344,30	344,30	0,00
Elemento	1252	$N_{b,Rd}$ (kN)	86,19	86,88	0,79
Secção Transversal	1228	N_{Rd} (kN)	201,58	201,54	0,02
Elemento	1228	$N_{b,Rd}$ (kN)	33,64	30,19	11,43

9.1.8 Dimensionamento das diagonais das madres dos alçados laterais.

O dimensionamento destas barras foi efetuado para a barra mais esforçada indicada na figura 9.57.

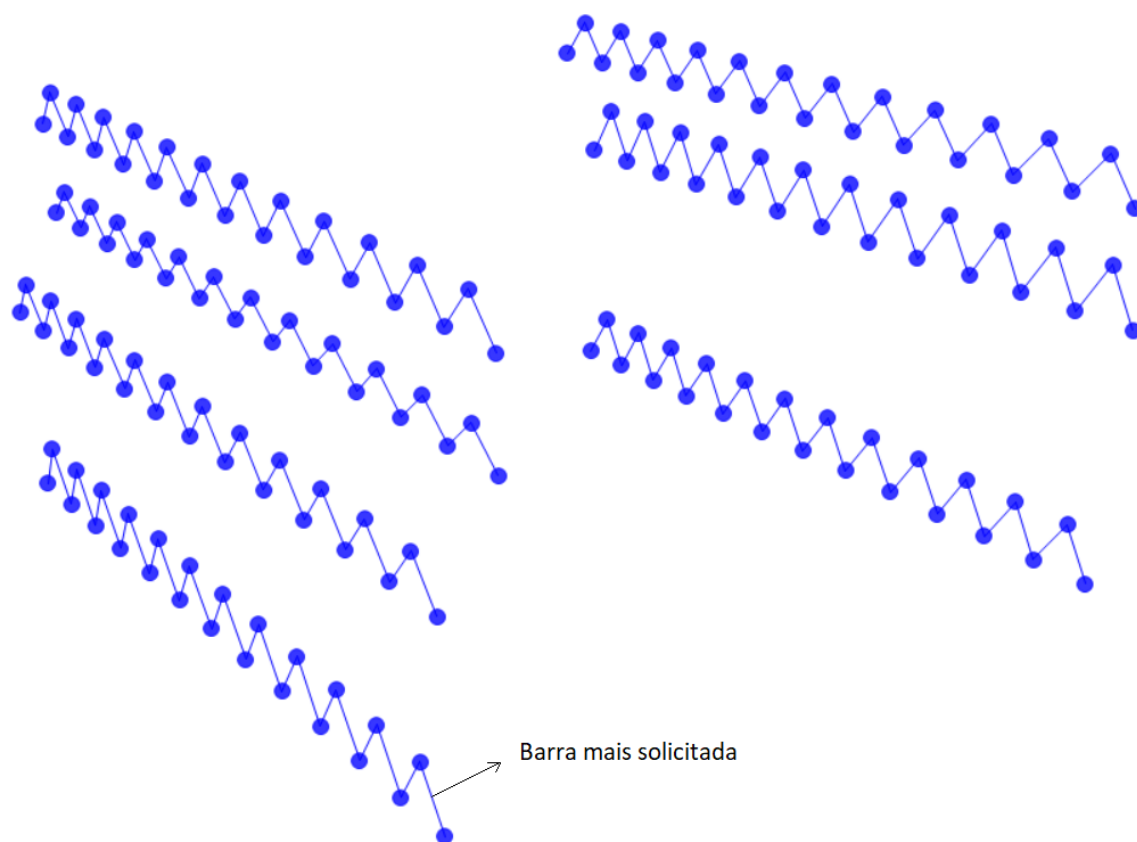


Figura 9.57 Identificação da barra mais solicitada.

Na tabela 9.58 indicam-se os esforços axiais de cálculo para a barra mais esforçada, assim como a combinação condicionante.

Tabela 9.58 Esforços de cálculo na barra mais esforçada.

Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
5453	Compressão	ELU.ET1y_PR2B	62,01
5453	Tração	ELU.ET1y_PR1A	52,84

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.59 Verificação da resistência das secções transversais.

Barra	Esforço	Perfil	Classe	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
5453	Compressão	CHS 60.3 x 4	1	62,01	194,43	0,32
5453	Tração	CHS 60.3 x 4	1	52,84	194,43	0,27

Tabela 9.60 Verificação da resistência à encurvadura por compressão.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L_{cr}	λ	χ	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd}$ (kN)
5453	CHS 60.3 x 4	62,01	2,38	119,00	0,43	84,07	0,74

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”.

```

Frame : 5453      X Mid: -14,820      Combo: ELU.ETly_PR2B      Design Type: Brace
Length: 2,378    Y Mid: 1,143          Shape: Tubo 60.3x4        Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0,000      Z Mid: -15,953       Class: Class 1           Rolled : No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
Location      Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y      Ted
0,000         -62,009   0,000       0,000       -0,035     0,000     -0,035

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
D/C Ratio:    0,896 = 0,886 + sqrt[(0,010)^2 + (0,000)^2 ] < 1,000      OK
              = Ned/(Chi_y NRk/GammaM1) + sqrt[(kyy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT
My,Rk/GammaM1))^2
              + (kyz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1))^2]      (EC3 6.3.3(4)-
6.61)

AXIAL FORCE DESIGN
      Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
      Force  Capacity  Capacity
Axial  -62,009   194,559   194,559

      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T      Ncr,TF      An/Ag
      194,559     219,038     57143,154   103,297     1,000

      Curve  Alpha      Ncr      LambdaBar      Phi      Chi      Nb,Rd
Major (y-y)  c  0,490     103,297     1,372     1,729     0,360     69,970
MajorB(y-y)  c  0,490     103,297     1,372     1,729     0,360     69,970
Minor (z-z)  c  0,490     103,297     1,372     1,729     0,360     69,970
MinorB(z-z)  c  0,490     103,297     1,372     1,729     0,360     69,970
Torsional TF c  0,490     103,297     1,372     1,729     0,360     69,970

```

Figura 9.58 Dimensionamento da barra mais solicitada.

- Comparação de resultados

Tabela 9.61 Comparação dos resultados.

Resistência	Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	5453	N_{Rd} (kN)	194,43	194,56	0,07
Elemento	5453	$N_{b,Rd}$ (kN)	84,07	69,97	20,15

9.1.9 Dimensionamento dos tarugos das madres dos alçados laterais.

O dimensionamento dos tarugos foi feito para a barra mais solicitada, indicada na figura 9.59.

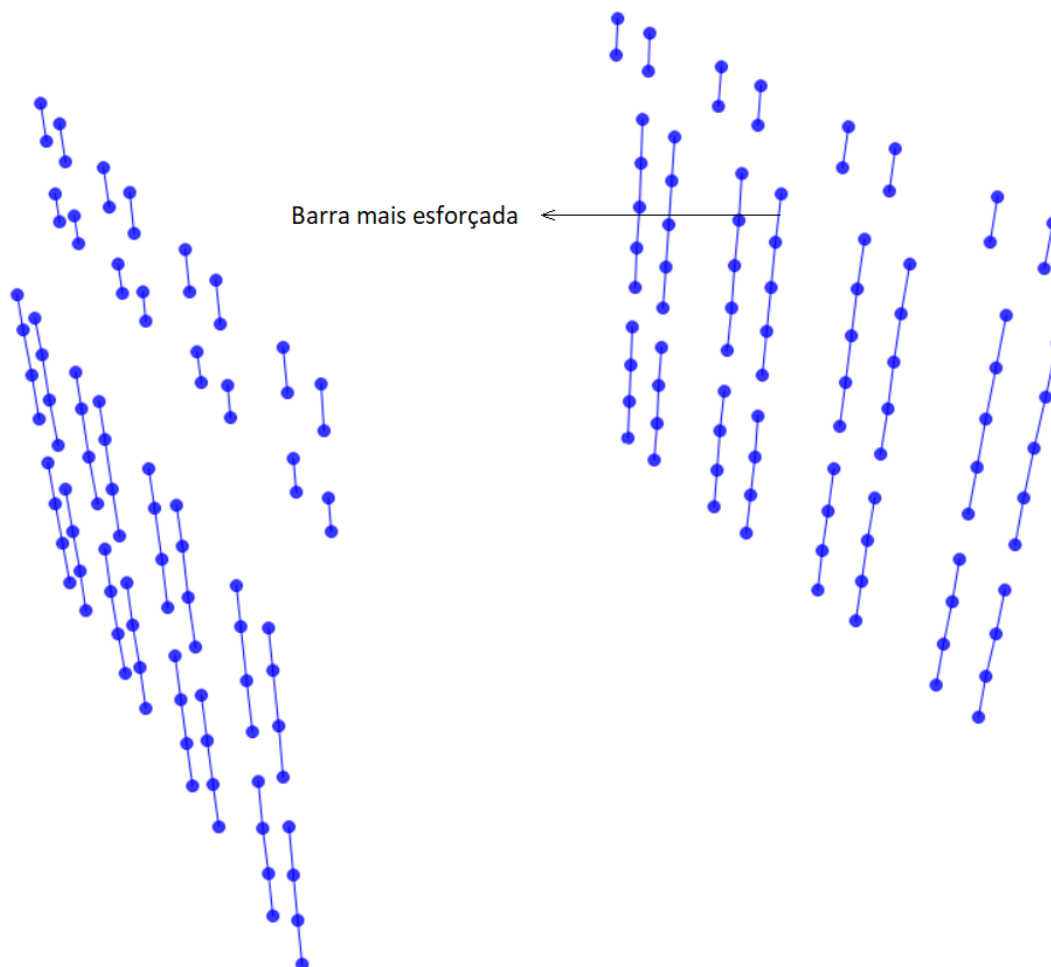


Figura 9.59 Identificação do tarugo mais esforçado.

Os esforços axiais de cálculo considerados no dimensionamento dos tarugos estão indicados na tabela 9.62.

Tabela 9.62 Esforços axiais de cálculo na barra mais esforçada.

Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
6385	Tração	ELU1. (T+)_PR2B_Wy	5,40

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.63 Verificação da resistência das secções transversais.

Barra	Esforço	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
6385	Tração	Varão \emptyset 10	5,40	21,60	0,25

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”

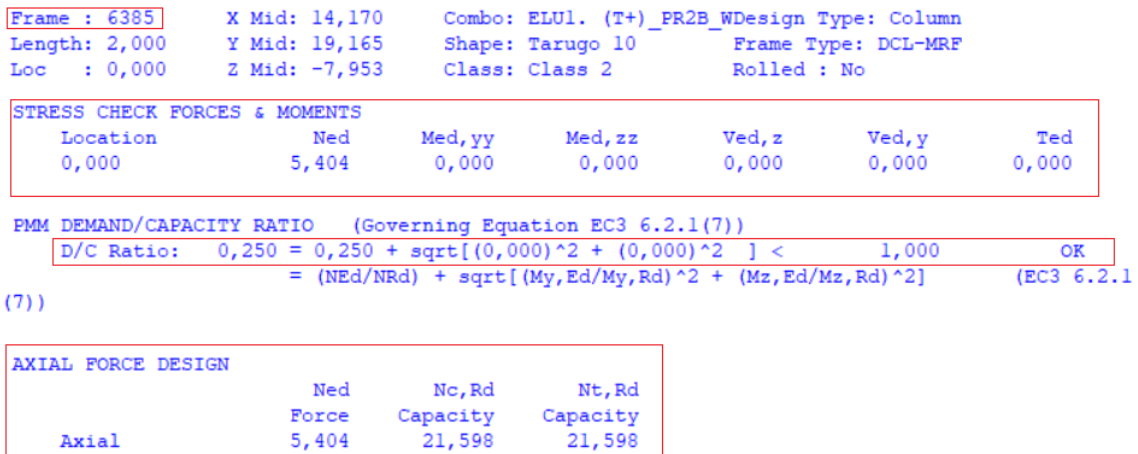


Figura 9.60 Verificação da segurança na barra 6385.

9.1.10 Dimensionamento das diagonais das madres dos alçados de topo

O dimensionamento destas barras foi realizado de um modo análogo às diagonais das vigas que formam as madres dos alçados laterais. Estas barras funcionam à tração ou à compressão, sendo os restantes esforços pouco significativos. As barras mais esforçadas deste grupo estão indicados na figura 9.61.

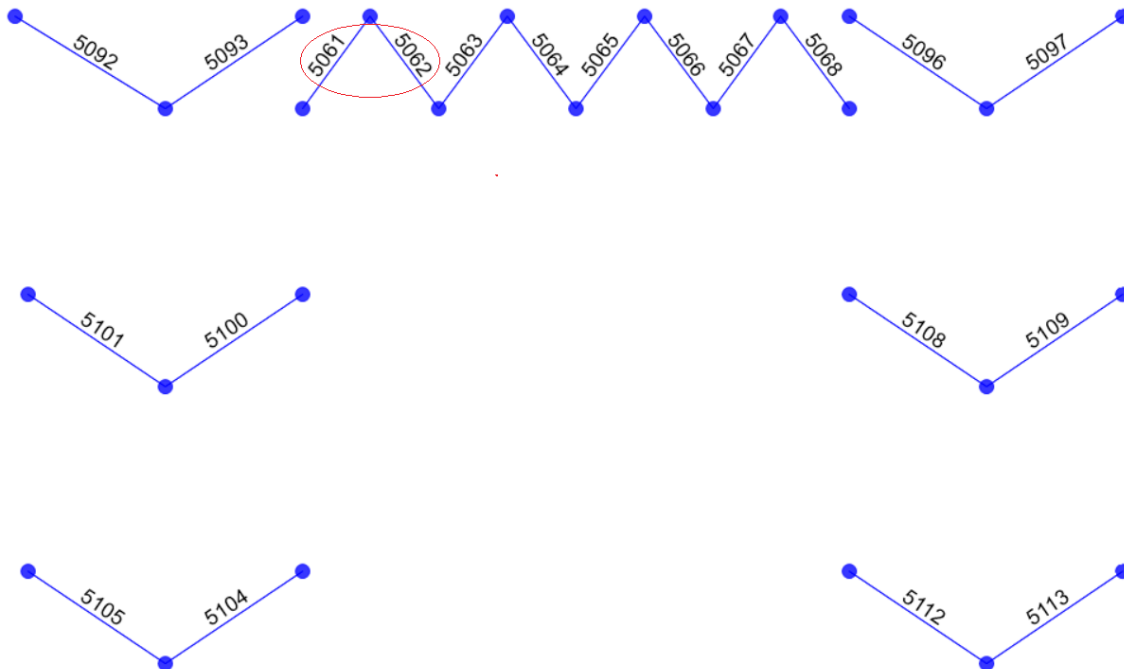


Figura 9.61 Barras mais esforçadas.

A informação seguinte indica os elementos necessários ao dimensionamento efetuado.

Tabela 9.64 Esforços axiais de cálculo nas barras mais solicitadas.

Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
5061	Compressão	ELU1.PR1A_Wxx2 (T+)	55,81
5062	Tração	ELU1.Wx1_PR1A (T-)	51,98

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.65 Verificação da resistência das secções transversais.

Barra	Esforço	Perfil	Classe	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
5061	Compressão	CHS 60.3 x 4	1	55,81	194,43	0,29
5062	Tração	CHS 60.3 x 4	1	51,98	194,43	0,27

Tabela 9.66 Verificação da resistência à encurvadura por compressão.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L_{cr}	λ	χ	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd}$ (kN)
5061	CHS 60.3 x 4	55,81	2,49	124,50	0,40	88,91	0,63

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”

```

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C
Frame : 5061      X Mid: -5,198      Combo: ELU1.PR1A_Wxx2 (TDesign Type: Brace
Length: 2,487    Y Mid: -0,660      Shape: Tubo 60.3x4      Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0,000      Z Mid: -5,953      Class: Class 1          Rolled : No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
Location      Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y      Ted
0,000         -55,809   0,000       0,000       -0,054     0,000     -5,010E-04

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
D/C Ratio: 0,868 = 0,853 + sqrt[(0,015)^2 + (0,000)^2] < 1,000 OK
              = Ned/(Chi_y NRk/GammaM1) + sqrt[(kyy (My,Ed+NED eNy)/(Chi_LT
My,Rk/GammaM1))^2
              + (kyz (Mz,Ed+NED eNz)/(Mz,Rk/GammaM1))^2] (EC3 6.3.3(4)-
6.61)

AXIAL FORCE DESIGN
              Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
              Force   Capacity   Capacity
Axial        -55,809   194,559   194,559

              Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T      Ncr,TF      An/Ag
              194,559   219,038   57143,154  94,411     1,000

              Curve  Alpha      Ncr      LambdaBar      Phi      Chi      Nb,Rd
Major (y-y)    c  0,490     94,411     1,436     1,833     0,336     65,441
MajorB(y-y)   c  0,490     94,411     1,436     1,833     0,336     65,441
Minor (z-z)   c  0,490     94,411     1,436     1,833     0,336     65,441
MinorB(z-z)   c  0,490     94,411     1,436     1,833     0,336     65,441
Torsional TF  c  0,490     94,411     1,436     1,833     0,336     65,441

```

Figura 9.62 Verificação da segurança na barra 5061.

- Comparação de resultados

Tabela 9.67 Comparação dos resultados.

Resistência	Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	5061	N_{Rd} (kN)	194,43	194,56	0,07
Elemento	5061	$N_{b,Rd}$ (kN)	88,91	65,44	35,86

9.1.11 Dimensionamento dos tarugos das madres dos alçados de topo

O dimensionamento dos tarugos nas madres dos alçados de topo foi efetuado para o alçado Norte por apresentar os esforços mais desfavoráveis. Na figura 9.63 encontram-se indicadas as barras mais solicitadas.

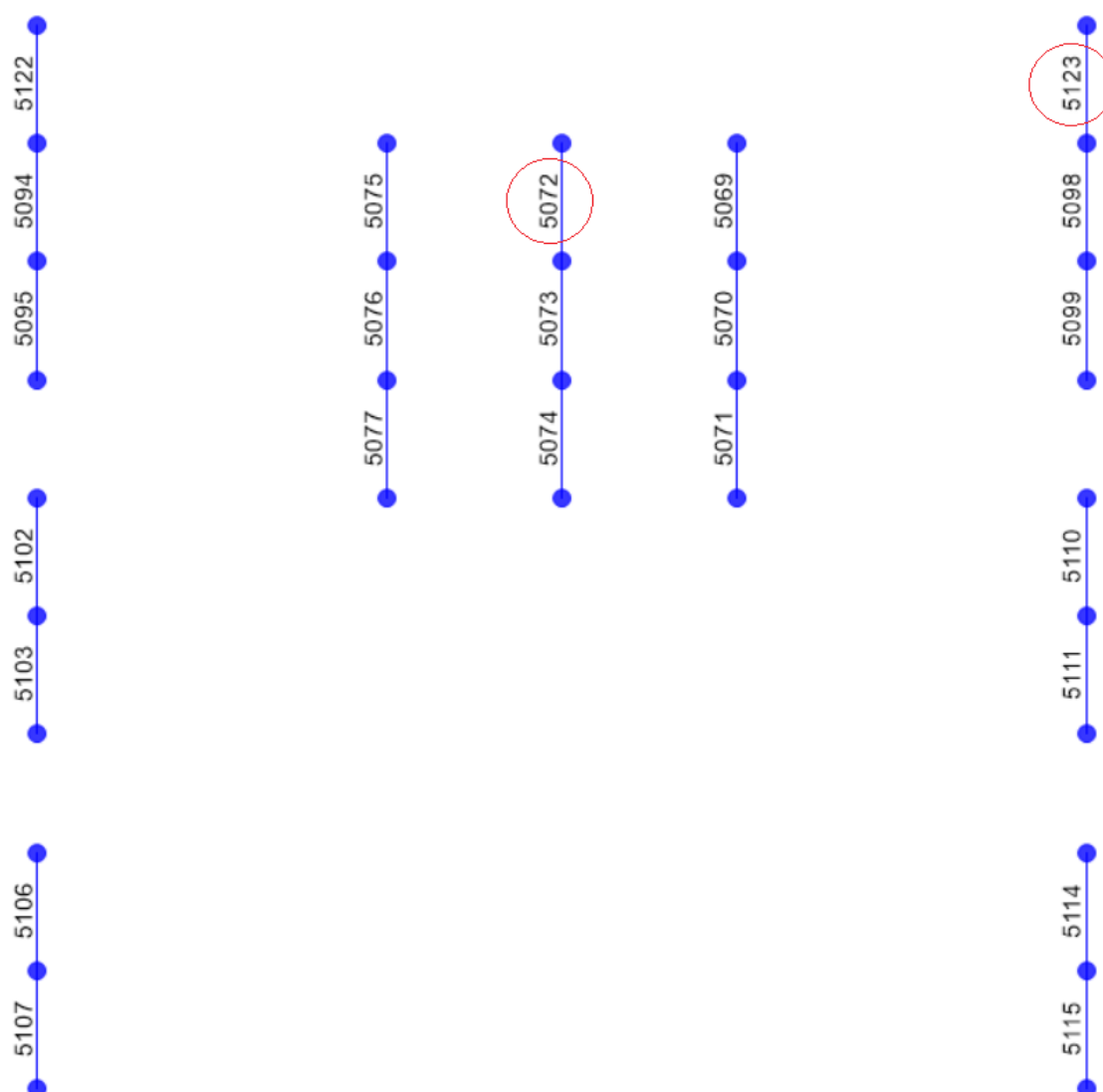


Figura 9.63 Identificação das barras mais esforçadas.

As barras 5122 e 5123 encontram-se sujeitas fundamentalmente a esforços de compressão funcionando estas barras como escoras. As restantes barras foram dimensionadas como tirantes. Os esforços de cálculo destas barras encontram-se indicados na tabela 9.68.

Tabela 9.68 Esforços axiais de cálculo nas barras mais esforçadas.

Frame Label	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
5123	Compressão	ELU1.Wx1_PR1A (T-)	4,946
5072	Tração	ELU1. (T+)_PR2B_Wx3	20,116

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.69 Verificação da resistência das secções transversais.

Barra	Esforço	Perfil	Classe	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
5123	Compressão	CHS 60.3 x 4	1	4,946	194,43	0,03
5072	Tração	Varão \emptyset 10	2	20,116	21,60	0,93

Tabela 9.70 Verificação da resistência dos elementos à encurvadura por compressão.

Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	L_{cr}	λ	χ	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{c,Ed} / N_{b,Rd}$ (kN)
5123	CHS 60.3 x 4	4,95	2,00	100,00	0,56	109,07	0,05

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”

Barra 5123

```

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C
Frame : 5123      X Mid: 8,844      Combo: ELU1.Wx1_PR1A (T-Design Type: Column)
Length: 2,000    Y Mid: -0,660     Shape: Tubo 60.3x4      Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0,000      Z Mid: -5,953     Class: Class 1         Rolled : No
  
```

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS						
Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
0,000	-4,946	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,010

```

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
D/C Ratio: 0,056 = 0,056 + sqrt[(0,000)^2 + (0,000)^2] < 1,000 OK
           = NEd/(Chi_z NRk/GammaM1) + sqrt[(kzy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT
My,Rk/GammaM1))^2
           + (kzz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1))^2] (EC3 6.3.3(4)-
6.62)
  
```

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-4,946	194,559	194,559

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	194,559	219,038	57143,154	145,979	1,000

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0,490	145,979	1,154	1,400	0,456	88,733
MajorB(y-y)	c	0,490	145,979	1,154	1,400	0,456	88,733
Minor (z-z)	c	0,490	145,979	1,154	1,400	0,456	88,733
MinorB(z-z)	c	0,490	145,979	1,154	1,400	0,456	88,733
Torsional TF	c	0,490	145,979	1,154	1,400	0,456	88,733

Figura 9.64 Verificação da segurança na barra 5123.

Barra 5072

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 5072 X Mid: -0,025 Combo: ELU1. (T+)_PR2B_WDesign Type: Column
Length: 2,000 Y Mid: -0,660 Shape: Tarugo 10 Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0,000 Z Mid: -7,953 Class: Class 2 Rolled : No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS						
Location	Ned	Med, yy	Med, zz	Ved, z	Ved, y	Ted
0,000	20,116	0,000	0,000	0,000	0,000	1,280E-06

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.2.1(7))

D/C Ratio: $0,931 = 0,931 + \sqrt{(0,000)^2 + (0,000)^2} < 1,000$ OK
 $= (N_{Ed}/N_{Rd}) + \sqrt{(M_{y,Ed}/M_{y,Rd})^2 + (M_{z,Ed}/M_{z,Rd})^2}$ (EC3 6.2.1
 (7))

AXIAL FORCE DESIGN			
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	20,116	21,598	21,598

Figura 9.65 Verificação da segurança na barra 5072.

- Comparação de resultados

Tabela 9.71 Comparação dos resultados nas barras 5123 e 5072.

Resistência	Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	5123	N_{Rd} (kN)	194,43	194,56	0,07
Elemento	5123	$N_{b,Rd}$ (kN)	109,07	88,73	22,92
Secção Transversal	5072	N_{Rd} (kN)	21,60	21,60	0,01

9.1.12 Dimensionamento das Madres dos Alçados Laterais

As madres dos alçados laterais são constituídas por perfis UPN cujo comprimento corresponde à distância entre pilares. Estas madres apresentam tarugos colocados a $1/3$ dos vãos, de modo a diminuir não só a flexão segundo o eixo de menor inércia do perfil escolhido, mas também para limitarem o comprimento de bambeamento destas barras.

A figura 9.66 mostra as madres dos alçados laterais A e B no módulo tipo.

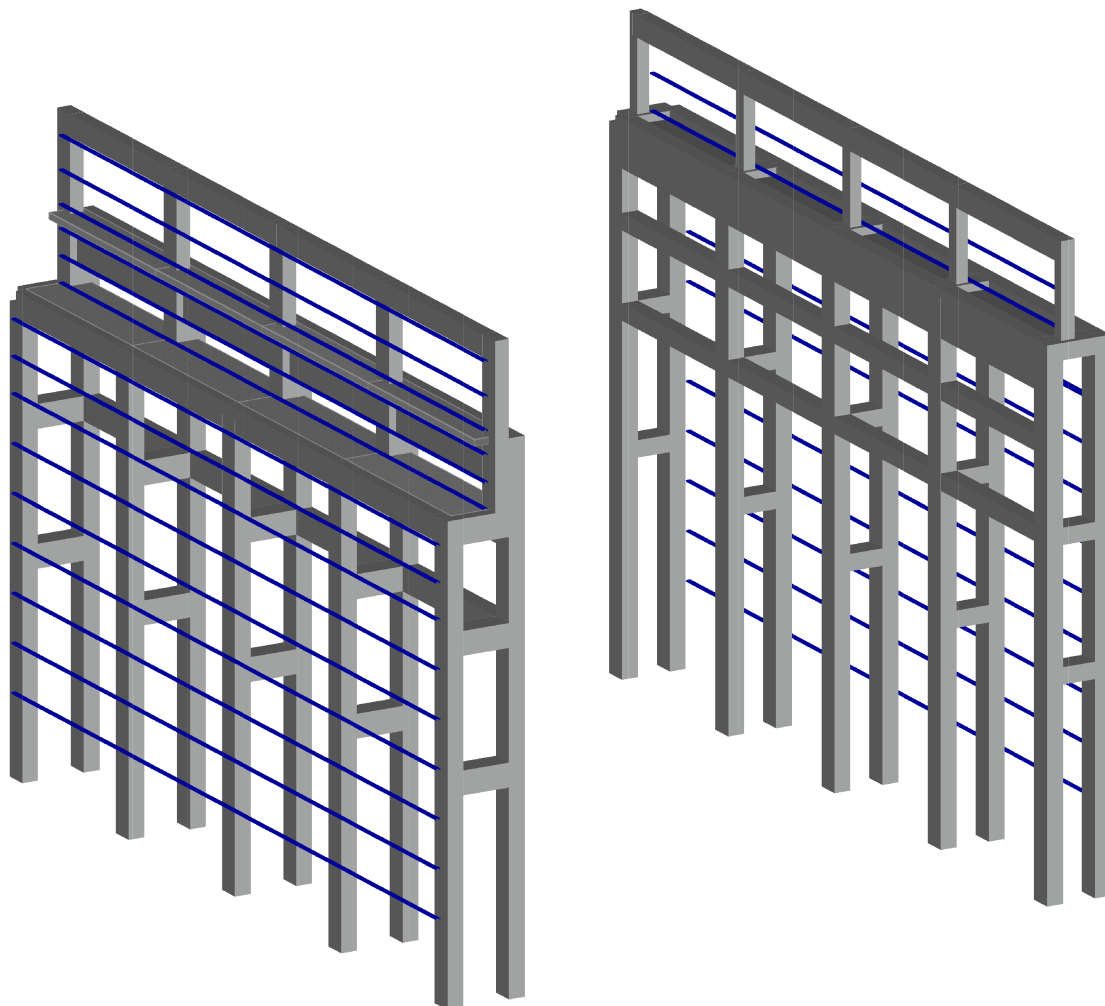


Figura 9.66 Vista das madres dos alçados laterais.

As madres dos alçados foram dimensionadas como vigas contínuas sujeitas a flexão desviada com esforços transversos. Na figura 9.67 mostra-se a madre mais esforçada e o diagrama de momentos fletores M_y para a combinação condicionante.

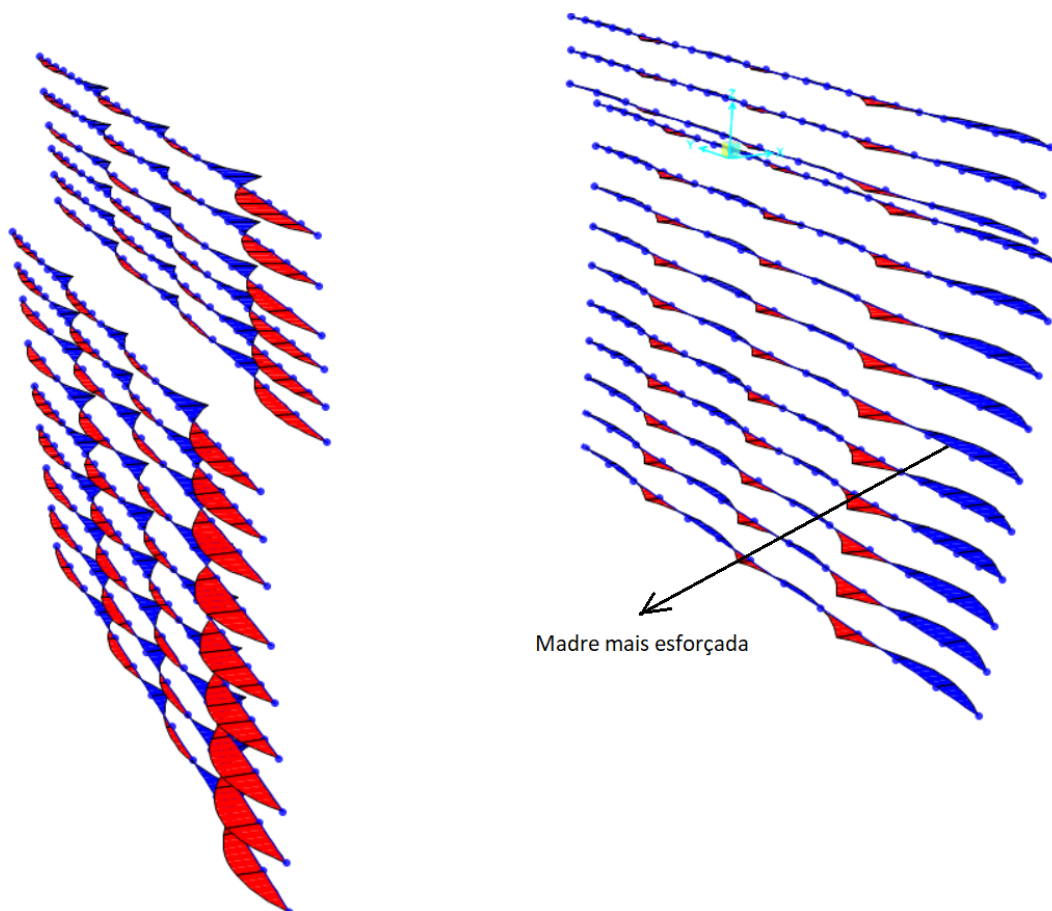


Figura 9.67 Diagramas de momentos fletores M_y .

A figura 9.68 mostra as barras e as secções mais esforçadas para a combinação condicionante $ELU1.Wy_PR2B(T-)$.

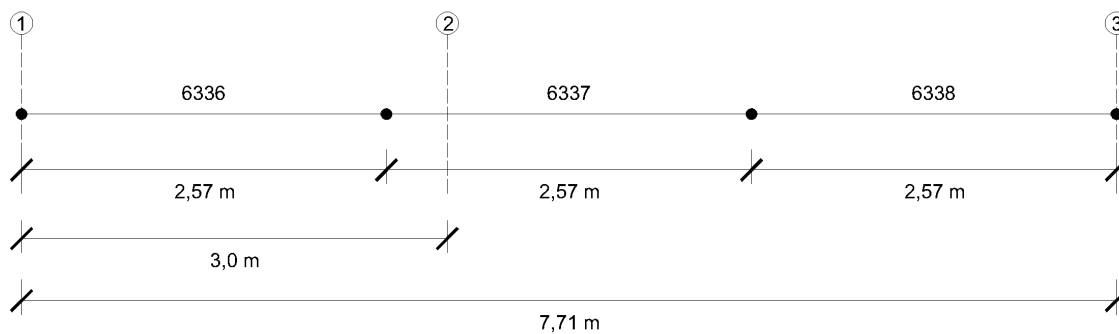


Figura 9.68 Identificação da madre mais esforçada.

Nas figuras seguintes estão indicados os passos que foram necessários realizar para o dimensionamento da barra mais solicitada, deste grupo de barras para a combinação condicionante $ELU1.Wy-PR2B(T-)$.

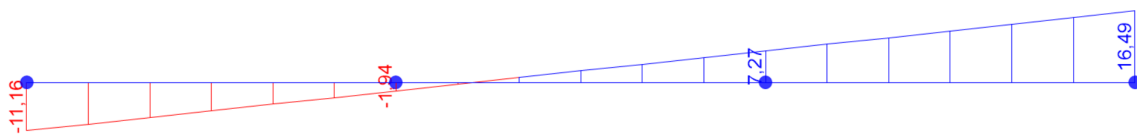


Figura 9.69 Diagrama de esforço transversal V_z .

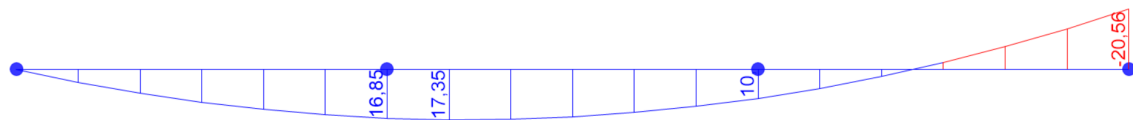


Figura 9.70 Diagrama de momento fletor M_y .

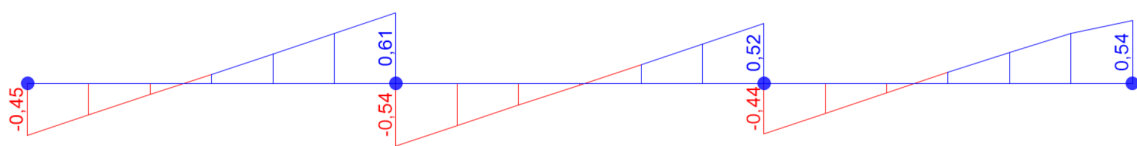


Figura 9.71 Diagrama de esforço transversal V_y .

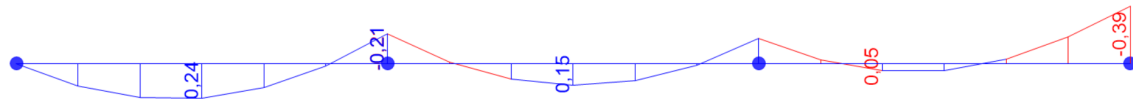


Figura 9.72 Diagramas de momento fletor M_z .

Tabela 9.72 Esforços atuantes de cálculo na madre mais solicitada.

Perfil	Barra	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	$V_{y,Ed}$ (kN)	$M_{z,Ed}$ (kN.m)	Classe da Secção
UPN 160	6336	-1,94	16,85	0,61	-0,21	1
UPN 160	6337	-0,41	17,35	-0,36	-0,01	1
UPN 160	6338	16,49	-20,56	0,54	-0,39	1

Dimensionamento das Madres dos Alçados Laterais aos Estados Limites Últimos

O dimensionamento das madres dos alçados laterais foi realizado de um modo idêntico ao das madres dos alçados de topo. Juntam-se na página seguinte todos os elementos dos cálculos.

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.73 Esforços resistentes de cálculo.

Perfil	Barra	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)
UPN 160	6336	200,05	181,00	37,95	9,68
UPN 160	6337	200,05	181,00	37,95	9,68
UPN 160	6338	200,05	181,00	37,95	9,68

Tabela 9.74 Dimensionamento à Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).

Perfil	Barra	$V_{z,Ed} < 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$	α
UPN 160	6336	Desprezar efeito do ET	37,95	0,44	1,00
UPN 160	6337	Desprezar efeito do ET	37,95	0,46	1,00
UPN 160	6338	Desprezar efeito do ET	37,95	0,54	1,00

Tabela 9.75 Dimensionamento à Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).

Perfil	Barra	$V_{y,Ed} < 0,5V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}$	β
UPN 160	6336	Desprezar efeito do ET	9,68	0,02	1,00
UPN 160	6337	Desprezar efeito do ET	9,68	0,00	1,00
UPN 160	6338	Desprezar efeito do ET	9,68	0,04	1,00

Tabela 9.76 Rácios finais - Barras 6336, 6337 e 6338.

Perfil	Barra	Rácio Final
		$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}\right)^\beta$
UPN 160	6336	0,47
UPN 160	6337	0,46
UPN 160	6338	0,58

- Verificação da resistência à encurvadura lateral partir da folha de cálculo “Excel”

O critério adotado para a determinação do momento crítico em secções do tipo UNP, foi o de considerar uma secção do tipo IPE com características elásticas e geométricas semelhantes, e recorrer ao *software* “LTBeam”, considerando as condições reais de ligação destas barras ao exterior, bem como o andamento do diagramas de flexão M_y ao longo do vão correspondente à combinação condicionante.

A verificação da segurança à encurvadura lateral nas barras 6336, 6337 e 6338 encontra-se resumida na tabela 9.77.

Notas: A determinação do momento crítico M_{cr} no cálculo do momento resistente à encurvadura lateral nas madres dos alçados laterais foi efetuada a partir do *software* “LTBeam”. Importa, também, referir que em alguns casos o *software* “SAP2000” não efetua corretamente o cálculo do parâmetro M_{cr} . Tendo em consideração a ausência de

Tabela 9.77 Resistência do elemento à encurvadura lateral - Barras 6336, 6337 e 6338.

Perfil	Barra	$l_{cr,z}$ (m)	k_z	k_w	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}$
UPN 160	6336	2,57	1	1	45,74	0,91	0,76	0,51	19,53	0,86
UPN 160	6337	2,57	1	1	40,18	0,97	0,76	0,48	18,28	0,95
UPN 160	6338	2,57	1	1	91,93	0,64	0,76	0,68	25,85	0,80

secções UPN no *software* “SemiComp+”, a verificação da segurança ao bambeamento nestas barras baseou-se na rotina de cálculo desenvolvida em “Excel”.

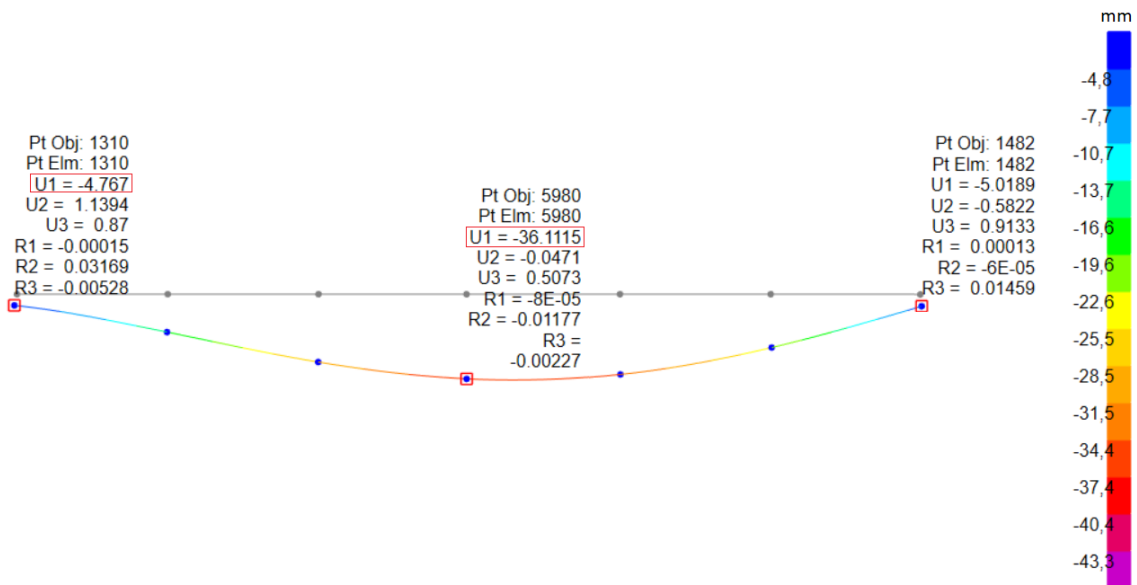
Analisando os rácios apresentados na tabela 9.77 verifica-se os perfis UPN 160 são suficientes para assegurar a resistência aos estados limites últimos.

Dimensionamento das madres dos alçados laterais aos ELS

O dimensionamento das madres aos estados limites de serviço consiste no controlo das flechas máximas horizontais (plano xy) e verticais (plano yz), cujos deslocamentos máximos admissíveis segundo os eixos principais de inércia têm de ser inferiores a $\delta_{adm} = L/200$.

- Controlo da flecha máxima horizontal

Na figura 9.73 indicam-se os deslocamentos para a verificação da flecha máxima horizontal (plano xy).

**Figura 9.73** Flecha máxima horizontal observada nas madres dos alçados.

Verifica-se, analisando a tabela 9.78, que o perfil tem deformação inferior à admissível.

Tabela 9.78 Verificação da flecha máxima horizontal nas madres dos alçados laterais.

Controlo da flecha máxima horizontal (plano xy)					
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{h,rel}$ (mm)	Rácio relativo
5980	ELS.Wy_PR1A (T+)	7,71	38,55	31,34	0,81

- Controlo da flecha máxima vertical

A flecha vertical máxima calculou-se a partir dos deslocamentos indicados na figura 9.74.

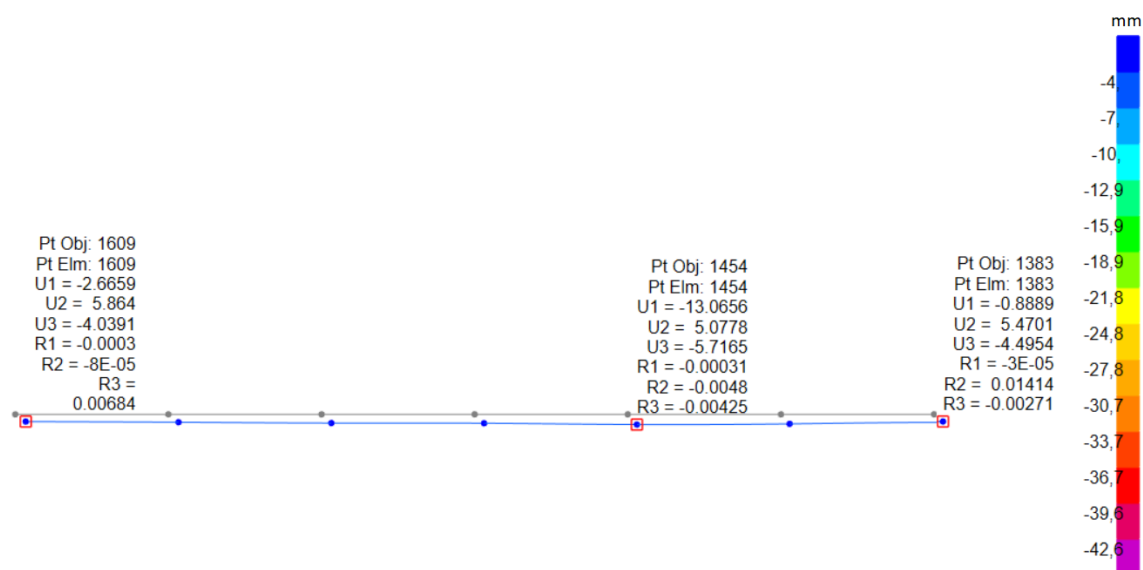


Figura 9.74 Controlo da flecha máxima vertical (plano yz)

Tabela 9.79 Verificação da flecha máxima horizontal nas madres.

Controlo da flecha máxima vertical (plano yz)					
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
1454	ELS. (T-)_PR1A_Wy	7,71	38,55	1,68	0,04

Com base nos resultados das tabelas 9.78 e 9.79 considera-se satisfeito o critério de verificação aos estados limites de utilização nas madres dos alçados laterais.

9.1.13 Dimensionamento das Madres dos Alçados de Topo

O dimensionamento das madres dos alçados de topo foi efetuado para o alçado norte. A figura 9.75 mostra o esqueleto estrutural de suporte das chapas de revestimento exterior deste alçado. De referir, que existe uma abertura centrada de grandes dimensões, que serve de acesso ao interior do Hangar.

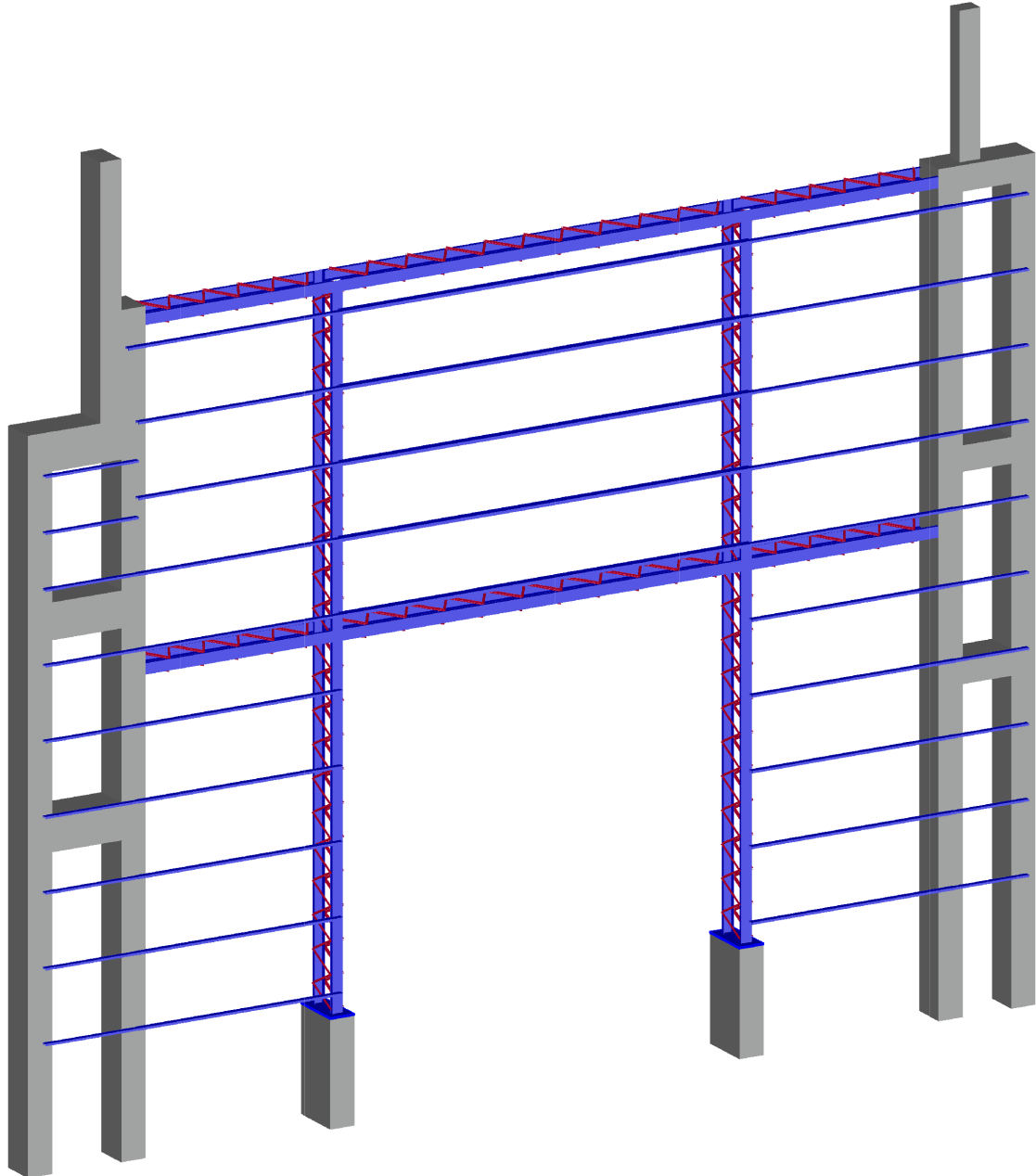


Figura 9.75 Madres do alçado de topo Norte.

As madres dos alçados de topo foram divididas em três grupos com diferentes vãos, conforme se mostra na figura 9.76.

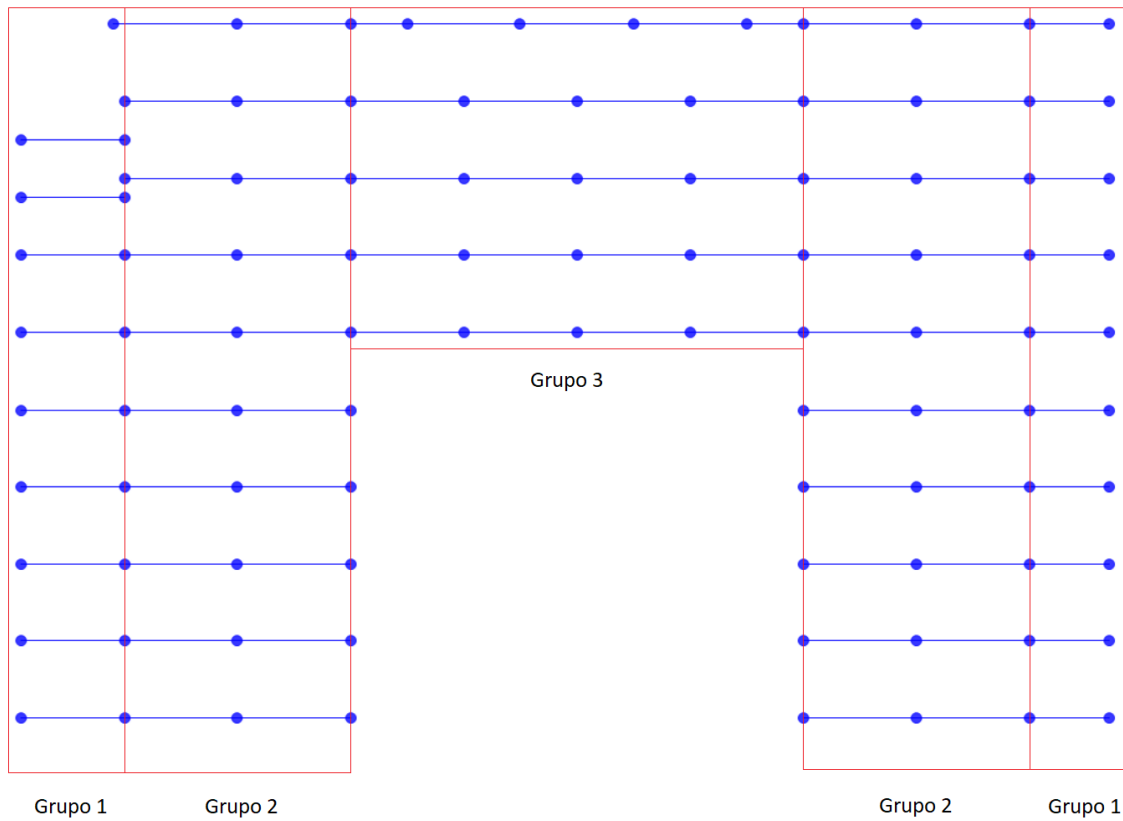


Figura 9.76 Identificação dos grupos de madres de topo.

A tabela 9.80 indica os comprimentos das barras associadas a cada grupo.

Tabela 9.80 Comprimentos das barras.

Grupo de barras	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Comprimento (m)	2,7	5,91	11,84

Com base nos grupos definidos selecionou-se a madre mais solicitada de cada um dos grupos e procedeu-se ao seu dimensionamento.

Dimensionamento das Madres dos Alçados de Topo aos Estados Limites Últimos

Grupo 1

Na figura 9.77 representam-se os diagramas de momentos fletores M_y devido à combinação condicionante (ELU1.Wx1-PR2A (T-)) para as madres do grupo 1, e indicam-se todos os passos que foram realizados recorrendo a figuras e tabelas utilizadas para justificar o dimensionamento desta madre.

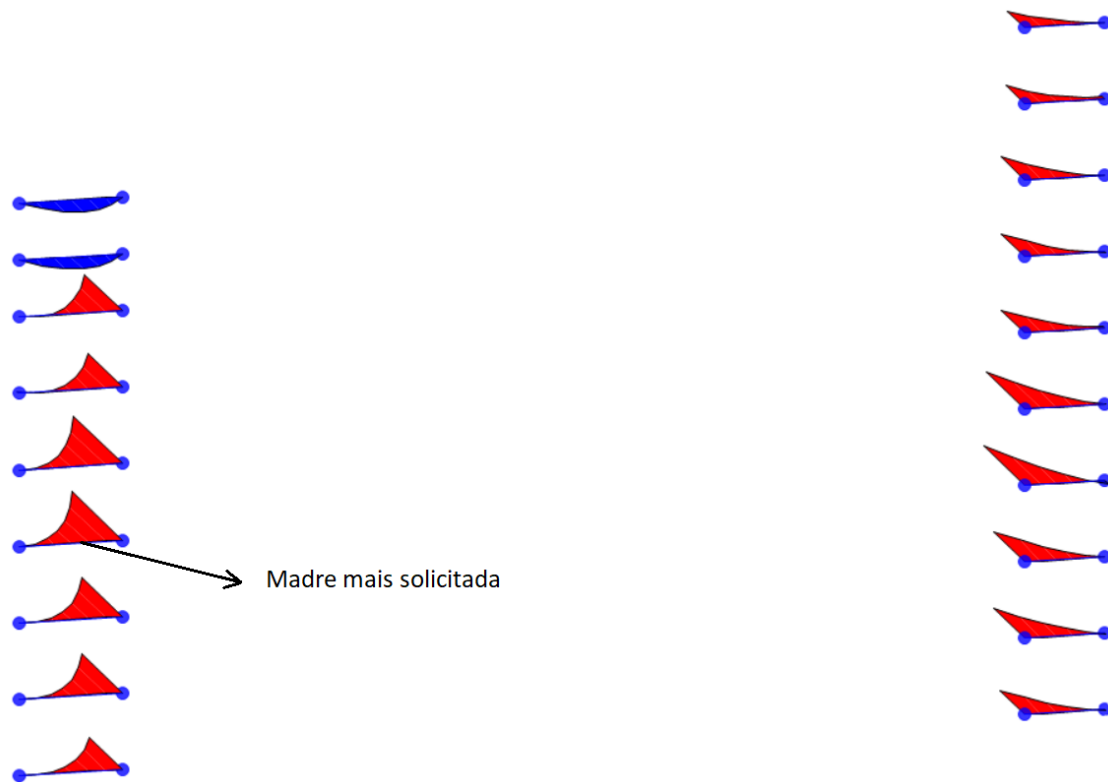


Figura 9.77 Madre mais solicitada.

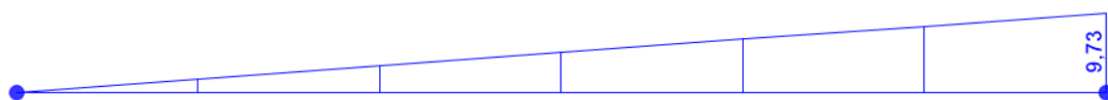


Figura 9.78 Diagrama de esforço transverso V_z para a combinação condicionante na barra 5051.

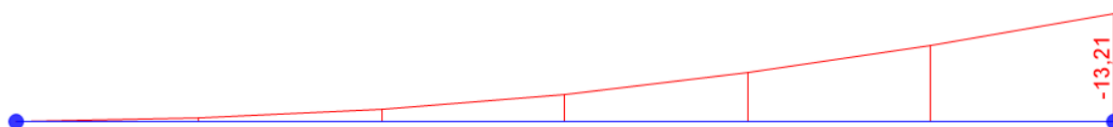


Figura 9.79 Diagrama de momentos fletores M_y para a combinação condicionante na barra 5051.

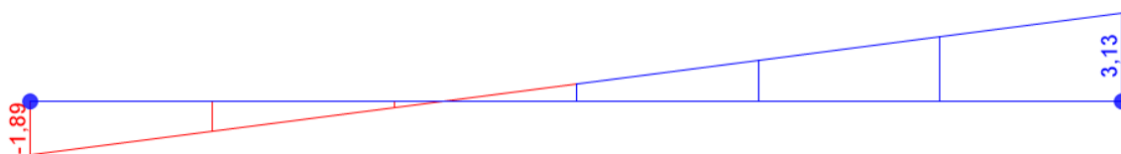


Figura 9.80 Diagrama de esforço transversal V_y para a combinação condicionante na barra 5051.



Figura 9.81 Diagrama de momentos fletores M_z para a combinação condicionante na barra 5051.

Tabela 9.81 Esforços de cálculo na barra 5051 devido à combinação condicionante.

Perfil	Barra	Secção (m)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	$V_{y,Ed}$ (kN)	$M_{z,Ed}$ (kN.m)	Classe
UPN 140	5051	0,00	0	0	-1,89	0	1
UPN 140	5051	1,35	4,87	-3,34	0,62	0,85	1
UPN 140	5051	2,7	9,73	-13,21	3,13	-1,68	1

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.82 Esforços resistentes de cálculo.

Perfil	Barra	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)
UPN 140	5051	165,28	158,61	28,33	7,78

Tabela 9.83 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).

Perfil	Barra	Secção	$V_{z,Ed} \leq 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$	α
UPN 140	5051	0	Desprezar efeito do ET	28,33	0,00	1,00
UPN 140	5051	1,35	Desprezar efeito do ET	28,33	0,12	1,00
UPN 140	5051	2,7	Desprezar efeito do ET	28,33	0,47	1,00

Tabela 9.84 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).

Perfil	Barra	Secção	$V_{y,Ed} \leq 0,5V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}$	β
UPN 160	5051	0	Desprezar efeito do ET	7,78	0,00	1,00
UPN 140	5051	1,35	Desprezar efeito do ET	7,78	0,11	1,00
UPN 140	5051	2,7	Desprezar efeito do ET	7,78	0,22	1,00

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.85 Rácios finais - Barra 5051.

Perfil	Barra	Secção	Rácio Final
			$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}\right)^\beta$
UPN 140	5051	0	0,00
UPN 140	5051	1,35	0,23
UPN 140	5051	2,7	0,68

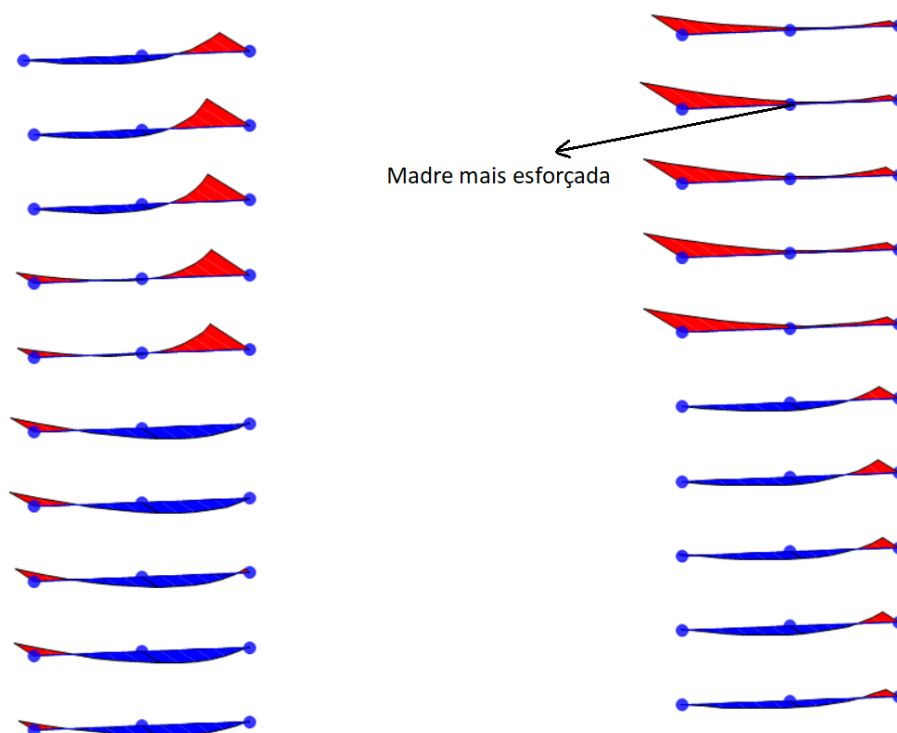
Analogamente ao que foi feito nas madres dos alçados laterais, considerou-se também, para o cálculo do momento crítico, um perfil bissimétrico de igual altura (IPE 140), e determinou-se o momento crítico a partir do *software* “LTBeam”.

Tabela 9.86 Resistência à encurvadura lateral - barra 5051.

Perfil	Barra	$l_{cr,z}$ (m)	k_z	k_w	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}$
UPN 140	5051	2,7	1	1	54,42	0,72	0,76	0,629	17,82	0,74

Grupo 2

Os diagramas de momentos fletores M_y para a combinação condicionante nas madres do grupo 2 constam da figura 9.82.

**Figura 9.82** Diagrama de momentos fletores M_y nas madres do grupo 2.

Na figura 9.83 encontram-se identificadas as barras que formam a madre mais solicitada.

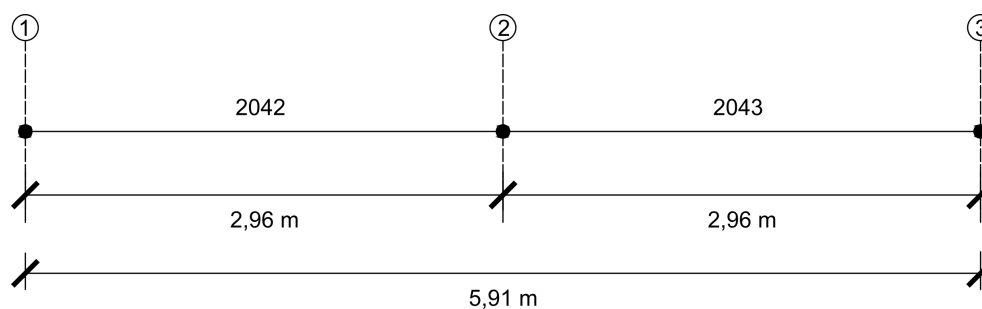


Figura 9.83 Identificação das barras da madre.

Nas figuras 9.84 a 9.87 representam-se os diagramas de momentos fletores e de esforços transversos para a combinação mais gravosa ELU1.Wx1-PR1B (T-).

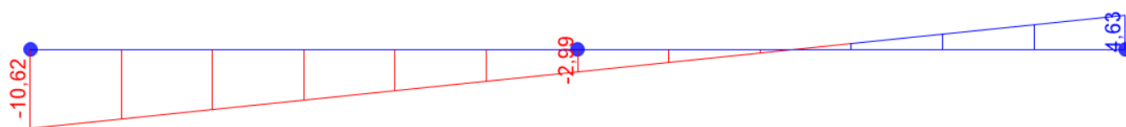


Figura 9.84 Diagrama de esforço transversal V_z .

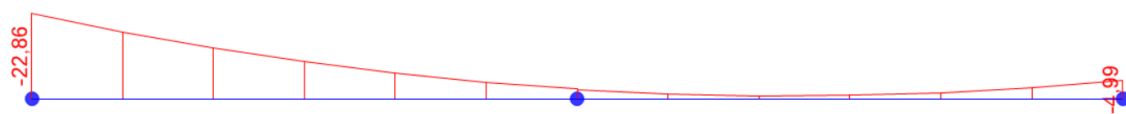


Figura 9.85 Diagrama de momentos fletores M_y .

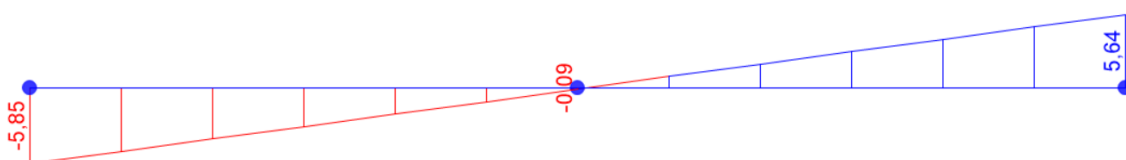


Figura 9.86 Diagrama de esforço transversal V_y .

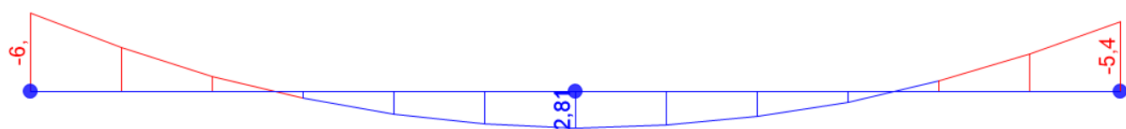


Figura 9.87 Diagrama de momentos fletores M_z .

Tabela 9.87 Esforços de cálculo.

Perfil	Barra	Secção (m)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	$V_{y,Ed}$ (kN)	$M_{z,Ed}$ (kN.m)	Classe
UPN 180	2042	0,00	-10,62	-22,86	-5,85	-6,00	1
UPN 180	2042 / 2043	2,96	-2,99	-2,73	-0,09	2,81	1
UPN 180	2043	5,91	4,63	-4,99	5,64	-5,4	1

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.88 Esforços resistentes de cálculo.

Perfil	Barras	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)
UPN 180	2042 / 2043	239,59	244,51	49,23	11,80

Tabela 9.89 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).

Perfil	Barra	Secção	$V_{z,Ed} \leq 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$	α
UPN 180	2042	0,00	Desprezar efeito do ET	49,23	0,46	1,00
UPN 180	2042 / 2043	2,96	Desprezar efeito do ET	49,23	0,06	1,00
UPN 180	2043	5,91	Desprezar efeito do ET	49,23	0,10	1,00

Tabela 9.90 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).

Perfil	Barra	Secção	$V_{y,Ed} \leq 0,5V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}$	β
UPN 180	2042	0,00	Desprezar efeito do ET	11,80	0,51	1,00
UPN 180	2042 / 2043	2,96	Desprezar efeito do ET	11,80	0,24	1,00
UPN 180	2043	5,91	Desprezar efeito do ET	11,80	0,46	1,00

Tabela 9.91 Rácios finais - Barras 2042 e 2043.

Perfil	Barra	Secção	Rácio Final
			$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}\right)^\beta$
UPN 180	2042	0,00	0,97
UPN 180	2042 / 2043	2,96	0,29
UPN 180	2043	5,91	0,56

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.92 Resistência à encurvadura lateral - Barras 2042 e 2043.

Perfil	Barra	$l_{cr,z}$ (m)	k_z	k_w	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	α_{LT}	χ_{LT}	M_{brd} (KN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,rd}}$
UPN 180	2042	2,96	1	1	77,49	0,80	0,76	0,582	28,63	0,80
UPN 180	2043	2,96	1	1	169,4	0,54	0,76	0,752	37,02	0,13

Grupo 3

Nas figuras em baixo estão representados os diagramas de momentos fletores para as combinações condicionantes das madres do grupo 3.

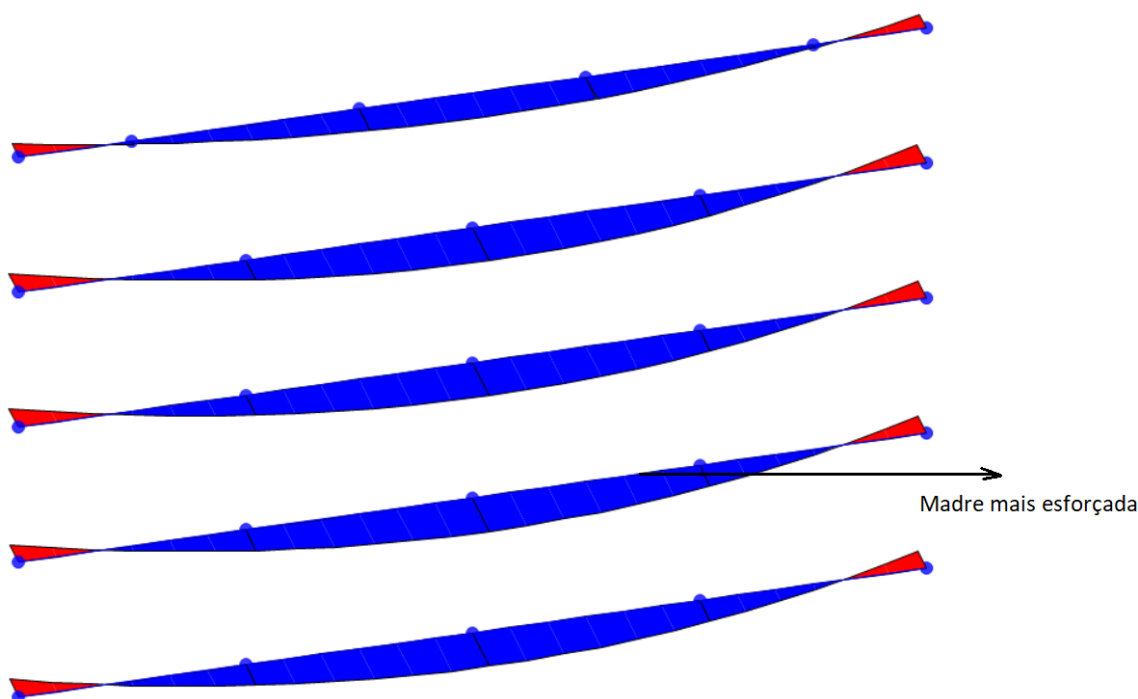


Figura 9.88 Diagrama de momentos fletores M_y nas madres do grupo 3.

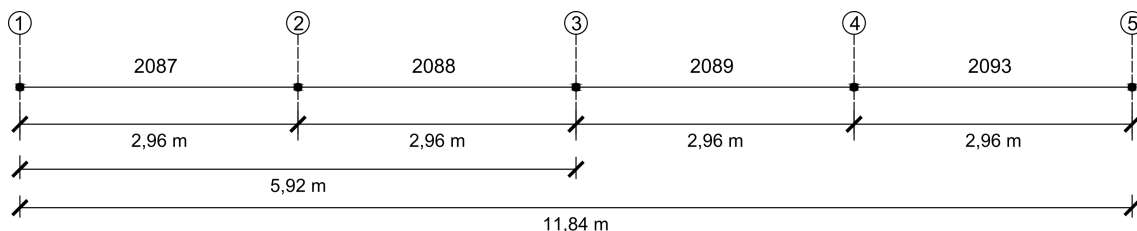


Figura 9.89 Identificação das barras da madre mais solicitada.

Os diagramas de cálculo são os indicados nas figuras 9.90 a 9.93.

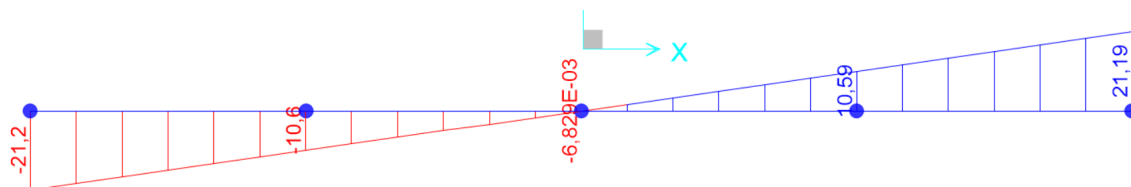


Figura 9.90 Diagrama de esforço transversal V_z .

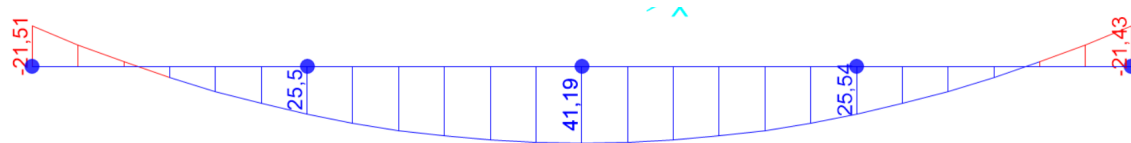


Figura 9.91 Diagrama de momentos fletores M_y .

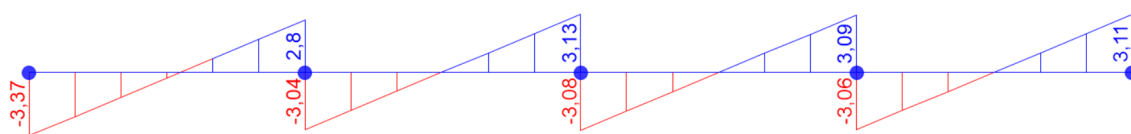


Figura 9.92 Diagrama de esforço transversal V_y .

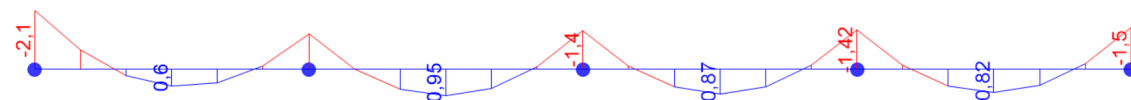


Figura 9.93 Diagrama de momentos fletores M_z .

Tabela 9.93 Esforços de cálculo na madre.

Perfil	Barra	Secção (m)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	$V_{y,Ed}$ (kN)	$M_{z,Ed}$ (kN.m)	Classe
UPN 240	2087	0,00	-21,2	-21,51	-3,37	-2,10	1
UPN 240	2088 / 2089	5,92	0	41,19	3,13	-1,4	1
UPN 240	2093	11,84	21,19	-21,43	3,11	-1,5	1

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.94 Esforços resistentes de cálculo.

Perfil	Barras	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$V_{pl,y,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)
UPN 240	2087 / 2088 / 2089 / 2093	376,45	350,88	98,45	20,82

Tabela 9.95 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo y-y).

Perfil	Barra	Secção	$V_{z,Ed} \leq 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$	α
UPN 240	2087	0,00	Desprezar efeito do ET	98,45	0,22	1,00
UPN 240	2088 / 2089	5,92	Desprezar efeito do ET	98,45	0,42	1,00
UPN 240	2093	11,84	Desprezar efeito do ET	98,45	0,22	1,00

Tabela 9.96 Flexão Desviada com Esforço Transverso (Eixo z-z).

Perfil	Barra	Secção	$V_{y,Ed} \leq 0,5V_{pl,y,Rd}$	$M_{z,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}$	β
UPN 240	2087	0,00	Desprezar efeito do ET	20,82	0,10	1,00
UPN 240	2088 / 2089	5,92	Desprezar efeito do ET	20,82	0,07	1,00
UPN 240	2093	11,84	Desprezar efeito do ET	20,82	0,07	1,00

Tabela 9.97 Rácios finais - Barras 2087, 2088, 2089 e 2093.

Perfil	Barra	Secção	$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,v,Rd}}\right)^\beta$
UPN 240	2087	0,00	0,32
UPN 240	2088 / 2089	5,92	0,49
UPN 240	2093	11,84	0,29

- Verificação da resistência à encurvadura lateral partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.98 Resistência à encurvadura lateral - Barras 2087, 2088, 2089 e 2093.

Perfil	Barra	$l_{cr,z}$ (m)	k_z	k_w	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ (KN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}$
UPN 240	2087	2,96	1	1	274,5	0,60	0,76	0,71	69,98	0,31
UPN 240	2089	2,96	1	1	126,4	0,88	0,76	0,53	52,25	0,79
UPN 240	2093	2,96	1	1	274,1	0,60	0,76	0,71	69,95	0,31

Dimensionamento das Madres dos Alçados de Topo aos ELS

Grupo 1

As flechas horizontais e verticais das barras do grupo 1 não têm significado dado que os deslocamentos “observados” têm origem no facto destas barras acompanharem a deformada dos pilares de betão. O deslocamento vertical e horizontal máximo admissível é $\delta_{adm} = L/200 = 13,5$ mm.

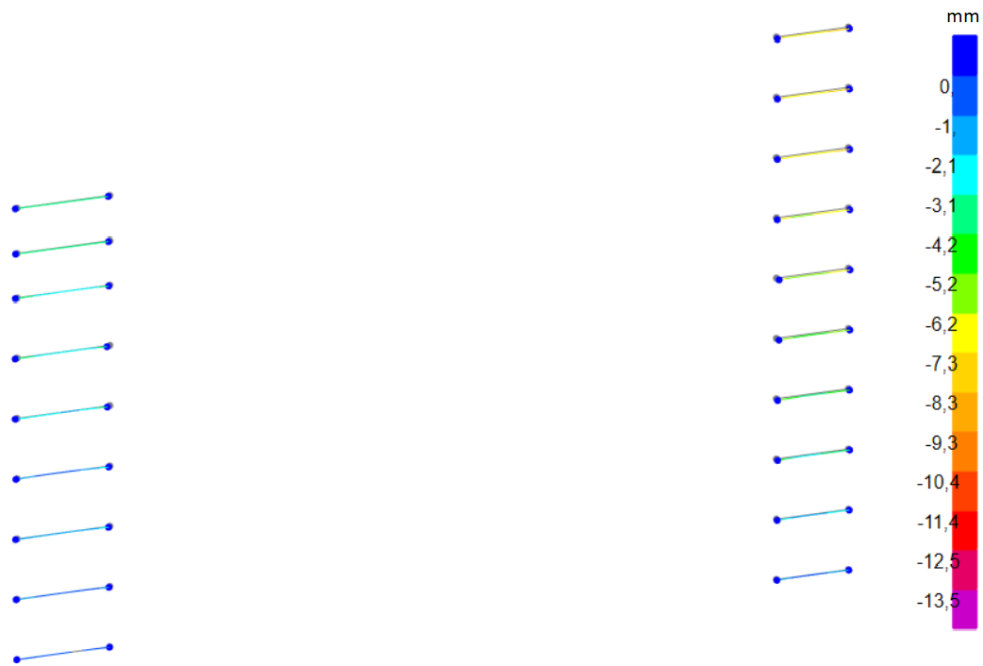


Figura 9.94 Flechas máximas horizontais devido à combinação condicionante.



Figura 9.95 Flechas máximas verticais devido à combinação condicionante.

Com base nas figuras 9.94 e 9.95 e uma vez que as flechas máximas horizontais e verticais cumprem as condições definidas anteriormente, considera-se satisfeito o critério de verificação aos estados limites de utilização.

Grupo 2

- Controlo da flecha máxima horizontal

A determinação da flecha máxima horizontal foi efetuada a partir dos deslocamentos nas seções extremas da madre, que estão indicados na figura 9.96 para a combinação de ações condicionante.

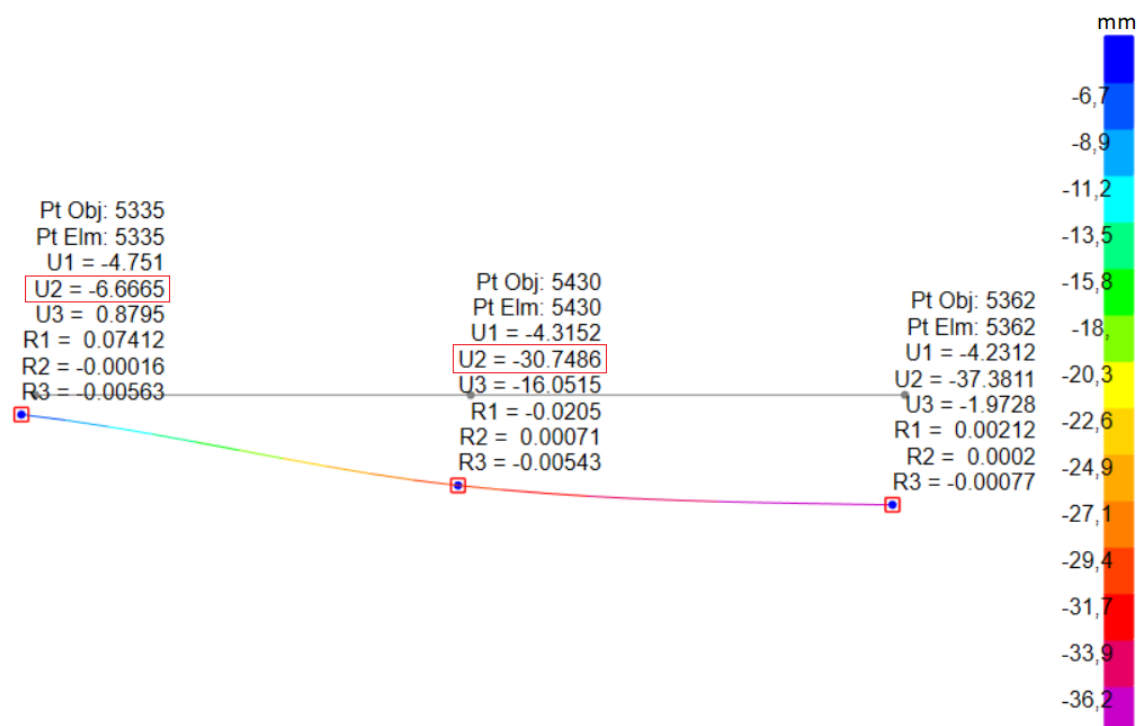


Figura 9.96 Flechas máximas horizontais.

Tabela 9.99 Verificação da flecha máxima horizontal.

Controlo da flecha máxima horizontal (plano xy)						
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo	
5430	ELS.Wx1_PR2B (T+)	5,91	29,55	24,08	0,81	

- Controlo da flecha máxima vertical

A flecha máxima vertical foi calculada a partir da informação que consta na figura 9.97, seguindo a mesma metodologia da utilizada no cálculo da flecha horizontal.

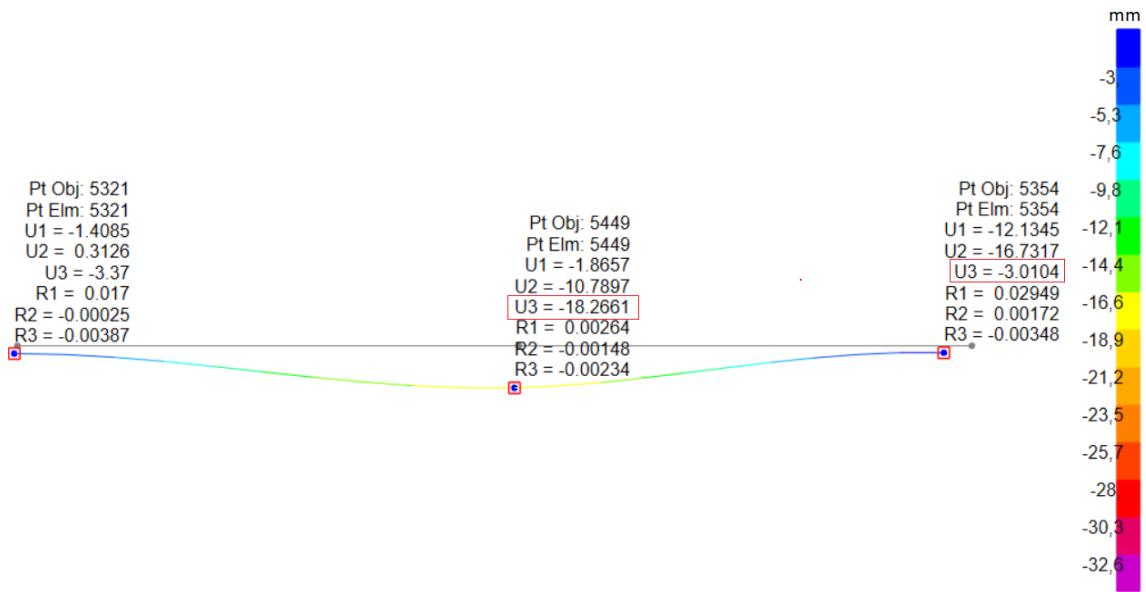


Figura 9.97 Flechas máximas horizontais.

Tabela 9.100 Verificação da flecha máxima vertical.

Controlo da flecha máxima vertical (plano yz)					
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
5449	ELS. (T-)_PR1B_Wxx1	5,91	29,55	15,26	0,52

Grupo 3

- Controlo da flecha máxima horizontal

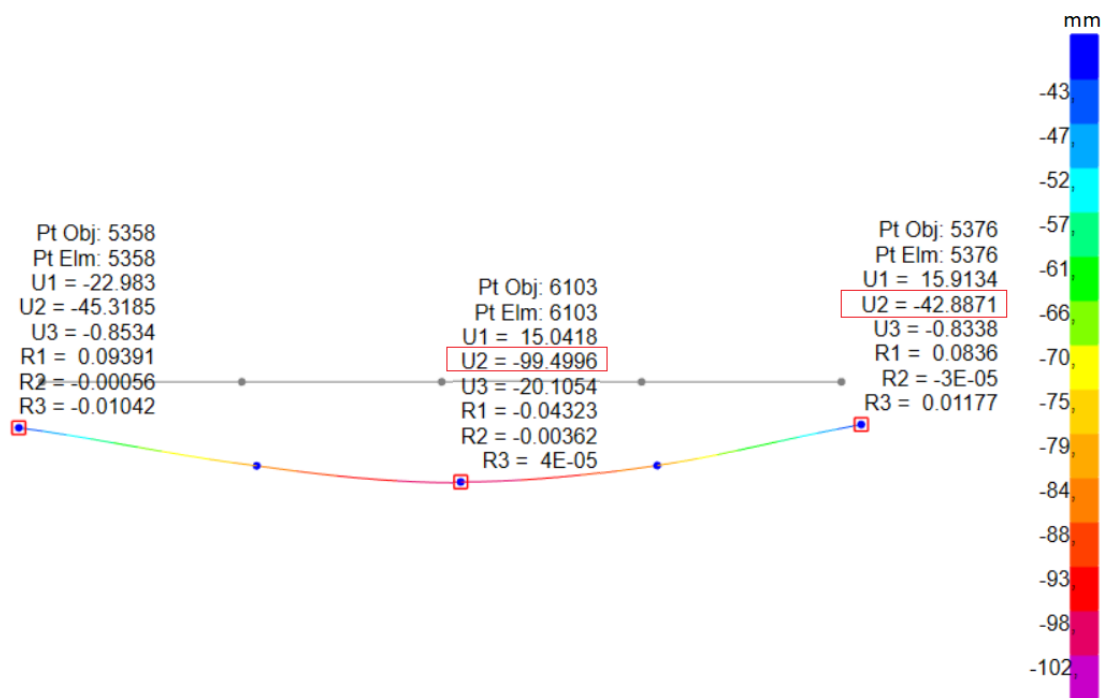
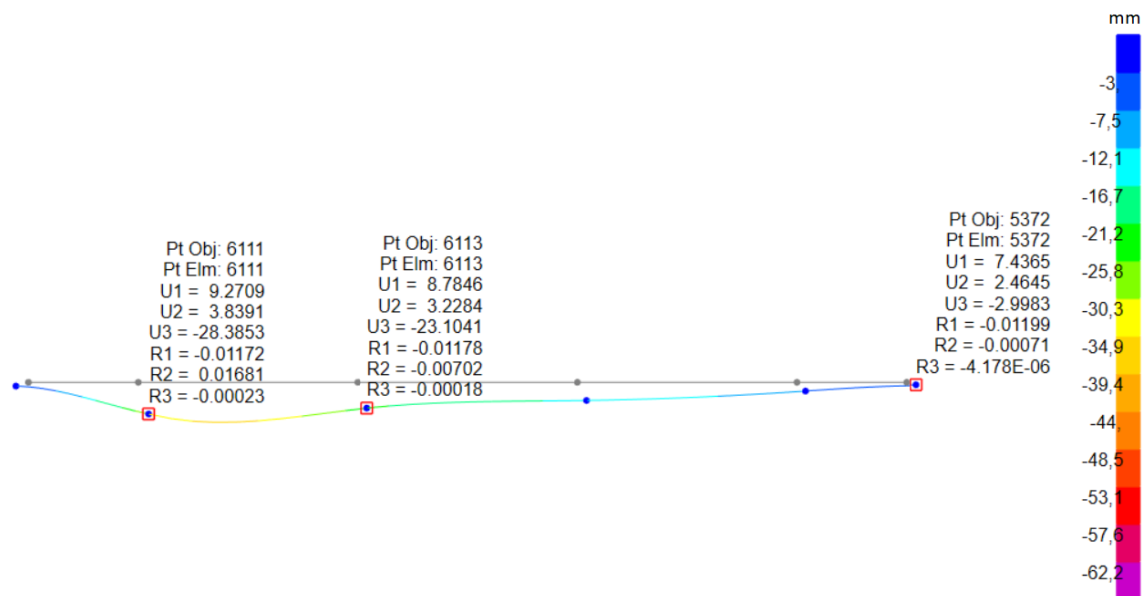


Figura 9.98 Flechas máximas horizontais.

Tabela 9.101 Verificação da flecha máxima horizontal nas madres do grupo 3.

Controlo da flecha máxima horizontal (plano xy)					
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	$\delta_{adm,rel}$ (mm)	$\delta_{v,rel}$ (mm)	Rácio relativo
6103	ELS.Wx1_PR1B (T+)	11,84	59,20	56,61	0,96

- Controlo da flecha máxima vertical

**Figura 9.99** Flechas máximas verticais devido à combinação condicionante.

9.1.14 Dimensionamento das cordas dos Pilares dos Alçados de Topo

Na fase do projeto de execução e após inseridas todas as ações no modelo final “SAP2000”, foi necessário conceber uma outra solução estrutural que respondesse melhor ao comportamento desta parte da estrutura, quando solicitada sobretudo devido à ação do vento.

Neste sentido, optou-se por uma solução treliçada para os montantes e travessas composta por elementos laminados ligados por barras interiores.

Assim, em detrimento de um aumento da secção transversal dos perfis IPE, optou-se por uma solução treliçada composta por perfis IPE ligados por cantoneiras, de modo a obter-se um aumento considerável da inércia na direção em que atuam as ações mais gravosas.

As barras que constituem as cordas dos pilares treliçados encontram-se sujeitas à flexão composta plana para a combinação condicionante, funcionando pois como colunas-viga. Conforme acima referido, a ação condicionante é a ação do vento, resultando que os cordões interiores trabalhem à compressão, enquanto que os cordões exteriores à tração. O dimensionamento das cordas dos pilares foi realizado para o cordão interior mais solicitado referenciado na figura 9.100.

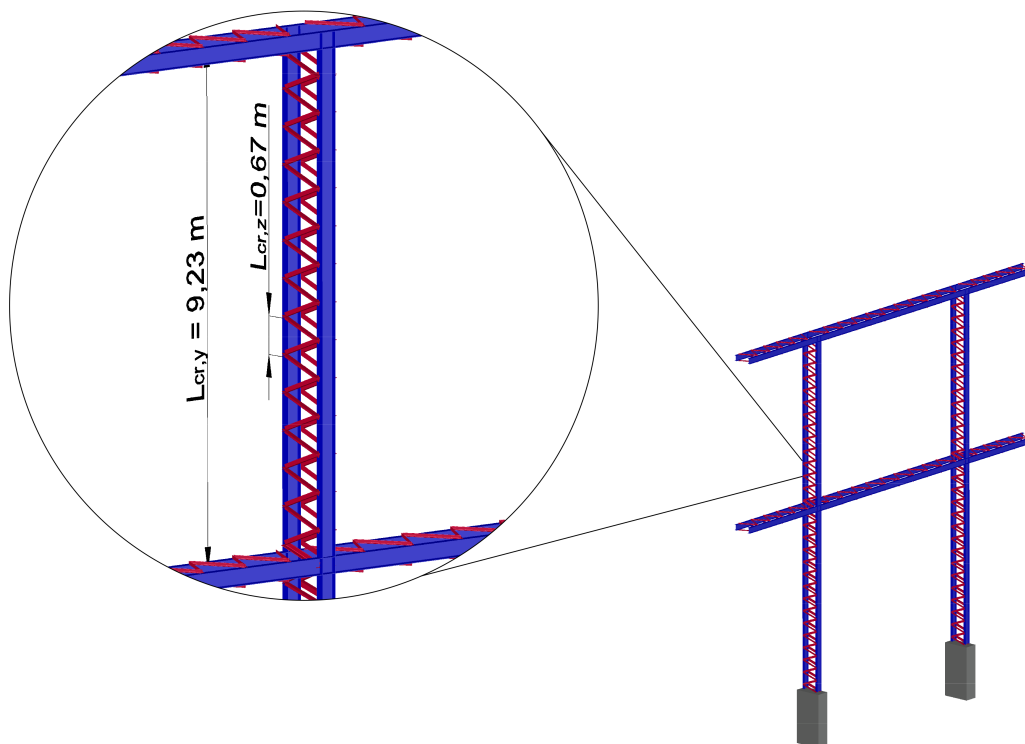


Figura 9.100 Cordão mais esforçado.

Toda a informação respeitante ao dimensionamento efetuado está indicada na tabelas e figuras seguintes.

Tabela 9.102 Esforços de cálculo no cordão mais solicitado.

Perfil	Secção	Combinação condicionante	N (kN)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Classe da secção
IPE 240	1	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-148,27	-0,7	-3,88	2
IPE 240	2	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-270,47	-1,02	0,29	2
IPE 240	3	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-35,99	-1,02	5	2

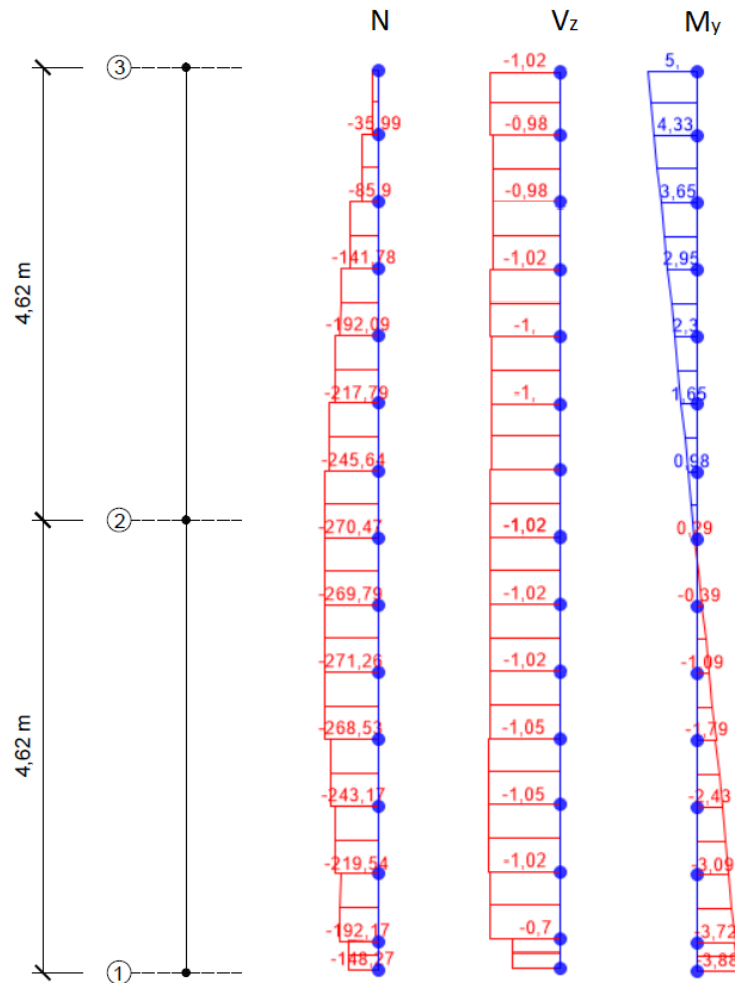


Figura 9.101 Cordão mais esforçado.

Dimensionamento dos cordões dos pilares aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.103 Verificação da resistência das secções transversais.

Perfil	Secção	Compressão		Esforço transverso	
		$N_{c,Rd}$ (kN)	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}}$	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}}$
IPE 240	1	1075,25	0,138	303,89	0,003
IPE 240	2	1075,25	0,252	303,89	0,003
IPE 240	3	1075,25	0,033	303,89	0,003

Tabela 9.104 Verificação da resistência das secções transversais.

Perfil	Secção	Flexão simples		Flexão com esforço transversal		
		$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}$	$V_{z,Ed} \leq 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,v,Rd}}$
IPE 240	1	100,82	0,038	Desprezar efeito do ET	100,82	0,038
IPE 240	2	100,82	0,003	Desprezar efeito do ET	100,82	0,003
IPE 240	3	100,82	0,050	Desprezar efeito do ET	100,82	0,050

Tabela 9.105 Verificação da resistência das secções transversais.

Flexão composta plana								
Perfil	Secção	n	a	$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$	$N_{Ed} \leq (0,5h_w t_w f_y)/\gamma_{M0}$	Condição de verificação	$M_{N,y,Rd}$ (kN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}$
IPE 240	1	0,138	0,398	Sim	Sim	Desprezar redução por N	100,815	0,038
IPE 240	2	0,224	0,398	Sim	Não	Considerar redução por N	97,707	0,003
IPE 240	3	0,000	0,398	Sim	Sim	Desprezar redução por N	100,815	0,050

- Verificação da resistência à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.106 Verificação à encurvadura por compressão.

Verificação do elemento à encurvadura por compressão - Cordões dos pilares treliçados												
Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo y-y				Eixo z-z				Condicionante	Rácio
			$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
IPE 240	271,26	9,23	9,23	92,58	0,62	665,69	0,68	24,91	0,97	1041,79	665,69	0,407

- Verificação da resistência à encurvadura lateral a partir da folha de cálculo “Excel”

A determinação do momento crítico foi efetuada com recurso ao *software* “LTBeamN”, conforme indicado na figura 9.102.

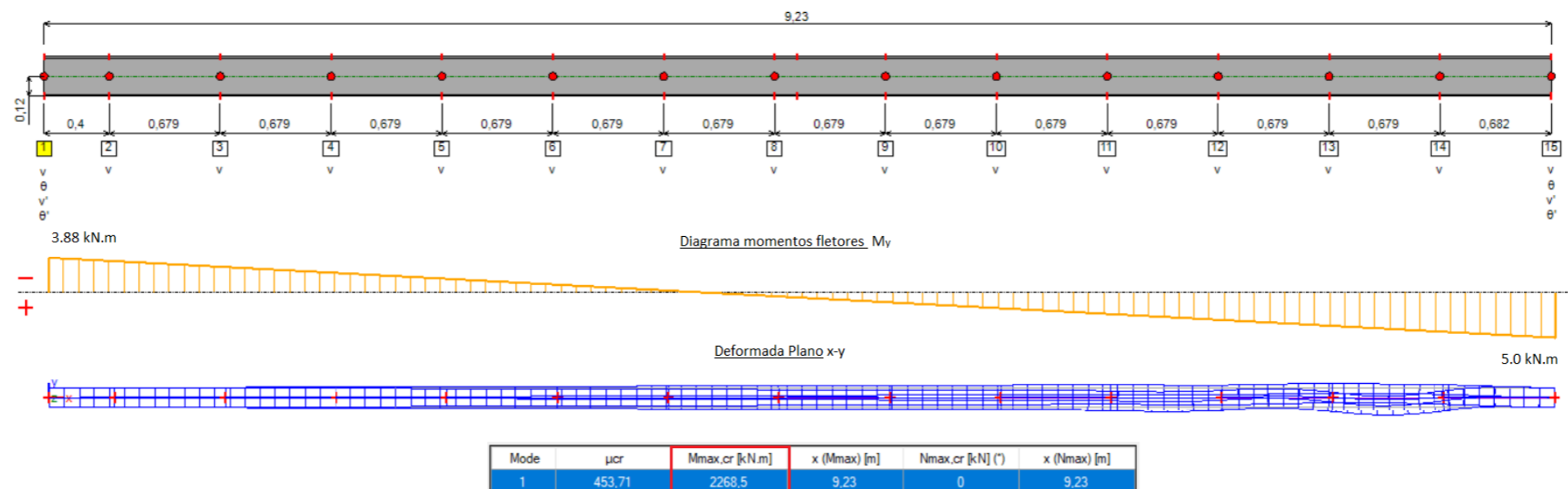


Figura 9.102 Determinação do momento crítico.

Tabela 9.107 Verificação da segurança à encurvadura lateral.

Perfil	$l_{cr,z}$ (m)	M_{cr} (KN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$	Curva de encurvadura lateral	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ (KN.m)	$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}}$
UPN 240	0,6	2268,5	0,211	calcular	b	0,34	0,996	100,43	0,050

- Verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão através da folha de cálculo “Excel”

Para o elemento em análise, que se encontra submetido a esforço axial de compressão e flexão uniaxial em torno de y, a estabilidade é garantida a partir da verificação das equações 9.10 e 9.11 relativas às esquações 6.61 e 6.62 do EC3-1-1.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \tag{9.10}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \tag{9.11}$$

A verificação da estabilidade do elemento está resumida nas tabelas seguintes.

Tabela 9.108 Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 1).

C_{my} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção z						C_{mLT} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção y					
Perfil	Suscetível def. por torção?	L (m)	M_y (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{my}	L (m)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{mLT}
IPE 240	Sim	9,23	5	Linear	-0,78	0,4	0,4	-3,72	Linear	0,96	0,984
IPE 240	Sim	9,23	0	Linear	-0,78	0,4	0,4	-3,80	Linear	0,96	0,984
IPE 240	Sim	9,23	-3,88	Linear	-0,78	0,4	0,4	-3,88	Linear	0,96	0,984

Tabela 9.109 Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 1).

Perfil	Parâmetros de cálculo					Fatores de interação				Eq. 6.61		Eq. 6.62		Rácio Eq. 6.61		Rácio Eq. 6.62	
	χ_y	χ_z	χ_{LT}	N_{Rk} (kN.m)	$M_{y,Rk}$	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}$	$k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}$	$k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$		
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,87	1,00								
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,87	1,00	0,41	0,03	0,30	0,04	0,44	0,34		
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,87	1,00								

Tabela 9.110 Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 2).

C_{my} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção z						C_{mLT} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção y					
Perfil	Suscetível def. por torção?	L (m)	M_y (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{my}	L (m)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{mLT}
IPE 240	Sim	9,23	5	Linear	-0,78	0,4	0,68	-0,22	Linear	-0,51	0,4
IPE 240	Sim	9,23	0	Linear	-0,78	0,4	0,68	0,15	Linear	-0,51	0,4
IPE 240	Sim	9,23	-3,88	Linear	-0,78	0,4	0,68	0,43	Linear	-0,51	0,4

Tabela 9.111 Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 2).

Perfil	χ_y	χ_z	χ_{LT}	N_{Rk} (kN.m)	$M_{y,Rk}$	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}}$	$k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$	$k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00						
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00	0,41	0,02	0,26	0,004	0,43	0,26
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00						

Tabela 9.112 Determinação dos coeficientes de momento uniforme c_{my} e c_{mLT} (Verificação 3).

C_{my} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção z							C_{mLT} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção y				
Perfil	Suscetível def. por torção?	L (m)	M_y (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{my}	L (m)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Forma do diagrama de momentos fletores	ψ	C_{mLT}
IPE 240	Sim	9,23	5	Linear	-0,78	0,4	0,68	4,35	Linear	0,87	0,948
IPE 240	Sim	9,23	0	Linear	-0,78	0,4	0,68	4,65	Linear	0,87	0,948
IPE 240	Sim	9,23	-3,88	Linear	-0,78	0,4	0,68	5,00	Linear	0,87	0,948

Tabela 9.113 Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão (Verificação 3).

Perfil	χ_y	χ_z	χ_{LT}	N_{Rk} (kN.m)	$M_{y,Rk}$	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}}$	$k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$	$k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00						
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00	0,41	0,02	0,26	0,04	0,43	0,30
IPE 240	0,68	0,98	0,996	918,85	86,151	0,53	0,60	0,89	1,00						

- Verificação da resistência das secções transversais a partir do software “SemiComp+”

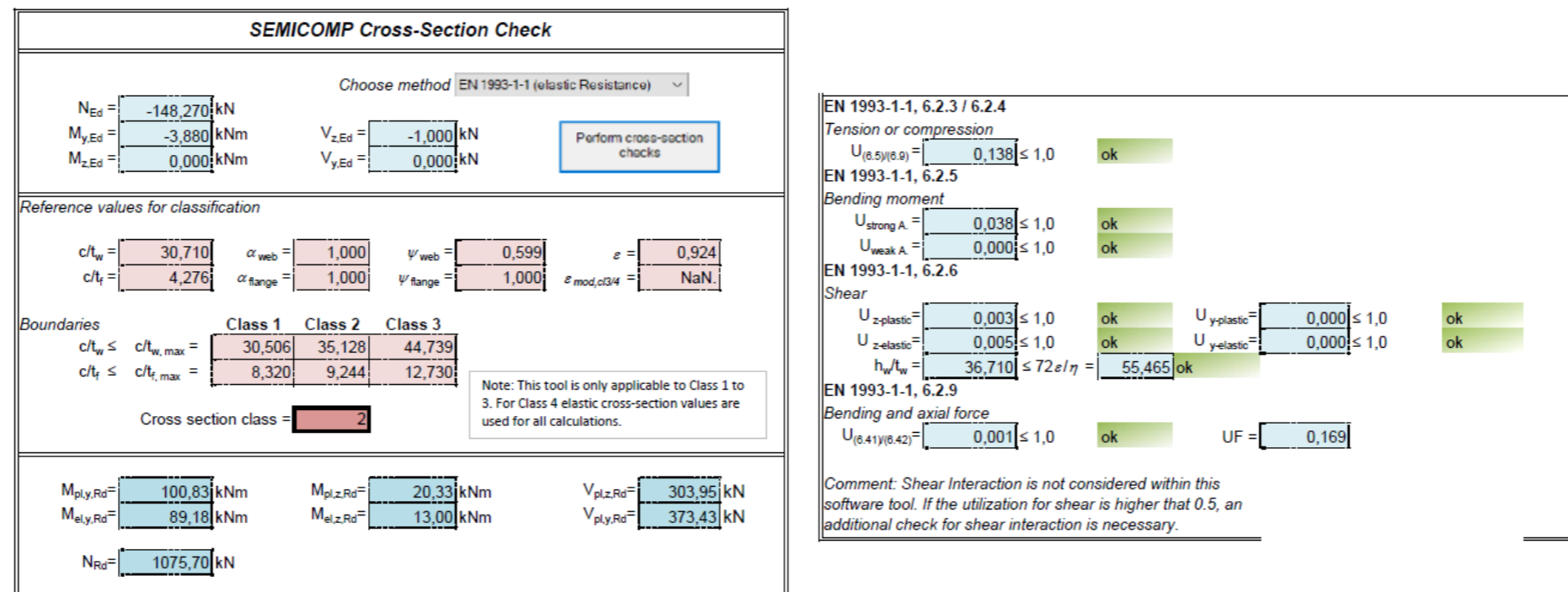


Figura 9.103 Verificação da resistência da secção mais solicitada dos pilares treliçados.

- Comparação de resultados

O *software* “SemiComp+” permite apenas a inclusão de até quatro travamentos laterais equidistantes para um dado elemento, não permitindo o seccionamento do mesmo elemento nas condições pretendidas. Por essa razão, a verificação da resistência do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão foi realizada com base na folha de cálculo realizada em “Excel”.

Tabela 9.114 Rácios de dimensionamento - Resistência da secção transversal.

Estado Limite Último	Rácio Excel	Rácio SemiComp+	Desvio Δ (%)
Compressão	0,138	0,138	0,00
Esforço Transverso	0,003	0,003	0,00
Flexão	0,038	0,038	0,00
Flexão Composta Plana	0,038	0,038	0,00

Analisando os resultados, constata-se que a solução adotada para as cordas dos pilares é suficiente para resistir aos estados limites últimos. Os rácios calculados a partir das equações 6.61 e 6.62 do EC3-1 poderiam ainda ter sido otimizados, contudo, por razões construtivas, essa opção não foi considerada.

Dimensionamento das cordas dos Pilares aos Estados Limites de Serviço

A verificação do critério de segurança aos estados limites de serviço nos pilares treliçados foi efetuada a partir da determinação da flecha máxima no topo do pilar.

Tendo em consideração que a altura total do pilar é de 19,25 m, o valor máximo admissível da flecha no topo do pilar deve ser inferior a:

$$\delta_{adm} = H/300 = (19,25/300) \times 1000 = 64,2mm$$

- Controlo da flecha máxima horizontal no plano xz

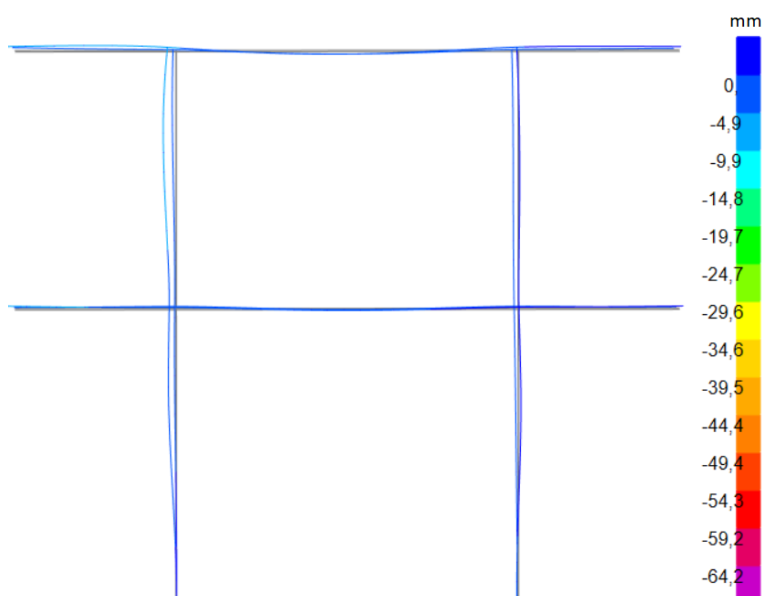


Figura 9.104 Flechas máximas horizontais no plano xz.

A figura 9.104, retirada do ficheiro de resultados do “SAP2000” mostra que os deslocamentos horizontais no plano xz são pouco significativos, uma vez que nesta direção os pilares estão travados pelas madres e pela viga superior treliçada.

- Controlo da flecha máxima horizontal no plano yz

A flecha máxima no topo dos pilares é de 40,1mm.

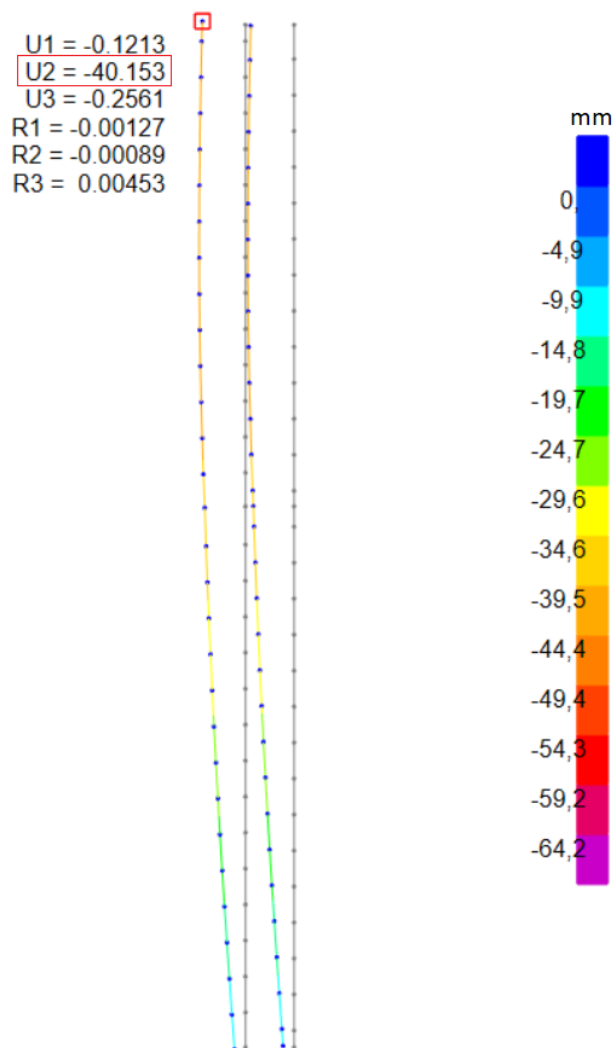


Figura 9.105 Flechas máximas horizontais no plano yz.

Tabela 9.115 Verificação da flecha máxima horizontal no plano yz para os pilares treliçados.

Joint SAP	Combinação condicionante	H (m)	δ_{adm} (mm)	δ_h (mm)	Rácio
5496	ELS.Wx1_PR2B (T+)	19,25	64,17	40,15	0,63

9.1.15 Dimensionamento das cordas das Vigas Treliçadas

Tal como nos pilares treliçados estas vigas também se encontram sujeitas à flexão composta plana para a combinação condicionante, pelo que foram dimensionadas como Colunas-vigas. O dimensionamento das cordas foi feito para a barra mais esforçada (ver figura 9.106). De referir, também, que o comprimento de encurvadura segundo o eixo z-z apenas difere no primeiro troço de cada extremidade ($L_{cr,z}=1,41$ m), sendo igual nos restantes troços ($L_{cr,z}=1,125$ m).

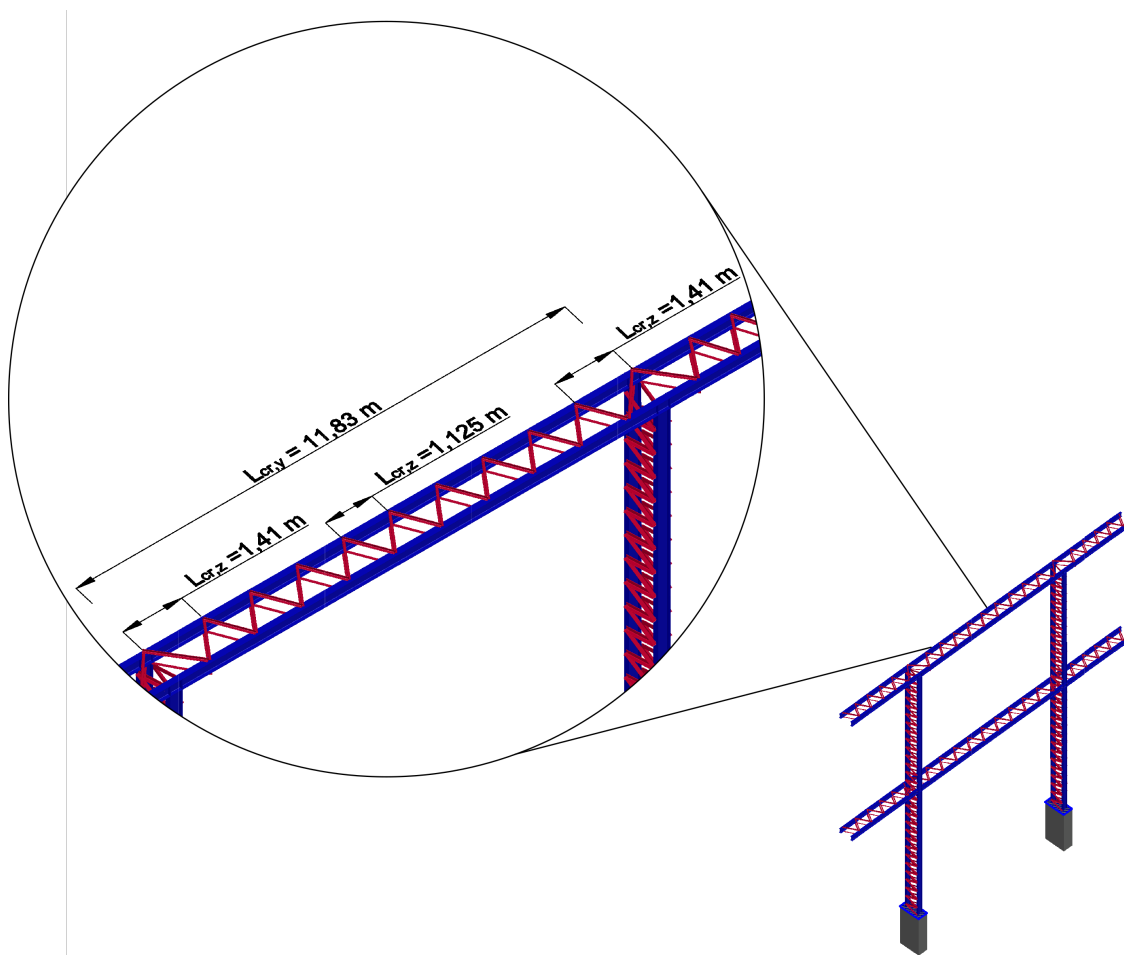


Figura 9.106 Cordão mais esforçado.

Os esforços de cálculo no elemento mais esforçado para a combinação condicionante estão resumidos na tabela 9.116.

Tabela 9.116 Esforços de cálculo no cordão mais solicitado.

Perfil	Secção	Combinação condicionante	N (kN)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Classe da secção
IPE 300	1	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-602,26	4,88	7,62	2
IPE 300	2	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-598,18	0	-7,56	2
IPE 300	3	ELU1.Wx1_PR1B (T+)	-594,70	-4,85	7,46	2

Os diagramas de cálculo constam na tabela 9.116 e estão representados nas figuras seguintes.

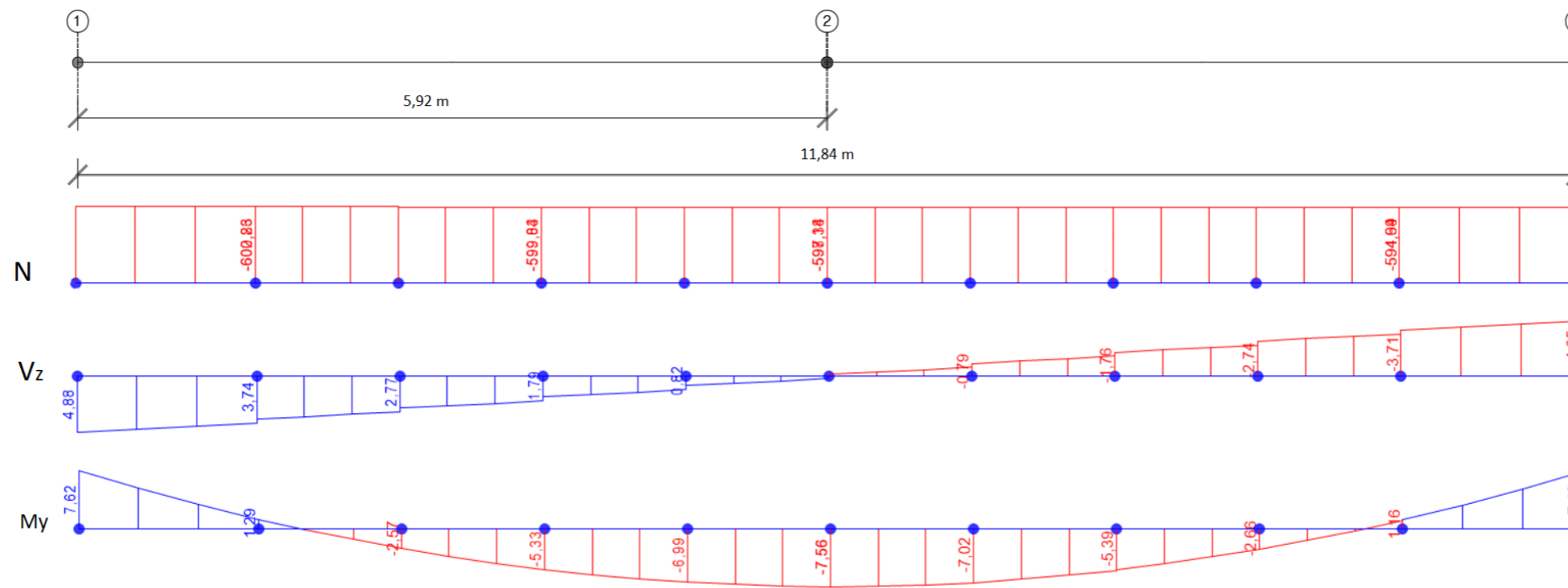


Figura 9.107 Diagramas de esforços.

Dimensionamento das cordas das vigas treliçadas aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência das secções transversais a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.117 Verificação da resistência das secções transversais.

		Esforços Resistentes					
		Compressão		Esforço transverso		Flexão simples	
Perfil	Secção	$N_{c,Rd}$ (kN)	Rácio $N_{Ed} / N_{c,Rd}$	$V_{pl,z,Rd}$ (kN)	Rácio $V_{z,Ed} / V_{pl,z,Rd}$	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)	Rácio $M_{y,Ed} / M_{pl,y,Rd}$
IPE 300	1	1479,5	0,407	407,72	0,012	172,81	0,044
IPE 300	2	1479,5	0,404	407,72	0,000	172,81	0,044
IPE 300	3	1479,5	0,402	407,72	0,012	172,81	0,043

Tabela 9.118 Verificação da resistência das secções transversais.

		Esforços Resistentes									
		Flexão com esforço transverso plástico				Flexão composta plana					
Perfil	Secção	$V_{z,Ed} \leq 0,5V_{pl,z,Rd}$	$M_{y,v,Rd}$ (kN.m)	$M_{y,Ed} / M_{y,v,Rd}$	n	a	$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$	$N_{Ed} \leq (0,5h_w t_w f_y) / \gamma_{M0}$	Condição de verificação	$M_{N,y,Rd}$ (kN.m)	$M_{y,Ed} / M_{N,y,Rd}$
IPE 300	1	Desprezar efeito do ET	172,81	0,044	0,407	0,403	Não	Sim	Considerar redução por N	128,35	0,059
IPE 300	2	Desprezar efeito do ET	172,81	0,044	0,404	0,403	Não	Sim	Considerar redução por N	128,95	0,059
IPE 300	3	Desprezar efeito do ET	172,81	0,043	0,402	0,403	Não	Sim	Considerar redução por N	129,45	0,058

- Verificação da resistência à encurvadura por compressão a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.119 Verificação à encurvadura por compressão.

Perfil	$N_{c,Ed}$	L (m)	Eixo y-y				Eixo z-z				Condicionante	Rácio
			$L_{cr,y}$ (m)	λ_y	χ_y	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	λ_z	χ_z	$N_{b,Rd,z}$ (kN)		
IPE 300	602,26	11,84	11,84	95,02	0,60	887,16	1,41	42,09	0,89	1318,01	887,16	0,679

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral a partir da folha de cálculo “Excel”

A determinação do momento crítico na verificação da resistência à encurvadura lateral foi efetuado a partir do *software* “LTBeamN”, conforme se indica na figura 9.108.

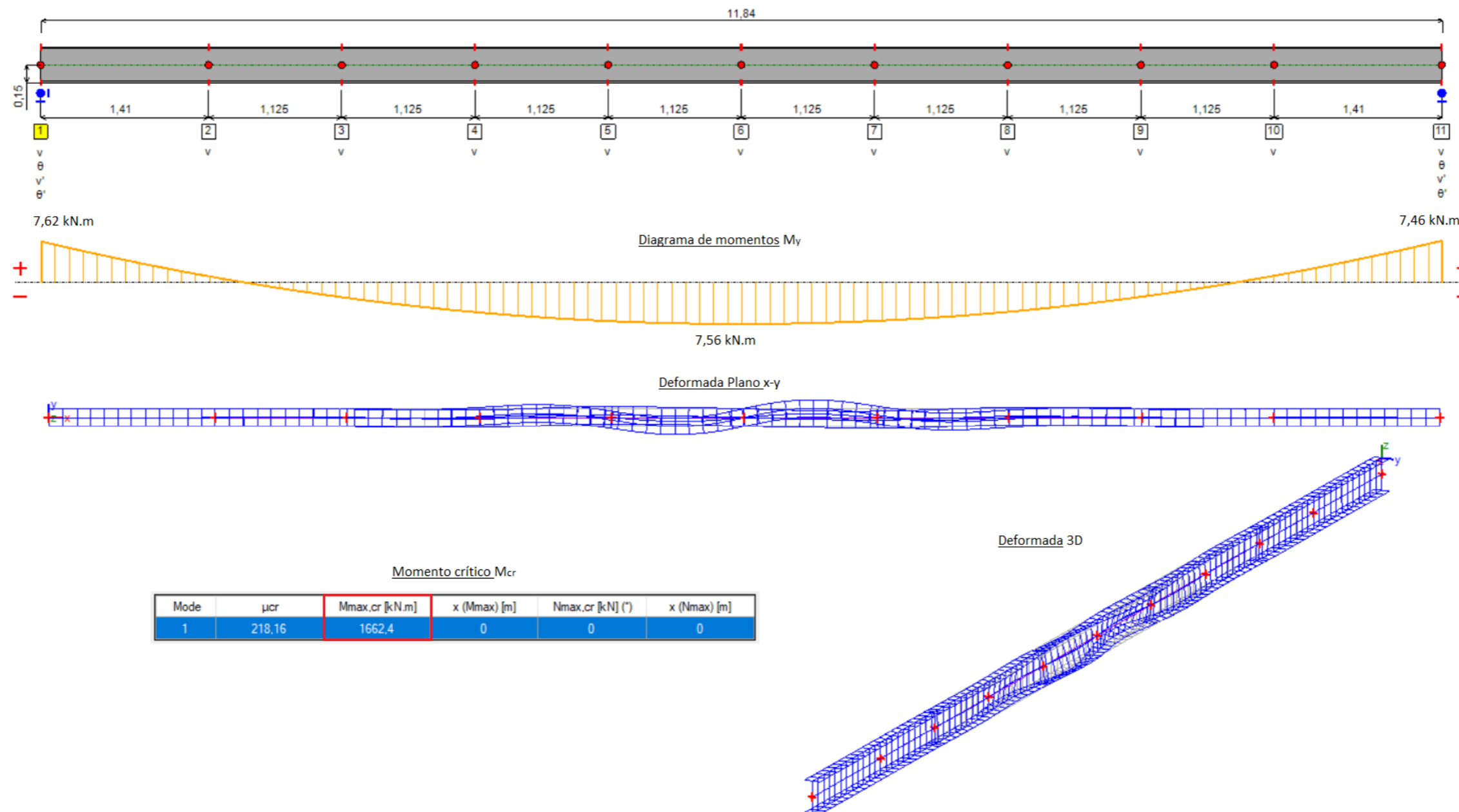


Figura 9.108 Determinação do momento crítico a partir do *software* “LTBeamN”.

- Verificação da resistência do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão através da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.120 Verificação da segurança à encurvadura lateral.

Perfil	M_{cr} (kN.m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$	Curva de encurvadura lateral	α_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ (KN.m)	$M_{y,Ed} / M_{b,Rd}$
IPE 300	1662,4	0,322	Calcular	b	0,34	0,956	165,18	0,046

À semelhança dos pilares treliçados dos alçados de topo, a estabilidade é garantida a partir da verificação das equações 9.12 e 9.13.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (9.12)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (9.13)$$

Nota: A verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão foi efetuada para o tramo da extremidade com maior momento fletor M_y e também com maior comprimento de encurvadura $L_{cr,z}$.

Tabela 9.121 Determinação dos coeficientes de momento uniforme C_{my} e C_{mLT} .

C_{my} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção z											C_{mLT} - Com base no diagrama de momentos M_y entre secções contraventadas segundo a direção y											
Perfil	Suscetível def. por torção?	L (m)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Forma do DMF	Carreg.	M_h (kN.m)	M_s (kN.m)	α_s	α_h	ψ	C_{my}	L (m)	$M_{y,Ed}$ (kN.m)	Forma do DMF	Carreg.	M_h (kN.m)	M_s (kN.m)	α_s	α_h	ψ	C_{mLT}	
IPE 300	Sim	11,84	-7,62	Parabólico	cu	-7,62	-					1,41	-7,62	Parabólico	cu	-7,62	-					
IPE 300	Sim	11,84	7,56	Parabólico	cu	-	7,56	0,992	-	0,979	0,894	1,41	-4,34	Parabólico	cu	-	-4,34	-0,570	-	0,169	0,556	
IPE 300	Sim	11,84	-7,46	Parabólico	cu	-7,46	-					1,41	-1,29	Parabólico	cu	-1,29	-					

Tabela 9.122 Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão.

Dimensionamento do elemento à encurvadura por flexão composta com compressão																					
Parâmetros de cálculo						Fatores de interação				Eq. 6.61		Eq. 6.62		Rácio Eq. 6.61		Rácio Eq. 6.62					
Perfil	χ_y	χ_z	χ_{LT}	N_{Rk} (kN.m)	$M_{y,Rk}$	k_{yy}	k_{yz}	k_{zy}	k_{zz}	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}$	$k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}$	$k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}}$						
IPE 300	0,60	0,89	0,96	1479,5	172,81	1,38	0,70	0,85	1,17												
IPE 300	0,60	0,89	0,96	1479,5	172,81	1,38	0,70	0,85	1,17	0,679	0,06	0,457	0,04	0,741	0,496						
IPE 300	0,60	0,89	0,96	1479,5	172,81	1,38	0,70	0,85	1,17												

- Conclusões

Tal como se verifica nos cordões dos pilares treliçados a verificação da resistência à encurvadura por flexão composta com compressão no *software* “SemiComp+” não foi considerada, tomando-se por base a folha de cálculo “Excel”.

Analisados os rácios de dimensionamento verifica-se que a resistência destes elementos é assegurada pelos perfis IPE 300.

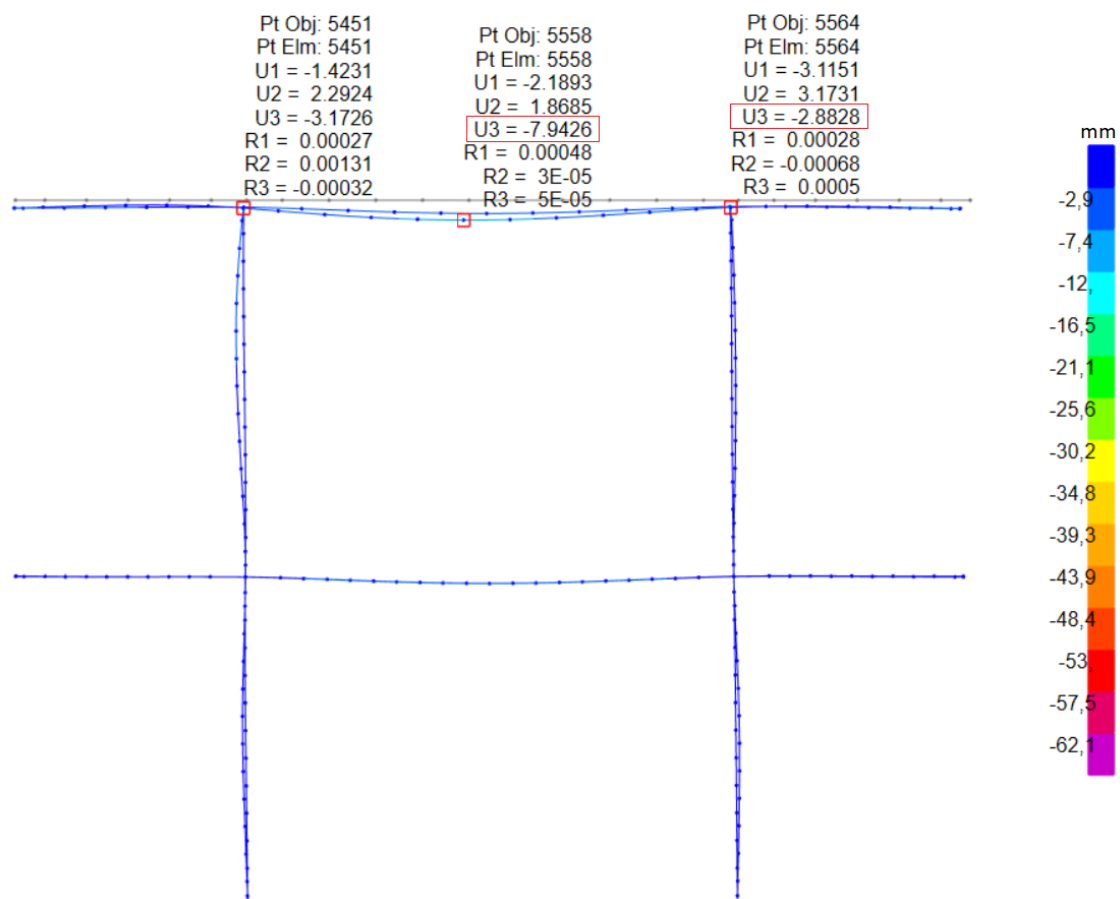


Figura 9.110 Flecha vertical máxima devido à combinação condicionante.

Tabela 9.124 Flecha máxima vertical devido à combinação condicionante.

Controlo da flecha máxima vertical (plano xz)					
Joint SAP	Combinação condicionante	Vão (m)	δ_{adm} (mm)	δ_v (mm)	Rácio
5558	ELS. (T-)_PR2B_Wx2	11,84	59,20	5,06	0,09

9.1.16 Dimensionamento das diagonais dos Pilares Treliçados

As diagonais dos pilares encontram-se sujeitas a esforços axiais de compressão/tração e foram dimensionadas como colunas para a combinação condicionante. A figura 9.112 mostra a diagonal mais esforçada.

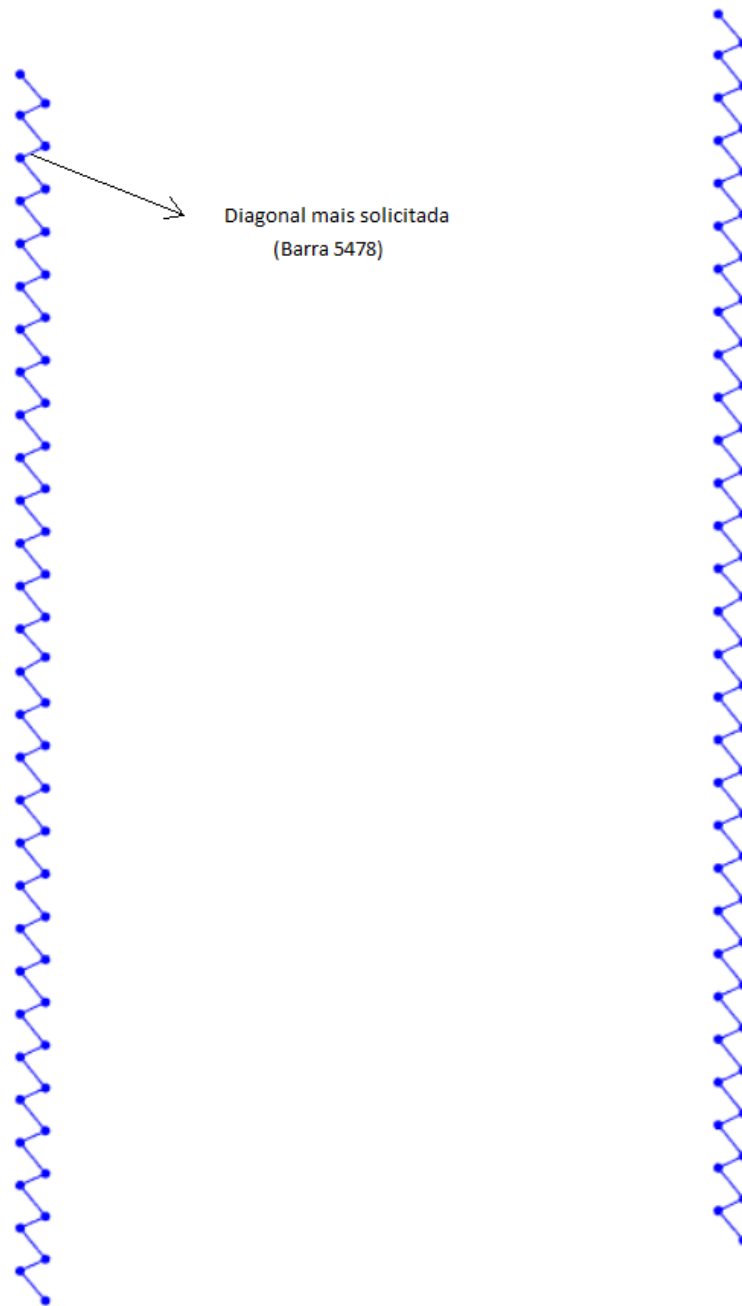


Figura 9.111 Diagonais dos pilares treliçados.

A informação seguinte reúne todos os elementos utilizados na verificação da segurança destas barras.

Tabela 9.125 Esforços axiais de cálculo.

Barra	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
5478	Compressão	ELU1.Wx1_PR2A	79,34

Dimensionamento aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

Tabela 9.126 Verificação da resistência das secções transversais.

Nº Barra	Esforço	Combinação Condicionante	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
5478	Compressão	ELU1.Wx1_PR2A	2L 70X7 // 240	79,34	517,00	0,15

Tabela 9.127 Verificação da resistência à encurvadura por compressão.

Diagonais dos pilares treliçados							
Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	Eixo y-y		Eixo z-z		Rácio
			$L_{cr,y}$ (m)	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd,min}}$ (kN)
5478	2L 70X7 // 240	79,34	0,96	517,00	0,96	452,20	0,18

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”.

```

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 5478 X Mid: -5,937 Combo: ELU1.Wx1_PR2A (TDesign Type: Brace
Length: 0,96 Y Mid: 0, Shape: 2L 70X7 Af 240 Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0, Z Mid: -5,787 Class: Class 3 Rolled : No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
Location Ned Med,yy Med,zz Ved,z Ved,y Ted
0, -79,346 0, 0, 0, 0,089 -0,046

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.1.1(1)-6.46)
D/C Ratio: 0,684 = 0,684 < 1, OK
= (NEd/Nb,Rd) (EC3 6.3.1.1(1)-6.46)

AXIAL FORCE DESIGN
Ned Nc,Rd Nt,Rd
Force Capacity Capacity
Axial -79,346 523,187 523,187

Npl,Rd Nu,Rd Ncr,T Ncr,TF An/Ag
523,187 589,014 150,921 150,921 1,

Curve Alpha Ncr LambdaBar Phi Chi Nb,Rd
Major (y-y) c 0,49 84900,667 0,079 0,473 1, 523,187
MajorB(y-y) c 0,49 84900,667 0,079 0,473 1, 523,187
Minor (z-z) c 0,49 1845,016 0,533 0,723 0,825 431,438
MinorB(z-z) c 0,49 1845,016 0,533 0,723 0,825 431,438
Torsional TF c 0,49 150,921 1,862 2,64 0,222 115,934

```

Figura 9.112 Verificação da resistência da barra 5478 aos ELU a partir do *software* “SAP2000”.

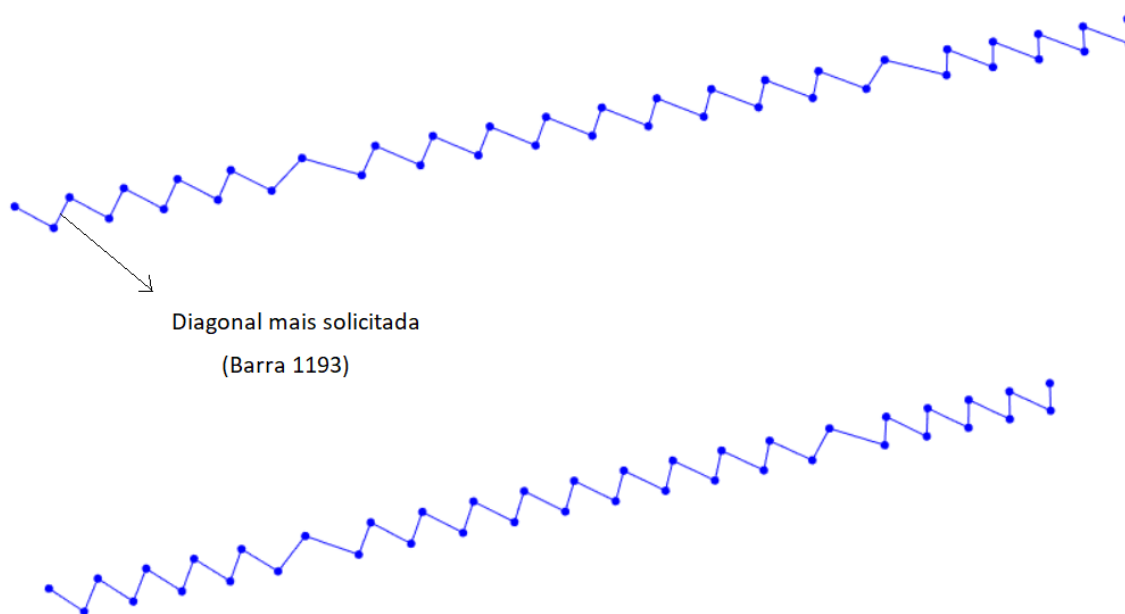
- Comparação de resultados

Tabela 9.128 Comparação dos resultados.

Resistência	Nº Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	5478	N_{Rd} (kN)	517,00	523,190	1,18
Elemento	5478	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	517,00	523,190	1,18
Elemento	5478	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	452,20	431,440	4,81

9.1.17 Dimensionamento das diagonais das vigas treliçadas

A figura 9.113 mostra a barra mais esforçada.

**Figura 9.113** Diagonais das vigas treliçadas.**Tabela 9.129** Esforço axial de cálculo na barra estudada.

Barra	Esforço	Combinação Condicionante	N_{Ed} (kN)
1193	Compressão	ELU1.Wx1_PR2A (T+)	147,89

Dimensionamento das barras aos Estados Limites Últimos

- Verificação da resistência aos ELU a partir da folha de cálculo “Excel”

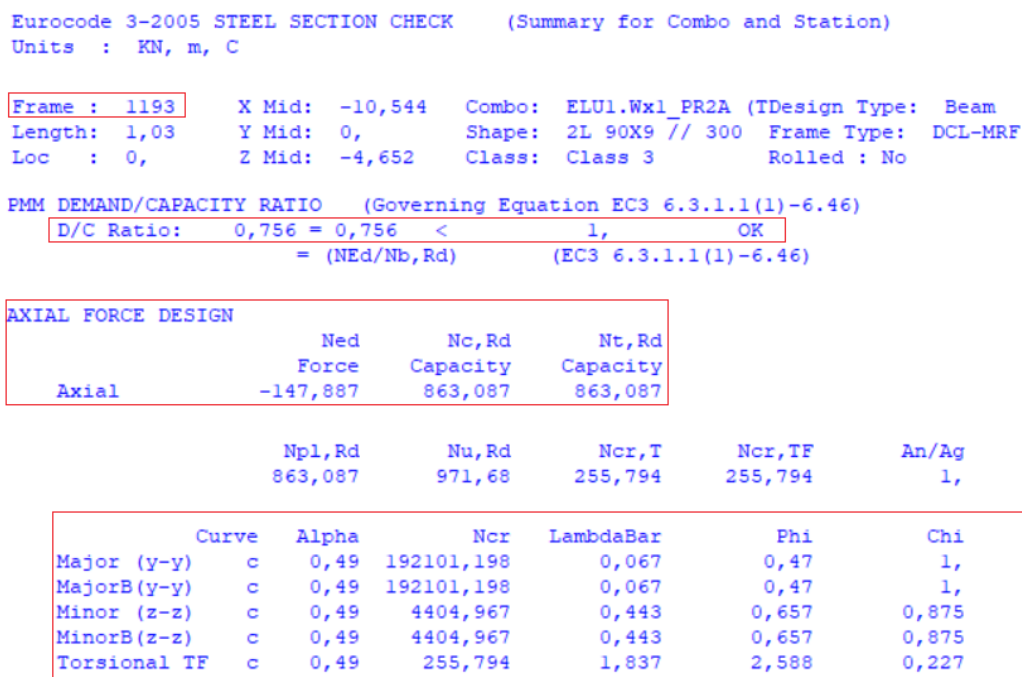
Tabela 9.130 Verificação da resistência das secções transversais.

Nº Barra	Esforço	Combinação Condicionante	Perfil	N_{Ed} (kN)	N_{Rd} (kN)	N_{Ed}/N_{Rd}
1193	Compressão	ELU1.Wx1_PR2A (T+)	2L 90X9 // 300	147,89	852,5	0,173

Tabela 9.131 Resistência à encurvadura por compressão - Barra 1193.

Diagonais das vigas treliçadas							
Nº Barra	Perfil	$N_{c,Ed}$	Eixo y-y		Eixo z-z		Rácio
			$L_{cr,y}$ (m)	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	$L_{cr,z}$ (m)	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	
1193	2L 90X9 // 300	147,89	1,03	852,50	1,03	777,76	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd,min}}$ (kN) 0,19

- Verificação da resistência aos ELU a partir do *software* “SAP2000”.

**Figura 9.114** Verificação da resistência da barra 1193 aos ELU a partir do *software* “SAP2000”.

- Comparação de resultados

Tabela 9.132 Comparação dos resultados.

Resistência	Nº Barra	Parâmetro	Folha de cálculo	SAP2000	Desvio (%)
Secção Transversal	1193	N_{Rd} (kN)	852,50	863,09	1,23
Elemento	1193	$N_{b,Rd,y}$ (kN)	852,50	863,09	1,23
Elemento	1193	$N_{b,Rd,z}$ (kN)	777,76	754,79	3,04

9.2 Ligações Metálicas

9.2.1 Ligações Soldadas

As ligações soldadas foram dimensionadas a partir dos ábacos da figura 9.115 e a partir da expressão 9.14.

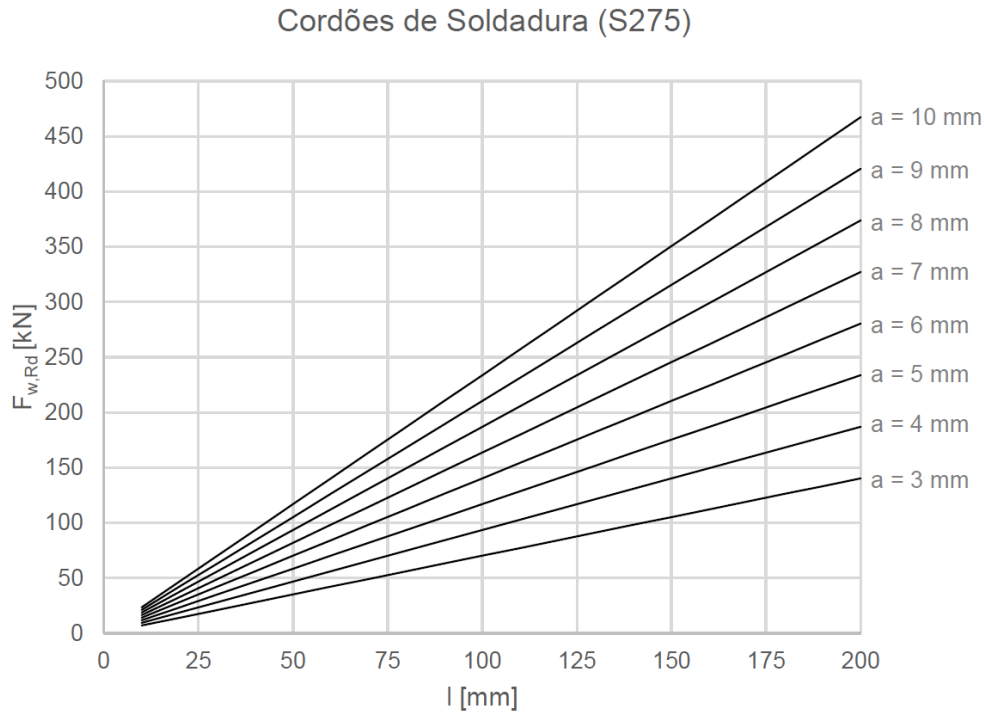


Figura 9.115 Ábaco de dimensionamento dos cordões de soldadura.

$$F_{W,Ed} \leq F_{W,Rd} = \frac{f_u}{B_w \times \sqrt{3} \times \gamma_{M2}} \times a \times L \quad (9.14)$$

Em que:

$F_{W,Ed}$ Valor de cálculo do esforço atuante na ligação soldada;

$F_{W,Rd}$ Valor de cálculo Resistente na ligação soldada;

B_w Fator de correlação em que se considerou 0,80 para um aço S235;

f_u Valor nominal da tensão de rutura do aço à tração da ligação soldada;

F_u Espessura do cordão de soldadura;

L Comprimento do cordão de soldadura.

A título de exemplo, mostra-se em seguida o dimensionamento das ligações soldadas nas barras das asnas, sendo que para o dimensionamento das soldaduras nos restantes elementos metálicos se procedeu de uma forma muito semelhante.

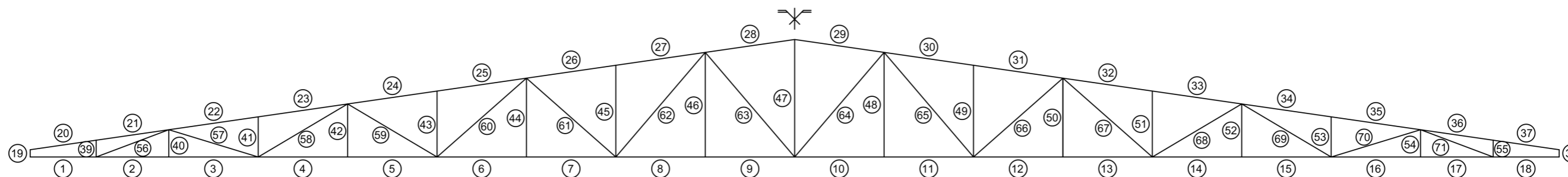


Figura 9.116 Numeração das barras das asnas da cobertura.

Tabela 9.133 Dimensionamento das Soldaduras de Ligação aos “Goussets” nas Diagonais e Prumos das asnas.

Barra	Perfil	$N_{Ed}(kN)$	$N_{Ed}/Cantoneira(kN)$	$f_u(N/mm^2)$	B_w	γ_{Mw}	Esp. do Gousset (mm)	Esp. da Cantoneira (mm)	a_{min} (mm)	a_{max} (mm)	a (mm)	L (mm)	$F_{w,Rd}$ (kN)	$\frac{F_{w,Ed}}{F_{w,Rd}}$	Solução (por Cantoneira)
56	2L 80X10 // 180	266,2	133,1	430	0,85	1,25	6	10	3	4,2	4	180	168,23	0,79	2 Cordões de ângulo 90 mm
57	2L 60X8 // 180	115,1	57,5	430	0,85	1,25	6	8	3	4,2	4	100	93,46	0,62	2 Cordões de ângulo 50 mm
58	2L 50X5 // 180	41,9	20,9	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,37	2 Cordões de ângulo 40 mm
59	2L 35X4 // 180	8,2	4,1	430	0,85	1,25	6	4	3	2,8	3	80	56,08	0,07	2 Cordões de ângulo 40 mm
60	2L 40X4 // 180	21,1	10,5	430	0,85	1,25	6	4	3	2,8	3	80	56,08	0,19	2 Cordões de ângulo 40 mm
61	2L 40X5 // 180	33,0	16,5	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,29	2 Cordões de ângulo 40 mm
62	2L 50X5 // 180	46,7	23,4	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,42	2 Cordões de ângulo 40 mm
63	2L 50X5 // 180	40,4	20,2	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,36	2 Cordões de ângulo 40 mm
64	2L 50X5 // 180	40,5	20,2	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,36	2 Cordões de ângulo 40 mm
65	2L 50X5 // 180	46,6	23,3	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,42	2 Cordões de ângulo 40 mm
66	2L 40X5 // 180	32,5	16,2	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,29	2 Cordões de ângulo 40 mm
67	2L 40X4 // 180	20,6	10,3	430	0,85	1,25	6	4	3	2,8	3	80	56,08	0,18	2 Cordões de ângulo 40 mm
68	2L 35X4 // 180	9,4	4,7	430	0,85	1,25	6	4	3	2,8	3	80	56,08	0,08	2 Cordões de ângulo 40 mm
69	2L 50X5 // 180	44,3	22,1	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,39	2 Cordões de ângulo 40 mm
70	2L 60X8 // 180	123,4	61,7	430	0,85	1,25	6	8	3	4,2	4	100	93,46	0,66	2 Cordões de ângulo 50 mm
71	2L 80X10 // 180	245,8	122,9	430	0,85	1,25	6	10	3	4,2	4	180	168,23	0,73	2 Cordões de ângulo 90 mm
40	2L 40X5 // 180	1,8	0,9	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,02	2 Cordões de ângulo 40 mm
41	2L 40X5 // 180	15,5	7,8	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,14	2 Cordões de ângulo 40 mm
42	2L 40X5 // 180	11,0	5,5	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,10	2 Cordões de ângulo 40 mm
43	2L 40X5 // 180	14,5	7,3	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,13	2 Cordões de ângulo 40 mm
44	4L 80X8 // 180	1,4	0,7	430	0,85	1,25	6	8	3	4,2	4	80	74,77	0,01	2 Cordões de ângulo 40 mm
45	2L 40X5 // 180	15,1	7,6	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,13	2 Cordões de ângulo 40 mm
46	2L 40X5 // 180	2,0	1,0	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,02	2 Cordões de ângulo 40 mm
47	2L 40X5 // 180	53,4	26,7	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,48	2 Cordões de ângulo 40 mm
48	2L 40X5 // 180	2,0	1,0	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,02	2 Cordões de ângulo 40 mm
49	2L 40X5 // 180	15,1	7,6	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,13	2 Cordões de ângulo 40 mm
50	4L 80X8 // 180	1,3	0,6	430	0,85	1,25	6	8	3	4,2	4	80	74,77	0,01	2 Cordões de ângulo 40 mm
51	2L 40X5 // 180	14,5	7,2	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,13	2 Cordões de ângulo 40 mm
52	2L 40X5 // 180	11,9	6,0	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,11	2 Cordões de ângulo 40 mm
53	2L 40X5 // 180	15,5	7,7	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,14	2 Cordões de ângulo 40 mm
54	2L 40X5 // 180	8,3	4,2	430	0,85	1,25	6	5	3	3,5	3	80	56,08	0,07	2 Cordões de ângulo 40 mm

Relativamente ao dimensionamento dos “goussets” de ligação aos cordões das asnas foi necessário determinar os esforços axiais e de corte nas barras que ligam aos “goussets”. Na figura 9.117 mostra-se a numeração adotada para os nós das asnas correspondentes aos goussets de ligação.



Figura 9.117 Numeração dos nós nas asnas da cobertura.

O dimensionamento dos goussets foi efetuado com base nas combinações de ações mais desfavoráveis e está resumido na tabela 9.134.

Tabela 9.134 Dimensionamento dos Gousset de ligação às cordas das asnas.

Nó	Esforços de Cálculo		Dimensões do Gousset				Características do aço		Tensão normal	Tensão normal admissível	Rácio	Tensão tangencial	Tensão de corte admissível	Rácio	Observações
	$N(kN)$	$V_{Ed}(kN)$	$L(mm)$	$h(mm)$	$e(mm)$	Área da secção resistente (mm^2)	$f_y(MPa)$	$f_u(MPa)$	$\sigma(Mpa)$	$\sigma_{adm}(Mpa)$		$\tau(MPa)$	$\tau_{adm}(MPa)$		
1	82,41	184,48	770	União com corda superior	6	4620	275	430	17,84	275	0,065	39,93	158,77	0,251	Verifica
2	1,27	0,00	200	50	6	1200	275	430	1,06	275	0,004	0,00	158,77	0,000	Verifica
3	0,78	101,30	420	80	6	2520	275	430	0,31	275	0,001	40,20	158,77	0,253	Verifica
4	1,91	0,00	140	60	6	840	275	430	2,27	275	0,008	0,00	158,77	0,000	Verifica
5	0,83	8,37	400	80	6	2400	275	430	0,34	275	0,001	3,49	158,77	0,022	Verifica
6	0,40	0,00	300	110	6	1800	275	430	0,22	275	0,001	0,00	158,77	0,000	Verifica
7	2,63	38,81	400	80	6	2400	275	430	1,10	275	0,004	16,17	158,77	0,102	Verifica
8	0,35	0,00	140	50	6	840	275	430	0,42	275	0,002	0,00	158,77	0,000	Verifica
9	0,09	0,07	400	150	6	2400	275	430	0,04	275	0,000	0,03	158,77	0,000	Verifica
10	11,51	1,62	778	União com corda inferior	6	4668	275	430	2,47	275	0,009	0,35	158,77	0,002	Verifica
11	7,80	268,17	340	80	6	2040	275	430	3,82	275	0,014	131,46	158,77	0,828	Verifica
12	10,89	1,53	140	60	6	840	275	430	12,97	275	0,047	1,82	158,77	0,011	Verifica
13	10,45	26,94	300	80	6	1800	275	430	5,81	275	0,021	14,97	158,77	0,094	Verifica
14	10,89	1,53	140	40	6	840	275	430	12,97	275	0,047	1,82	158,77	0,011	Verifica
15	11,27	15,25	365	150	6	2190	275	430	5,14	275	0,019	6,96	158,77	0,044	Verifica
16	11,29	1,59	120	80	6	720	275	430	15,68	275	0,057	2,20	158,77	0,014	Verifica
17	3,74	39,30	300	80	6	1800	275	430	2,08	275	0,008	21,84	158,77	0,138	Verifica
18	43,00	0,00	300	120	6	1800	275	430	23,89	275	0,087	0,00	158,77	0,000	Verifica

Nota: Alguns dos rácios que constam na tabela 9.134 apresentam valores muito reduzidos uma vez que as tensões são pouco significativas, pelo que o dimensionamento destes elementos baseou-se em princípios meramente construtivos, de forma a que fosse possível cumprir com os comprimentos de soldadura anteriormente calculados.

Juntam-se alguns exemplos de ligações soldadas que foram também modeladas no *software* “Autocad Advance Steel”.

1. Ligações soldadas aos goussets das asnas e vigas de travamento da cobertura.

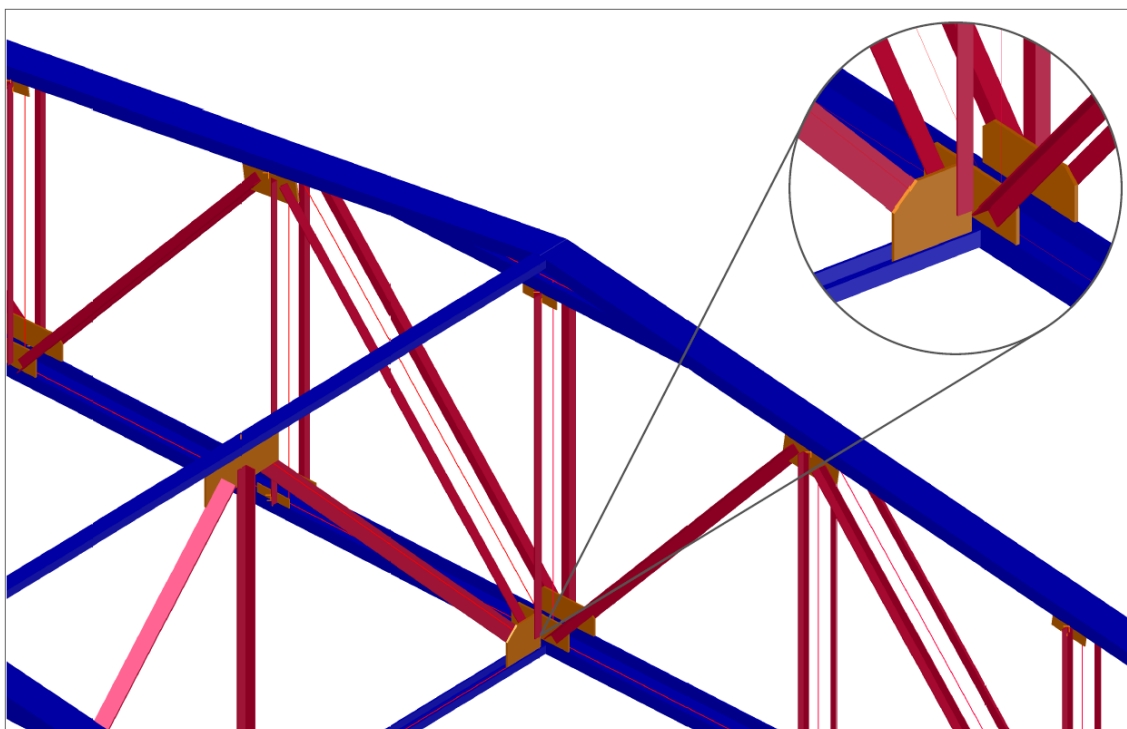


Figura 9.118 Ligações soldadas das diagonais e prumos aos goussets das asnas e das vigas de travamento.

2. Ligações soldadas aos goussets das vigas treliçadas.

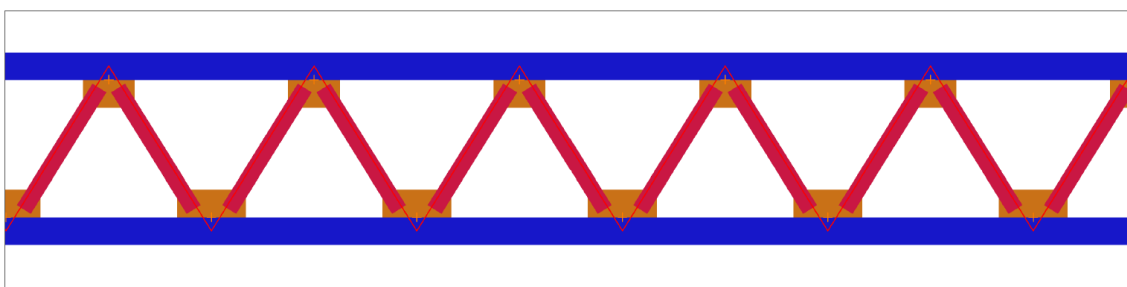


Figura 9.119 Ligações soldadas das diagonais e prumos aos gousset das vigas treliçadas.

Nota: As ligações metálicas compostas por parafusos e que incluem também soldaduras, constam do subcapítulo seguinte.

9.2.2 Ligações Aparafusadas

As ligações aparafusadas foram dimensionadas no *software* “Autocad Advance Steel” com base nas combinações condicionantes aos Estados Limites Últimos. Juntam-se algumas das ligações estudadas neste *software* acompanhadas de imagens tridimensionais elucidativas dessas mesmas ligações. Os relatórios de dimensionamento destas ligações constam do Anexo II do presente projeto.

1. Ligação rígida Viga-Pilar no nível superior do alçado de topo Norte

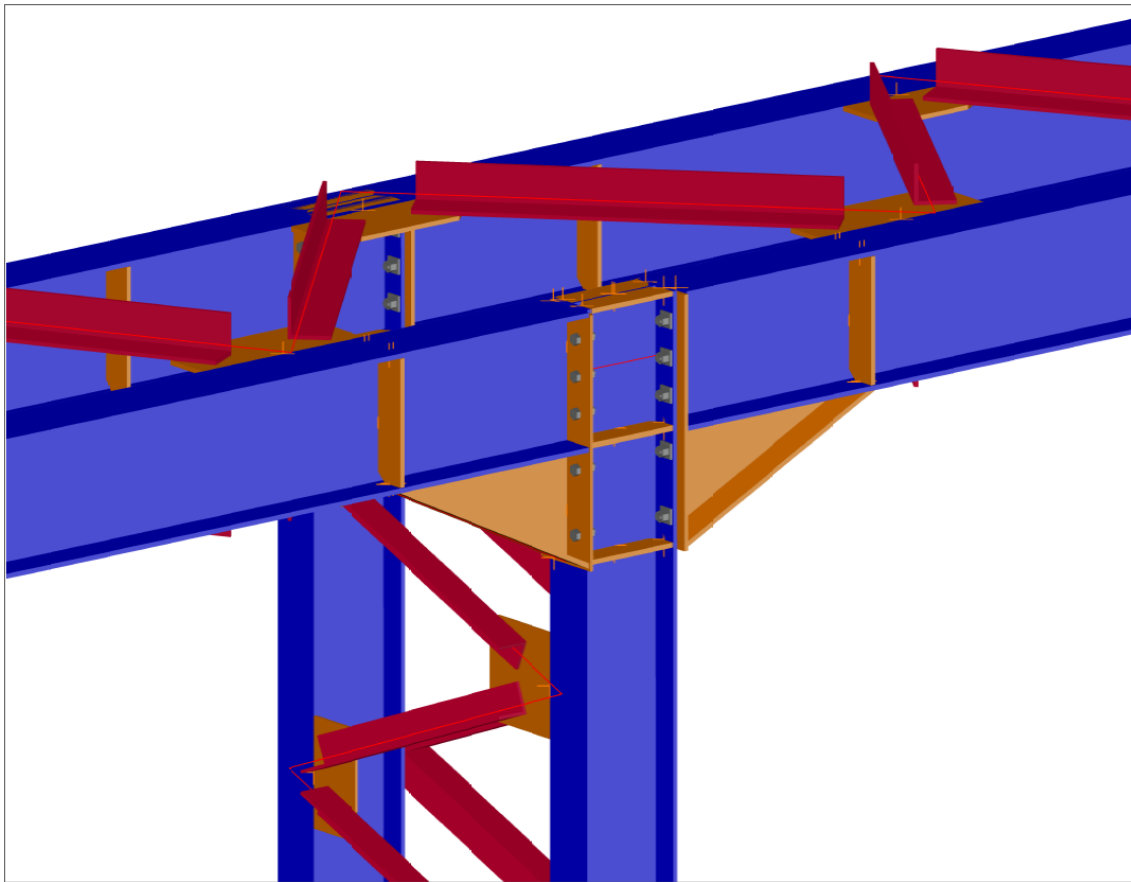


Figura 9.120 Ligação Viga-Pilar.

Advance Steel Knee of frame bolted, with haunch

Properties

Properties

Library

Joint design

General

Bolts & Welds

Stiffeners

Design forces

Design EC3

Node Properties... Settings

M (kNm)	N (kN)	V (kN)
7.6	-602.3	4.9

Use load cases Forces >>

Design Options

Check

Presize

Automatic checking

Status: **OK Checked**

No failed verifications

Report...

Import

Export

Update now! Automatic Approval status Not Set **OK Checked**

Figura 9.121 Verificação da resistência da ligação aos Estados Limites Últimos.

2. Ligação rígida Viga-Pilar no nível inferior do alçado de topo Norte

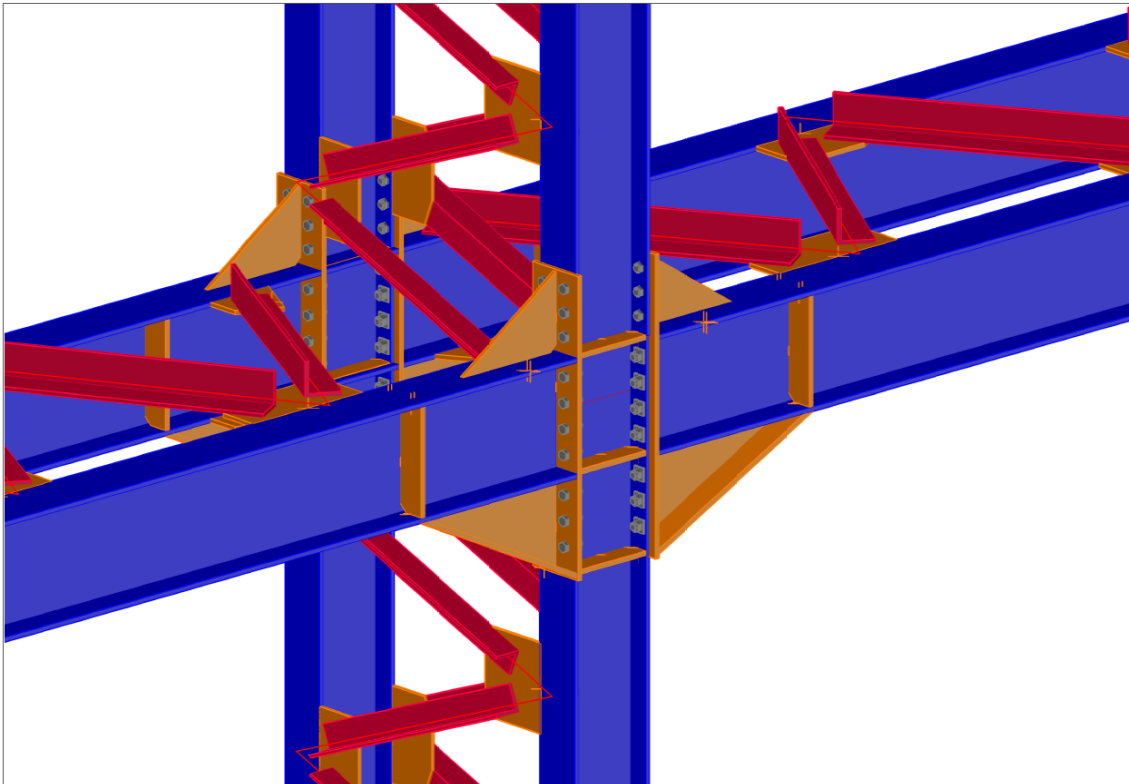


Figura 9.122 Ligação Viga-Pilar.

Advance Steel Knee of frame bolted, with haunch

Properties

Design forces

Design

Node Properties... Settings

M (kNm)	N (kN)	V (kN)
0.0	-270.0	-1.0

Use load cases Forces >>

Design Options

Check Presize

Automatic checking

Status: **OK Checked**

No failed verifications

Report...

Import Export

Update now! Automatic Approval status Not Set **OK Checked**

Figura 9.123 Verificação da resistência da ligação aos Estados Limites Últimos.

3. Ligação aos Plintos de Betão

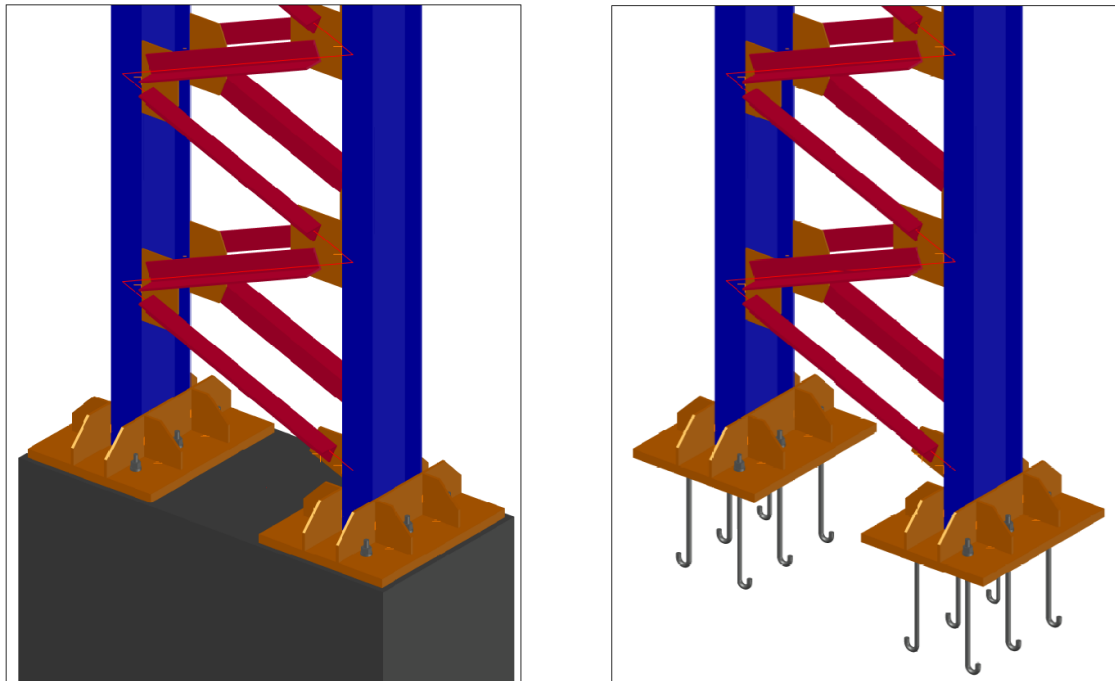


Figura 9.124 Ligação dos pilares aos plintos de betão.

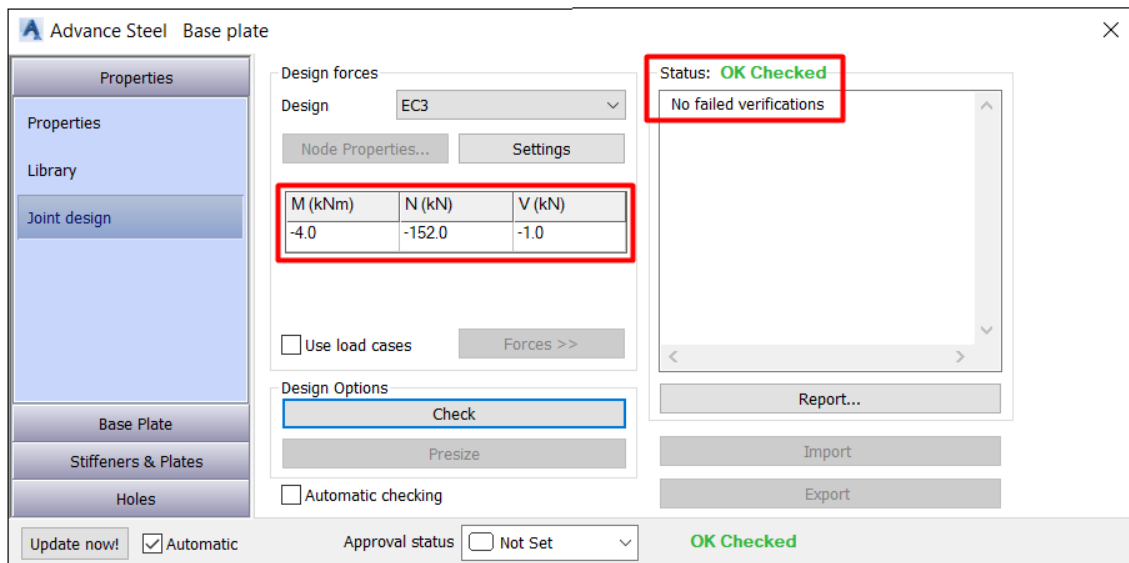


Figura 9.125 Verificação da ligação aos Estados Limites Últimos.

4. Ligações nos elementos de contraventamento

Apresentam-se, também, outros pormenores de ligações aparafusadas em diversos elementos de contraventamento das estruturas do hangar.

- Pormenores das ligações dos contraventamentos das madres dos alçados de topo

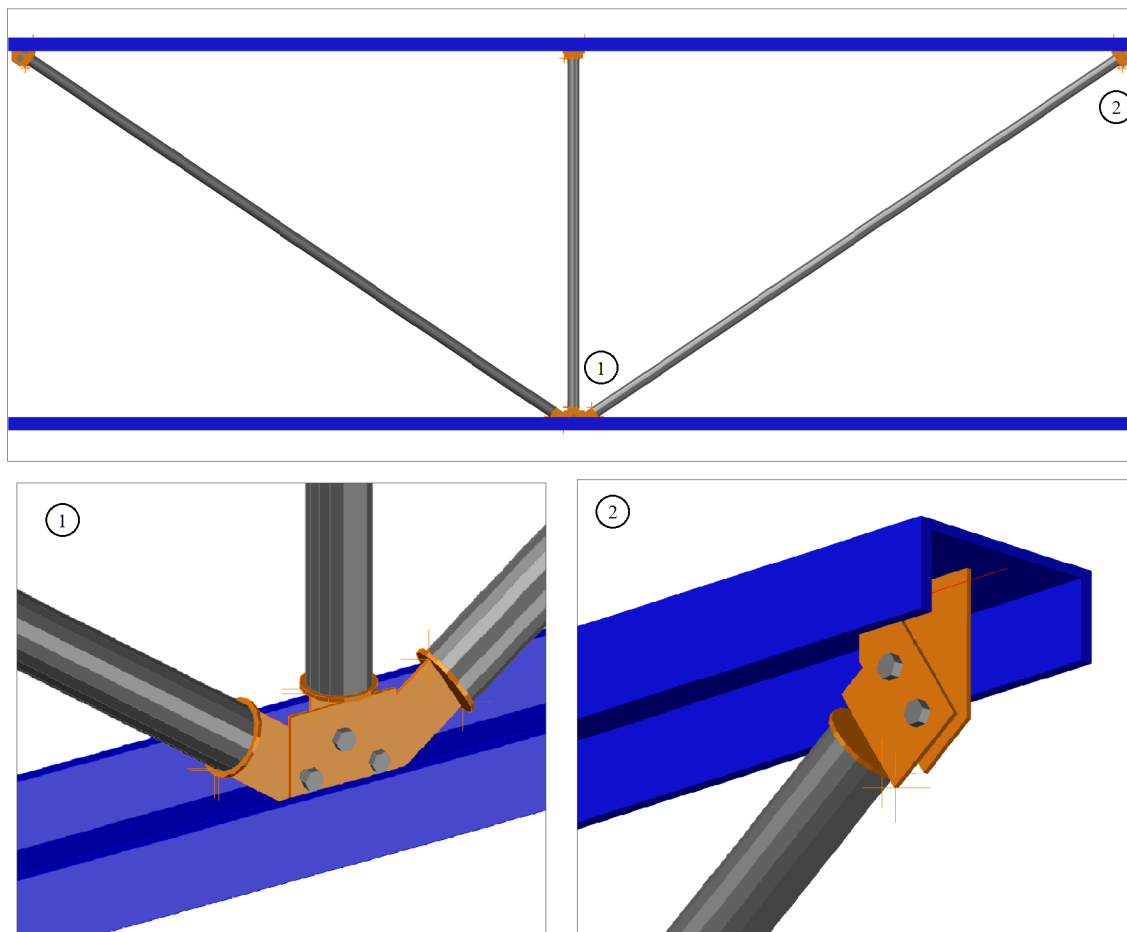


Figura 9.126 Ligações aparafusadas nos elementos de contraventamento das madres.

- Pormenores das ligações das madres dos alçados de topo aos pilares treliçados

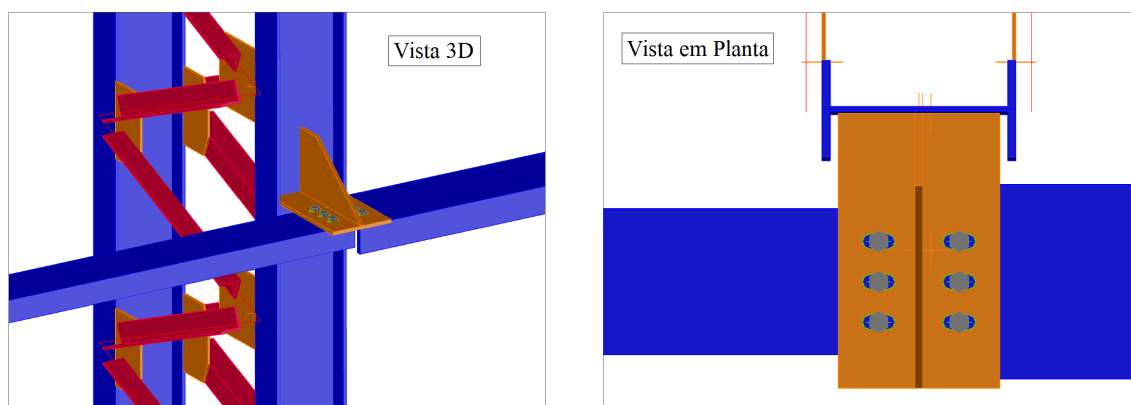


Figura 9.127 Pormenores das ligações das madres aos pilares.

- Pormenor das ligações dos travamentos das cordas superiores das asnas

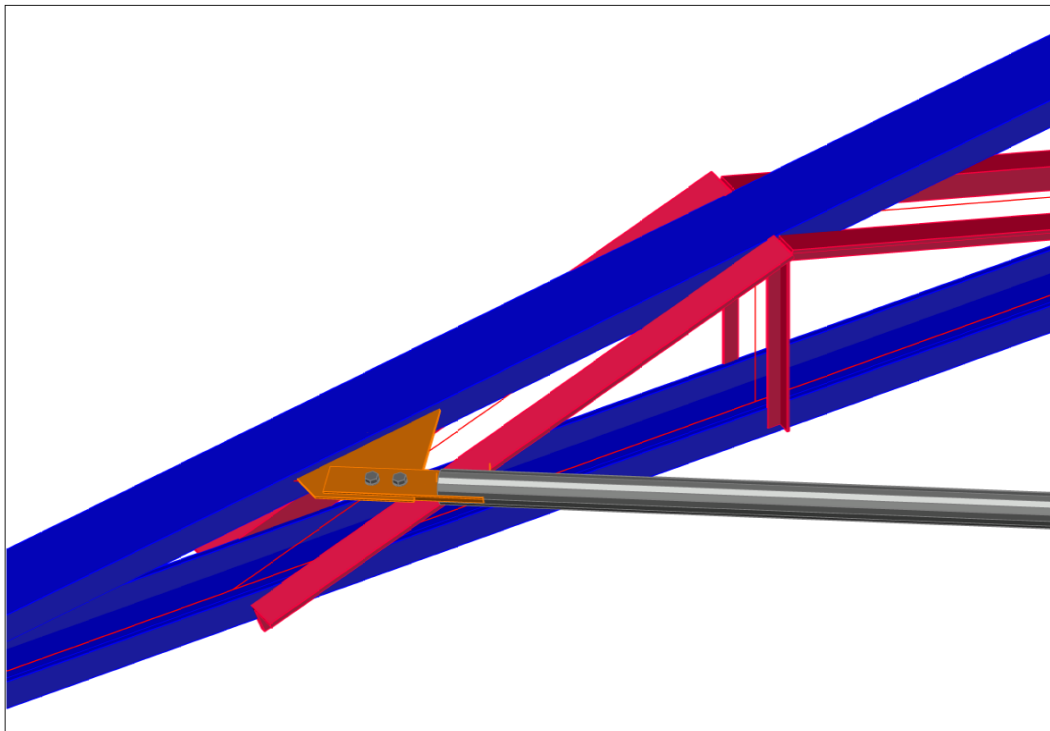


Figura 9.128 Pormenor das ligações dos travamentos das cordas.

- Pormenor das ligações dos travamentos das cordas inferiores das asnas

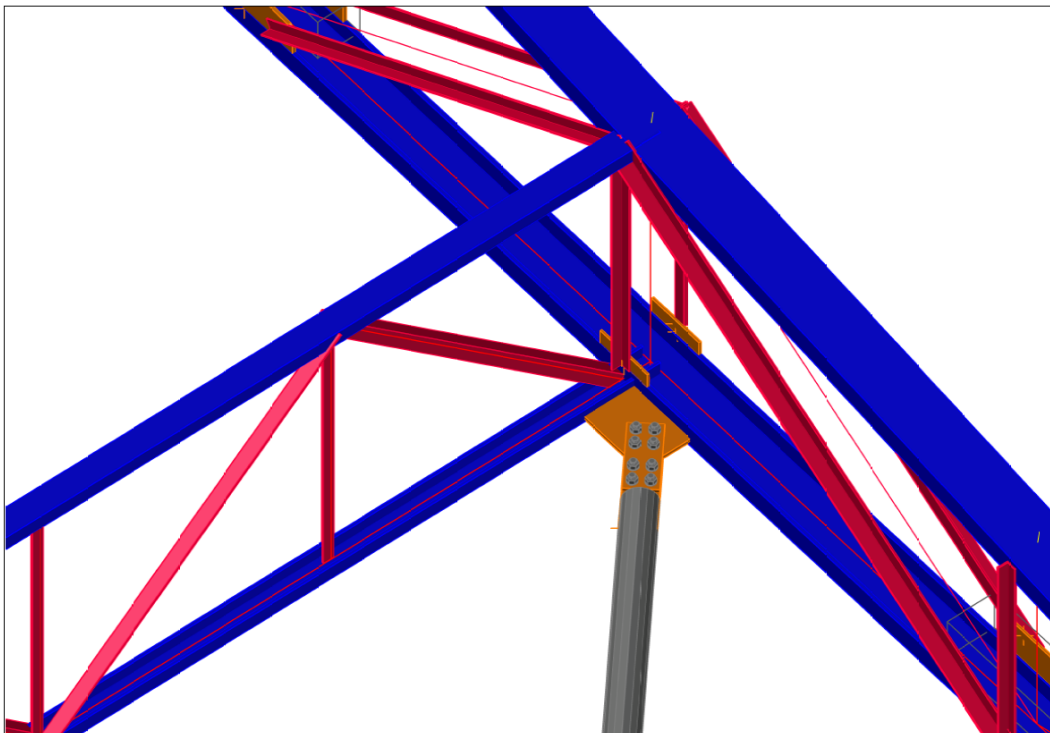


Figura 9.129 Pormenor das ligações dos travamentos das cordas.

9.3 Dimensionamento dos Elementos de Betão Armado

9.3.1 Pilares

Na figura 9.130 encontram-se identificadas as diferentes secções que constituem os pilares de betão armado do pórtico tipo.

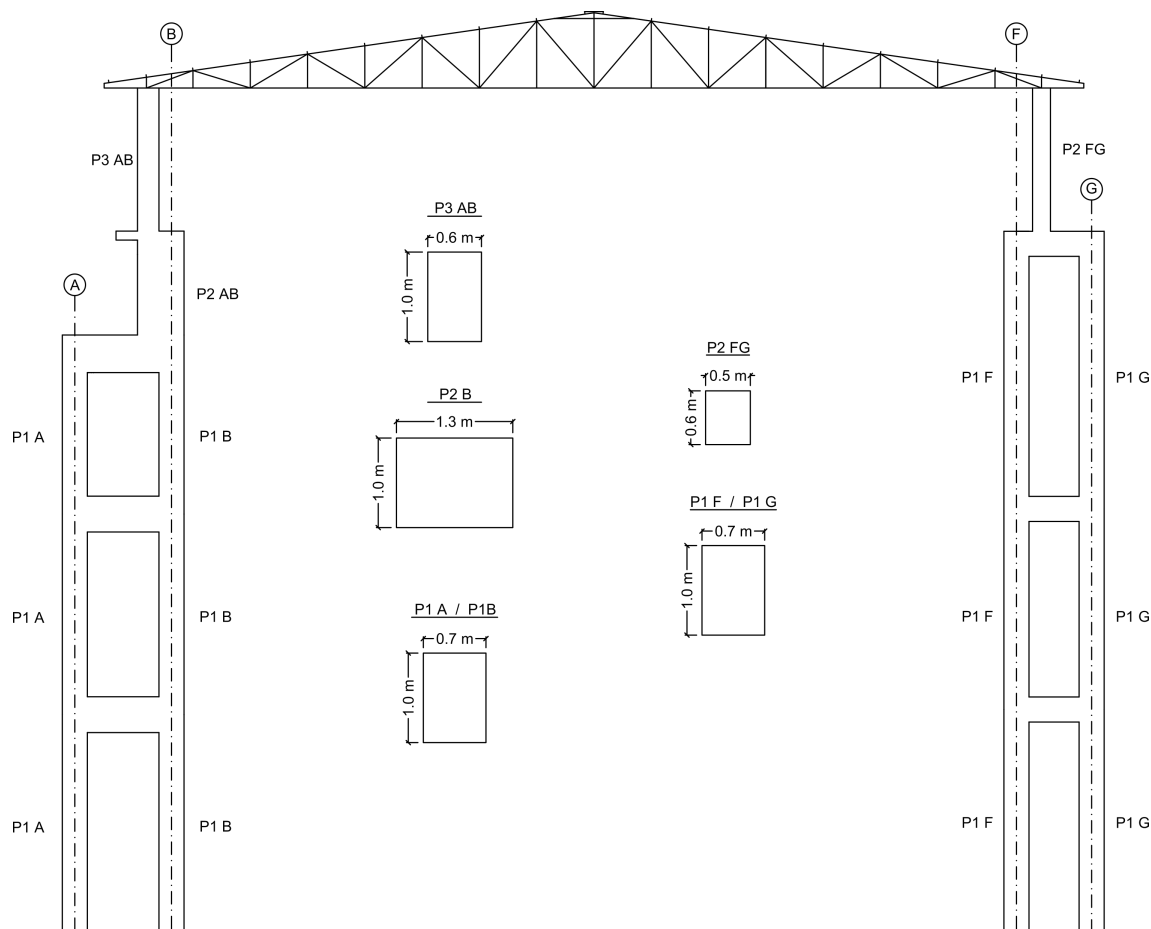


Figura 9.130 Identificação das secções dos pilares.

Na tabela 9.135 resume-se a geometria das secções, assim como as características dos materiais empregues no dimensionamento destes elementos.

Tabela 9.135 Geometria dos pilares e características dos materiais.

Pilar	h (m)	b (m)	Betão	Aço
P1A	1,0	0,7	C30/37	A500 NR
P1B	1,0	0,7		
P2AB	1,0	1,3		
P3AB	1,0	0,6		
P1F	1,0	0,7	$f_{ctm} = 3,9 \text{ MPa}$	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
P1G	1,0	0,7	$f_{cd} = 20 \text{ MPa}$	$f_{yd} = 435 \text{ MPa}$
P2FG	0,6	0,5		

A verificação das secções dos pilares foi efetuada à flexão composta desviada, a partir do *software* “Gala Reinforcement”, com base no traçado das envolventes resistentes das secções previamente definidas para as combinações de ações condicionantes.

Dimensionamento dos Pilares aos Estados Limites Últimos

Secções P1 - Alinhamentos A,B,F e G

Na figura 9.131 encontram-se representados os ábacos de dimensionamento para as secções dos pilares P1 dos alinhamentos A,B,F e G.

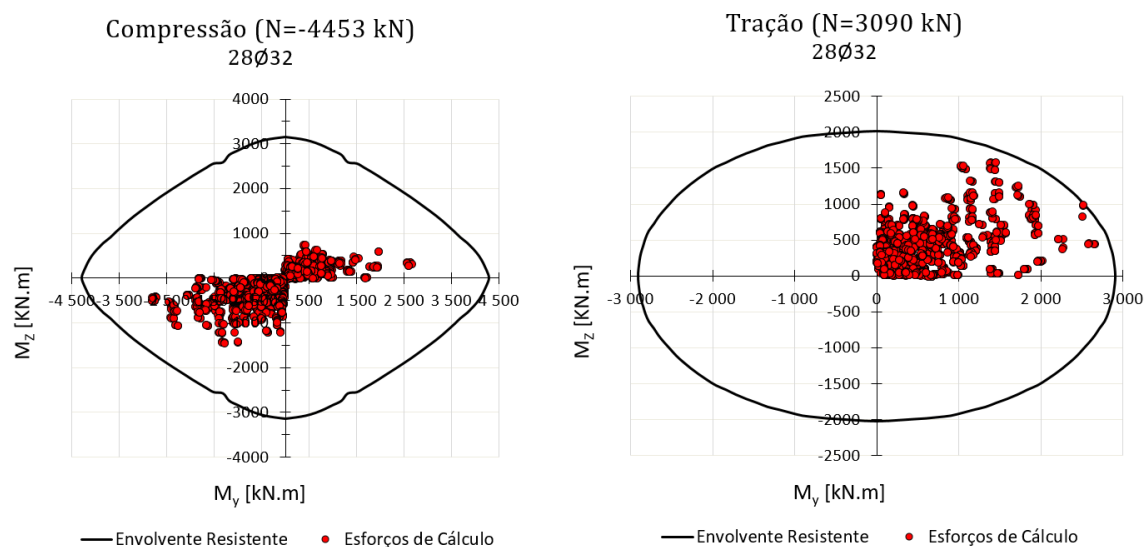


Figura 9.131 Ábacos de flexão composta com compressão / tração.

O dimensionamento das armaduras de flexão nas secções P1 dos alinhamentos A,B,F e G dos pilares de betão armado encontra-se resumido na tabela 9.136.

Tabela 9.136 Armaduras longitudinais - Secções P1 (alinhamentos A,B,F e G).

P1 AB + P1 FG		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares		
b (m)	h (m)	Solução	A_s (cm ²)	S (mm)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,max}$ (cm ²)	S_{min} (mm)
0,7	1	28φ32	225,1	105	14,00	280,00	32

Na tabela 9.137 estão indicadas as armaduras de esforço transversal das secções P1.

Tabela 9.137 Armaduras transversais nas secções P1 (alinhamentos A,B,F e G).

Armaduras de Esforço Transverso							
V_{Ed} (kN)	(A_{sw}/S) (cm ² /m)	Nº ramos	$(A_{sw}/S)_{ramo}$ (cm ² /m)	Solução	$(A_{sw}/S)_{calc.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{min.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{max.}$ (cm ² /m)
348,5	9,4	4	2,36	φ 8//0.20	10	6,1	85,0

Secções P2 AB

A figura seguinte refere-se aos ábacos de dimensionamento das secções P2 AB.

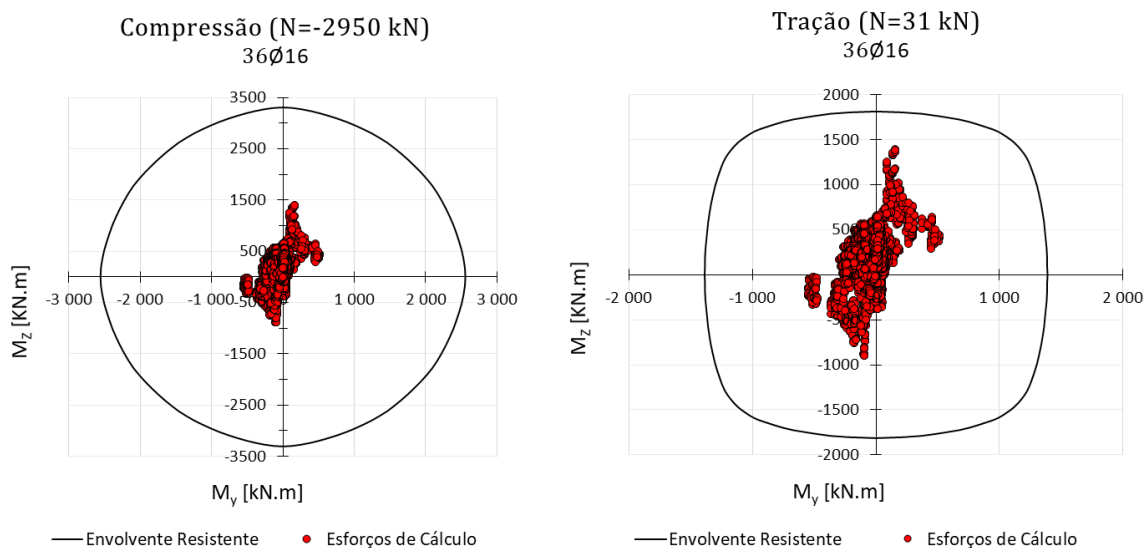


Figura 9.132 Ábacos de flexão composta com compressão / tração - Secções P2 AB.

As armaduras de flexão das secções dos pilares constam da tabela 9.138.

Tabela 9.138 Armaduras longitudinais nos pilares P2 AB.

P2 AB		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares		
b (m)	h (m)	Solução	A_s (cm ²)	S (mm)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,max}$ (cm ²)	S_{min} (mm)
1,3	1	36Ø16	72,4	118	26,00	520,00	25

Relativamente às armaduras de esforços transversos o dimensionamento apresenta-se na tabela 9.139.

Tabela 9.139 Armaduras transversais nos pilares P2 AB.

Armaduras de Esforço Transverso							
V_{Ed} (kN)	(A_{sw}/S) (cm ² /m)	Nº ramos -	$(A_{sw}/S)_{ramo}$ (cm ² /m)	Solução -	$(A_{sw}/S)_{calc.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{min.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{max.}$ (cm ² /m)
403,8	11,4	4	2,85	Ø 8/0.175	11,44	11,4	157,8

Secções P3 AB

Relativamente às secções P3 AB, os resultados do dimensionamento para os esforços das combinações condicionantes constam dos ábacos da figura 9.133.

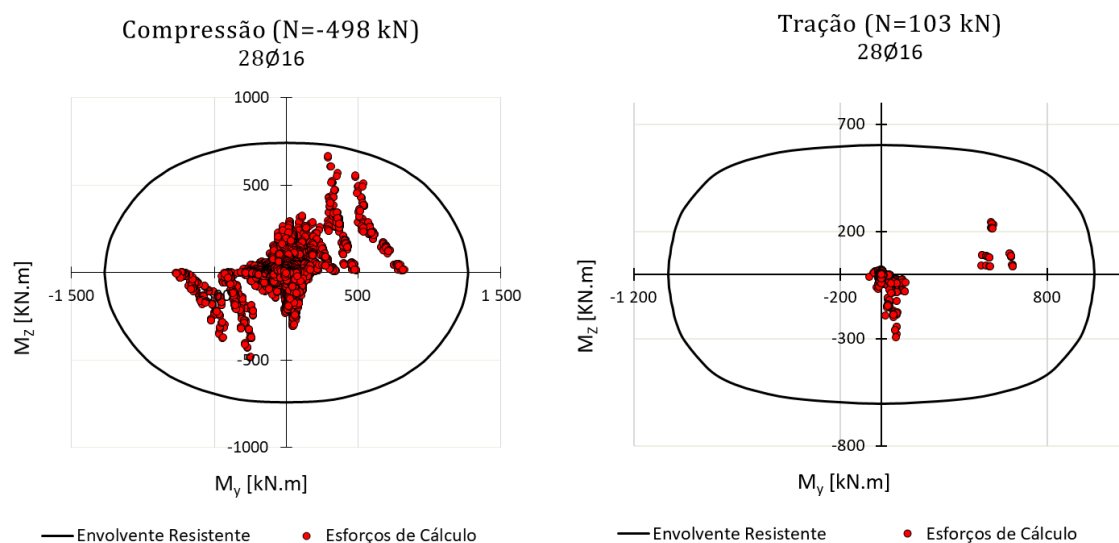


Figura 9.133 Ábacos de flexão composta com compressão / tração - secções P3 AB.

Na tabela 9.140 indicam-se as armaduras de flexão dos pilares P3 AB.

Tabela 9.140 Armaduras longitudinais - secções P3 AB.

P3 AB		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares		
b (m)	h (m)	Solução	A_s (cm ²)	S (mm)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,max}$ (cm ²)	S_{min} (mm)
0,6	1	28Ø16	56,3	103	12,00	240,00	25

Em relação às armaduras de esforço transverso a tabela 9.141 resume os resultados do dimensionamento.

Tabela 9.141 Armaduras transversais nas secções P3 AB dos pilares de betão armado.

V_{Ed} (kN)	(A_{sw}/S) (cm ² /m)	Nº ramos	$(A_{sw}/S)_{ramo}$ (cm ² /m)	Solução	$(A_{sw}/S)_{calc.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{min.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{max.}$ (cm ² /m)
48,9	5,3	4	1,31	Ø 8//0.25	8	5,3	72,8

Secções P2 FG

Nos ábacos seguintes incluem-se os resultados do cálculo das armaduras longitudinais nas secções mais solicitadas.

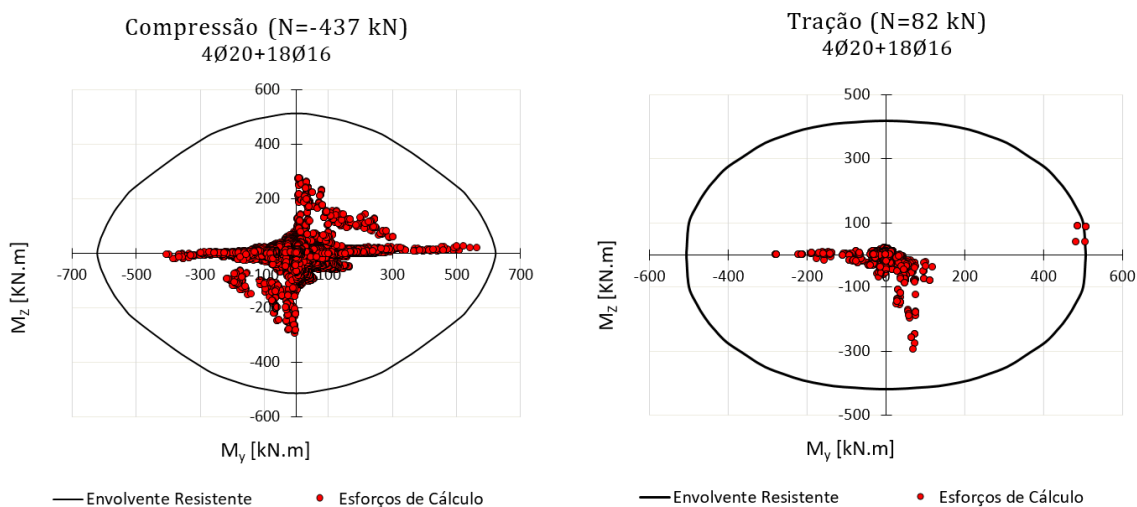


Figura 9.134 Ábacos de flexão composta com compressão / tração - secções P2 FG.

Na tabela 9.142 indicam-se os resultados que conduziram às armaduras longitudinais dos pilares P2 FG.

Tabela 9.142 Armaduras longitudinais nos pilares P2 FG.

Pilar P2 FG		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares		
b (m)	h (m)	Solução	A_s (cm ²)	S (mm)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,max}$ (cm ²)	S_{min} (mm)
0,5	0,6	4Ø20 + 18Ø16	48,7	95	6,00	120,00	25

As armaduras de esforço transversal dos pilares P2 FG constam da tabela 9.143.

Tabela 9.143 Armaduras transversais dos pilares P2 FG.

Armaduras de Esforço Transverso							
V_{Ed} (kN)	(A_{sw}/S) (cm ² /m)	Nº ramos -	$(A_{sw}/S)_{ramo}$ (cm ² /m)	Solução -	$(A_{sw}/S)_{calc.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{min.}$ (cm ² /m)	$(A_{sw}/S)_{max.}$ (cm ² /m)
138,1	6,4	4	1,60	Ø 8//0.25	8	4,4	60,7

Dimensionamento dos Pilares aos Estados Limites de Serviço

Controlo da Fendilhação

O controlo da fendilhação nos pilares foi analisado com recurso ao *software* “Gala Reinforcement” para as combinações mais desfavoráveis dos Estados Limites de Serviço. Tendo em consideração que estes elementos se encontram sujeitos a uma classe de exposição XC4, a fendilhação encontra-se verificada sempre que a largura de fendas W_k seja inferior ao valor limite W_{max} , que nestes casos toma o valor de 0,3 mm.

- Secções P1 - Alinhamentos A,B,F e G

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	-698	-305	263	L1	1	0.16	-0.24	92.212	0.01436	0.02441	0.02818
L2	-757	-238	-43.9	L2							No cracks
L3	-585	-174	307	L3	1	0.14	-0.22	96.446	0.01362	0.02315	0.02675

Figura 9.135 Controlo da Fendilhação nas Secções P1.

- Secções P2 AB

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	-543	-187	123	L1							No cracks
L2	-632	72	125	L2							No cracks
L3	-157	170	87	L3							No cracks

Figura 9.136 Controlo da Fendilhação nas Secções P2 AB.

- Secções P3 AB

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	-209	54	211	L1	9	0.44	-0.29	121.397	0.05374	0.09136	0.10184
L2	-107	40	69	L2							No cracks
L3	-58	16	9	L3							No cracks

Figura 9.137 Controlo da Fendilhação nas Secções P3 AB.

- Secções P2 FG

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	-103	8	-82	L1	3	0.18	-0.19	74.661	0.01376	0.02340	0.02695
L2	-153	41	-6	L2	3	0.03	-0.08	80.825	0.00274	0.00466	0.00554
L3	-165	196	16	L3	2	0.70	-0.39	72.216	0.05062	0.09606	0.09690

Figura 9.138 Controlo da Fendilhação nas Secções P2 FG.

Verifica-se, pois, que os valores calculados para a abertura das fendas é para todos os casos inferior aos definidos pelo EC2.

9.3.2 Vigas

Na figura 9.139 encontram-se identificadas as secções das vigas do pórtico tipo.

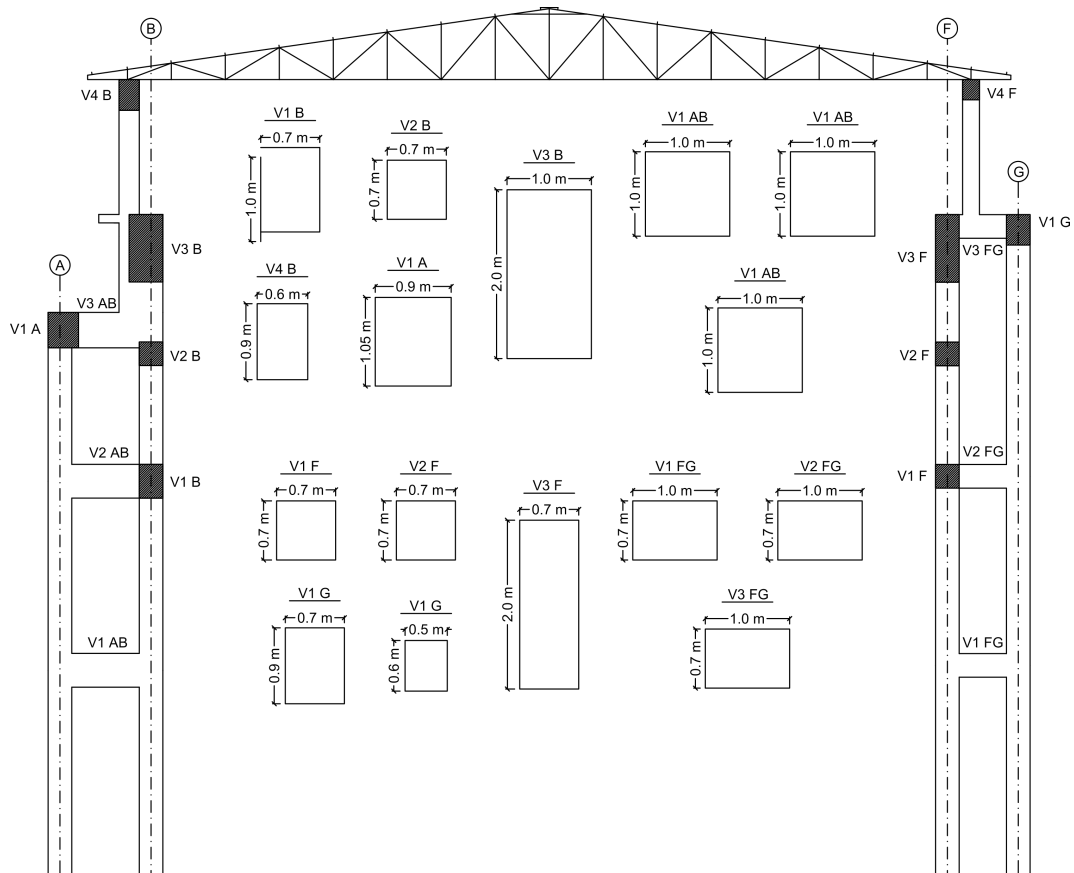


Figura 9.139 Identificação das vigas e secções.

Tabela 9.144 Geometria das vigas e características dos materiais.

Vigas	h (m)	b (m)	Betão	Aço
V1B	1,0	0,7	C30/37	A500 NR
V1A	1,05	0,9		
V2B	0,7	0,7		
V3B	2,0	1,0		
V4B	1,0	0,6		
V1F	0,7	0,7		
V2F	0,7	0,7		
V3F	2,0	0,7		
V1G	0,9	0,7		
V4F	0,6	0,5		
V1AB	1,0	1,0	$f_{ctm} = 3,9 \text{ Mpa}$	$f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$
V2AB	1,0	1,0	$f_{cd} = 20 \text{ Mpa}$	$f_{yd} = 435 \text{ Mpa}$
V3AB	1,05	1,0		
V1FG	0,7	1,0		
V2FG	0,7	1,0		
V3FG	0,7	1,0		

Dimensionamento das Vigas aos Estados Limites Últimos

O dimensionamento das vigas de betão armado foi efetuado com base nas envolventes máximas dos esforços de cálculo M3 e V2 retirados do programa de cálculo “SAP2000”. As armaduras longitudinais e transversais foram calculadas com recurso a uma folha de cálculo desenvolvida em “Excel” com base nas expressões do EC2.

Dimensionamento das Armaduras Longitudinais nas Secções dos Apoios

As combinações condicionantes nas secções dos apoios são geralmente as combinações associadas às ações sísmicas. Na tabela 9.145 resumem-se os resultados dos cálculos para as armaduras longitudinais das vigas nas secções dos apoios.

Tabela 9.145 Armaduras de flexão nas secções dos apoios.

Armaduras Longitudinais nas vigas de betão armado - Secções dos apoios.									
Viga	ELU	$M_{Ed,máx}$ (kN.m)	h (m)	b (m)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,máx}$ (cm ²)	$A_{s,cal}$ (cm ²)	Armaduras adotadas	$A_{s,adot}$ (cm ²)
V1B	ELU máx (-)	-2964,4	1,0	0,7	10,0	280,0	83,1	2 x 9φ25	88,4
V1B	ELU máx (+)	2738,0	1,0	0,7	10,0	280,0	75,7	2 x 8φ25	78,6
V1A	ELU máx (-)	-350,5	1,05	0,9	13,6	378,0	13,6	5φ20	15,7
V1A	ELU máx (+)	328,9	1,05	0,9	13,6	378,0	13,6	5φ20	15,7
V2B	ELU máx (-)	-1105,3	0,7	0,7	6,9	196,0	43,7	8φ25 + 2 φ20	45,6
V2B	ELU máx (+)	977,9	0,7	0,7	6,9	196,0	38,1	8φ25	39,3
V4B	ELU máx (-)	-696,7	1,0	0,6	7,7	216,0	19,6	7φ20	19,8
V4B	ELU máx (+)	529,4	1,0	0,6	7,7	216,0	14,7	5φ20	15,7
V1F	ELU máx (-)	-1250,7	0,7	0,7	6,9	196,0	50,3	8φ25 + 4φ20	51,8
V1F	ELU máx (+)	1099,3	0,7	0,7	6,9	196,0	43,4	8φ25 + 2 φ20	45,6
V2F	ELU máx (-)	-728,8	0,7	0,7	6,9	196,0	27,5	9φ20	28,3
V2F	ELU máx (+)	593,1	0,7	0,7	6,9	196,0	22,1	8φ20	25,1
V1G	ELU máx (-)	-618,0	0,9	0,7	9,0	252,0	17,2	6φ20	18,8
V1G	ELU máx (+)	526,0	0,9	0,7	9,0	252,0	14,6	5φ20	15,7
V4F	ELU máx (-)	-280,0	0,6	0,5	4,2	120,0	12,3	4φ20	12,6
V4F	ELU máx (+)	232,6	0,6	0,5	4,2	120,0	10,1	5φ16	10,1
V1AB	ELU máx (-)	-2095,9	1,0	1,0	14,3	400,0	54,2	8φ25 + 6φ20	58,1
V1AB	ELU máx (+)	2095,3	1,0	1,0	14,3	400,0	54,2	8φ25 + 6φ20	58,1
V2AB	ELU máx (-)	-1562,4	1,0	1,0	14,3	400,0	39,71	9φ25	44,2
V2AB	ELU máx (+)	1458,2	1,0	1,0	14,3	400,0	36,9	8φ25	39,3
V3AB	ELU máx (-)	-1306,0	1,05	1,0	15,0	420,0	31,2	7φ25	34,4
V3AB	ELU máx (+)	2253,0	1,0	1,0	15,0	420,0	55,4	12φ25	58,9
V1FG	ELU máx (-)	-1768,2	0,7	1,0	10,0	280,0	46,6	8φ25+4φ20	51,8
V1FG	ELU máx (+)	1814,2	0,7	1,0	10,0	280,0	47,9	8φ25+4φ20	51,8
V2FG	ELU máx (-)	-407,0	0,7	1,0	10,0	280,0	33,4	7φ25	34,4
V2FG	ELU máx (+)	431,8	0,7	1,0	10,0	280,0	32,4	7φ25	34,4
V3FG	ELU máx (-)	-648,1	0,7	1,0	10,0	280,0	16,1	8φ16	16,1
V3FG	ELU máx (+)	623,0	0,7	1,0	10,0	280,0	15,4	8φ16	16,1
V.Fund.	ELU máx (-)	-7047,0	1,9	1,0	29,1	760,0	88,3	2 x 9φ25	88,4
V.Fund.	ELU máx (+)	4305,0	1,9	1,0	29,1	760,0	52,9	8φ25 + 6φ20	58,1

Dimensionamento das Armaduras Longitudinais nas Secções a Meio-Vão

Relativamente às armaduras de flexão nas secções a meio vão, estas resultam fundamentalmente das combinações condicionantes em que intervêm esforços gravíticos. O dimensionamento destas armaduras consta da tabela 9.146.

Tabela 9.146 Armaduras de flexão nas secções de meio-vão.

Armaduras Longitudinais nas vigas de betão armado para as secções de meio-vão									
Viga	ELU	$M_{Ed,máx}$ (kN.m)	h (m)	b (m)	$A_{s,min}$ (cm ²)	$A_{s,máx}$ (cm ²)	$A_{s,cal}$ (cm ²)	Armaduras adotadas	$A_{s,adot}$ (cm ²)
V1B	ELU máx (-)	8,4	1,0	0,7	10,0	280,0	0,2	5φ20	15,7
V1B	ELU máx (+)	142,2	1,0	0,7	10,0	280,0	3,5	5φ20	15,7
V1A	ELU máx (-)	190,7	1,05	0,9	13,6	378,0	4,4	6φ20	18,8
V1A	ELU máx (+)	322,6	1,05	0,9	13,6	378,0	7,5	6φ20	18,8
V2B	ELU máx (-)	24,5	0,7	0,7	6,9	196,0	0,9	5φ20	15,7
V2B	ELU máx (+)	50,3	0,7	0,7	6,9	196,0	1,8	5φ20	15,7
V4B	ELU máx (-)	-78,7	1,0	0,6	7,7	216,0	2,1	5φ16	10,1
V4B	ELU máx (+)	191,1	1,0	0,6	7,7	216,0	5,2	5φ16	10,1
V1F	ELU máx (-)	19,1	0,7	0,7	6,9	196,0	0,7	5φ16	10,1
V1F	ELU máx (+)	65,4	0,7	0,7	6,9	196,0	2,3	5φ16	10,1
V2F	ELU máx (-)	24,7	0,7	0,7	6,9	196,0	0,9	5φ16	10,1
V2F	ELU máx (+)	50,0	0,7	0,7	6,9	196,0	1,8	5φ16	10,1
V1G	ELU máx (-)	30,1	0,9	0,7	9,0	252,0	0,8	6φ16	12,1
V1G	ELU máx (+)	123,5	0,9	0,7	9,0	252,0	3,4	6φ16	12,1
V4F	ELU máx (-)	-60,3	0,6	0,5	4,2	120,0	2,5	4φ16	8,0
V4F	ELU máx (+)	232,3	0,6	0,5	4,2	120,0	10,1	5φ16	10,1
V1AB	ELU máx (-)	-2,8	1,0	1,0	14,3	400,0	0,1	8φ16	16,1
V1AB	ELU máx (+)	44,1	1,0	1,0	14,3	400,0	1,1	8φ16	16,1
V2AB	ELU máx (-)	-23,4	1,0	1,0	14,3	400,0	0,6	8φ16	16,1
V2AB	ELU máx (+)	35,5	1,0	1,0	14,3	400,0	0,9	8φ16	16,1
V3AB	ELU máx (-)	-44,6	1,05	1,0	15,0	420,0	1,1	8φ16	16,1
V3AB	ELU máx (+)	480,0	1,05	1,0	15,0	420,0	11,2	8φ16	16,1
V1FG	ELU máx (-)	-54,8	0,7	1,0	10,0	280,0	1,3	6φ16	12,1
V1FG	ELU máx (+)	32,1	0,7	1,0	10,0	280,0	0,8	6φ16	12,1
V2FG	ELU máx (-)	-47,3	0,7	1,0	10,0	280,0	1,1	6φ16	12,1
V2FG	ELU máx (+)	20,1	0,7	1,0	10,0	280,0	0,5	6φ16	12,1
V3FG	ELU máx (-)	-3,3	0,7	1,0	10,0	280,0	0,1	6φ16	12,1
V3FG	ELU máx (+)	238,3	0,7	1,0	10,0	280,0	5,8	6φ16	12,1
V.Fund.	ELU máx (-)	1591,0	1,9	1,0	29,1	760,0	29,1	7φ25	34,4
V.Fund.	ELU máx (+)	2535,0	1,9	1,0	29,1	760,0	30,8	7φ25	34,4

Nota: Nas vigas com altura igual ou superior a 1 metro consideraram-se também armaduras de pele de acordo com o descrito na cláusula 7.3.3 (3) do EC2.

Para comprovar os resultados obtidos e, tendo em conta também a ocorrência de esforços axiais nestas vigas, recorreu-se ao *Software* “Gala Reinforcement” e verificou-se a segurança à flexão composta para as combinações mais desfavoráveis.

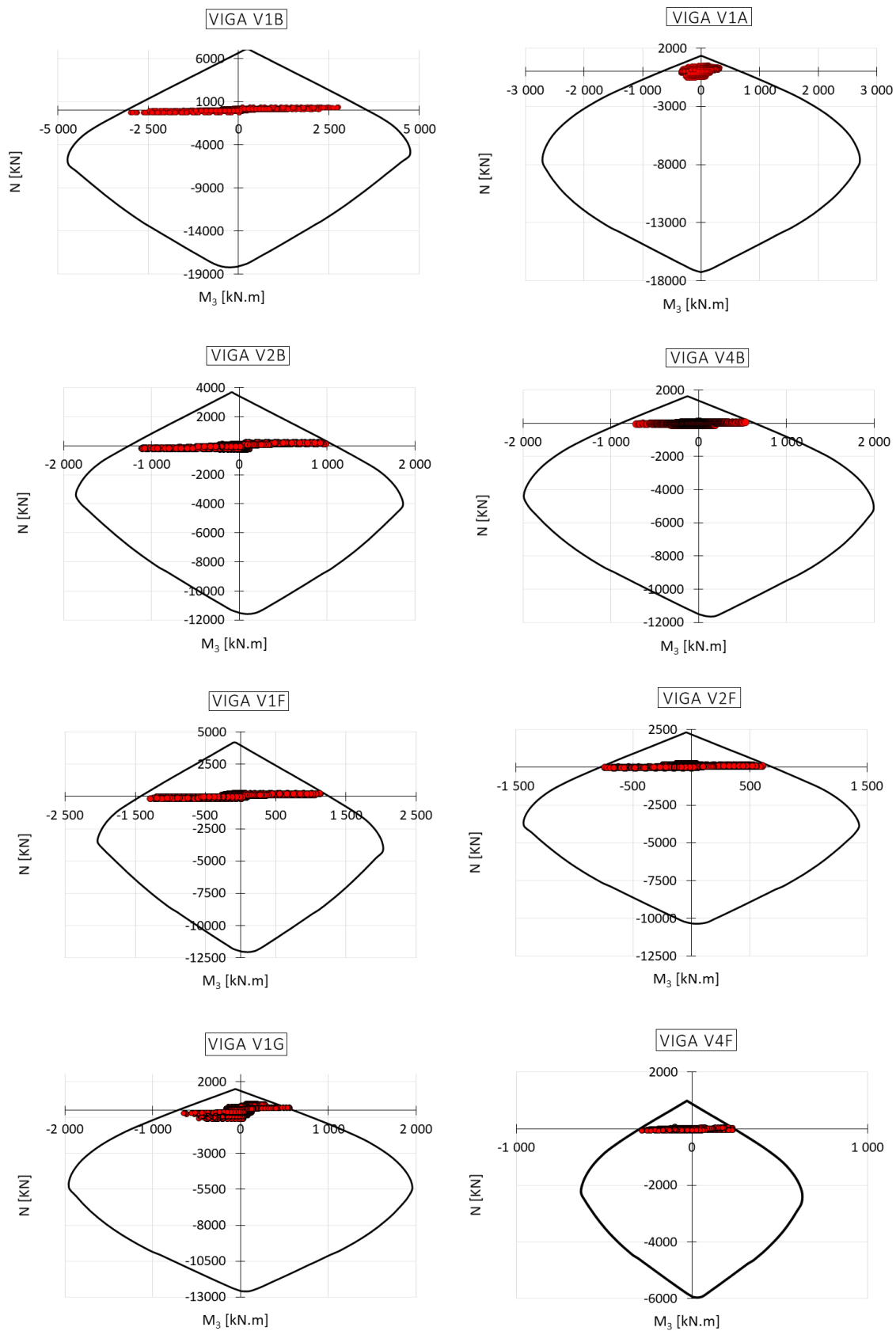


Figura 9.140 Ábacos de flexão composta.

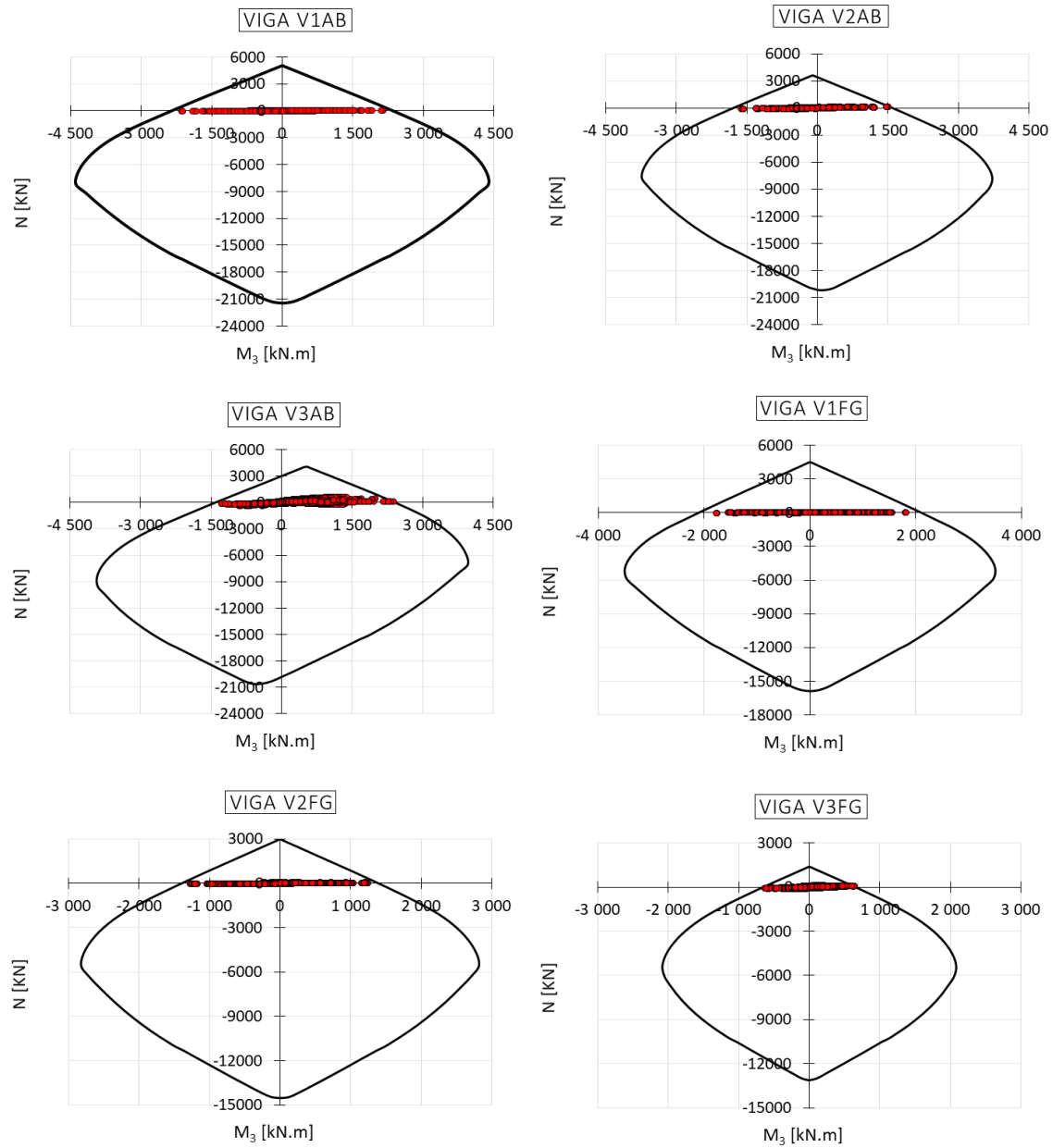


Figura 9.141 Ábacos de flexão composta.

No caso das vigas da ponte rolante foi necessário ter em consideração as linhas de influência das cargas móveis resultantes da movimentação do charriot da ponte rolante, de modo a determinarem-se os esforços máximos de flexão e de corte que conduziram às armaduras nos cálculos que se apresentam.

De forma a obter uma melhor perceção do andamento dos diagramas de flexão, com a movimentação da ponte rolante ao longo da viga, criou-se uma animação do tipo “Multi-step” recorrendo a um modelo simplificado no *Software* “SAP2000”, conforme exemplificado na figura 9.142.

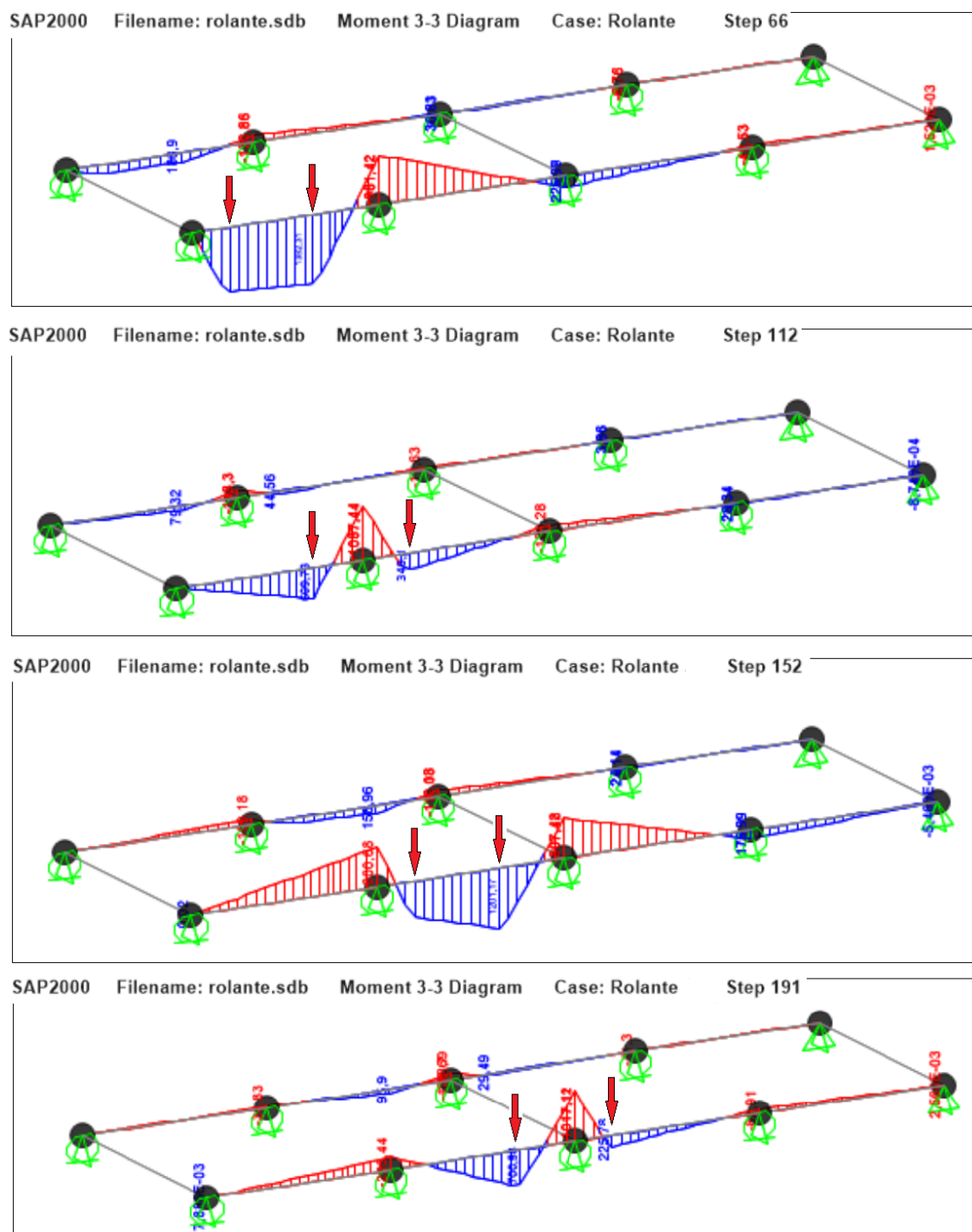


Figura 9.142 Diagramas dos Momentos Flectores M3 em função da posição da ponte rolante.

Devido à presença dos esforços de frenagem e de lacete estas vigas foram calculadas à flexão composta desviada, para as combinações mais desfavoráveis tendo-se utilizado o *Software* “Gala Reinforcement” no dimensionamento das armaduras de flexão.

Viga V3B

As armaduras de flexão calculadas para as secções da viga V3B, verificadas a partir do ábaco de dimensionamento, encontram-se indicadas na figura 9.143.

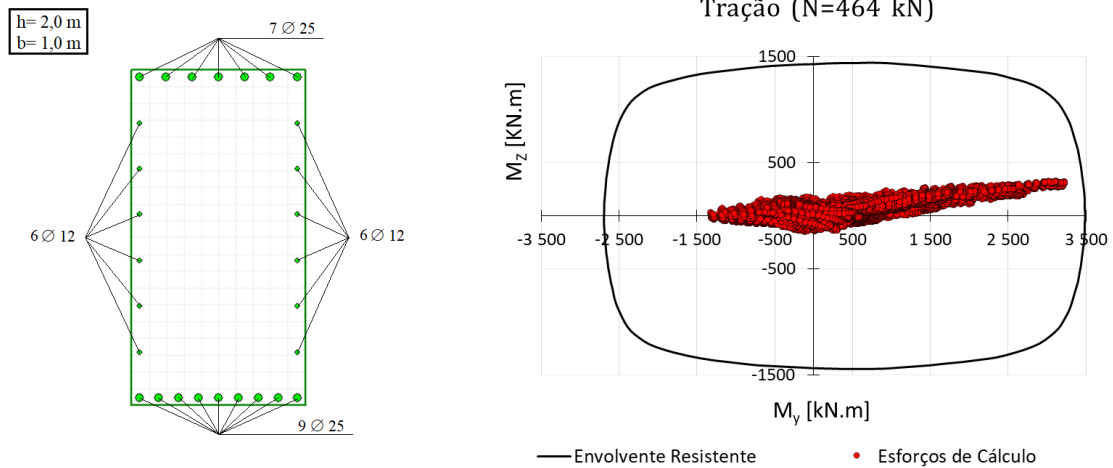


Figura 9.143 Armaduras longitudinais na viga V3B e respetivo ábaco de dimensionamento.

Viga V3F

As armaduras de flexão adotadas em todas as secções e o respetivo ábaco de dimensionamento constam na figura 9.144.

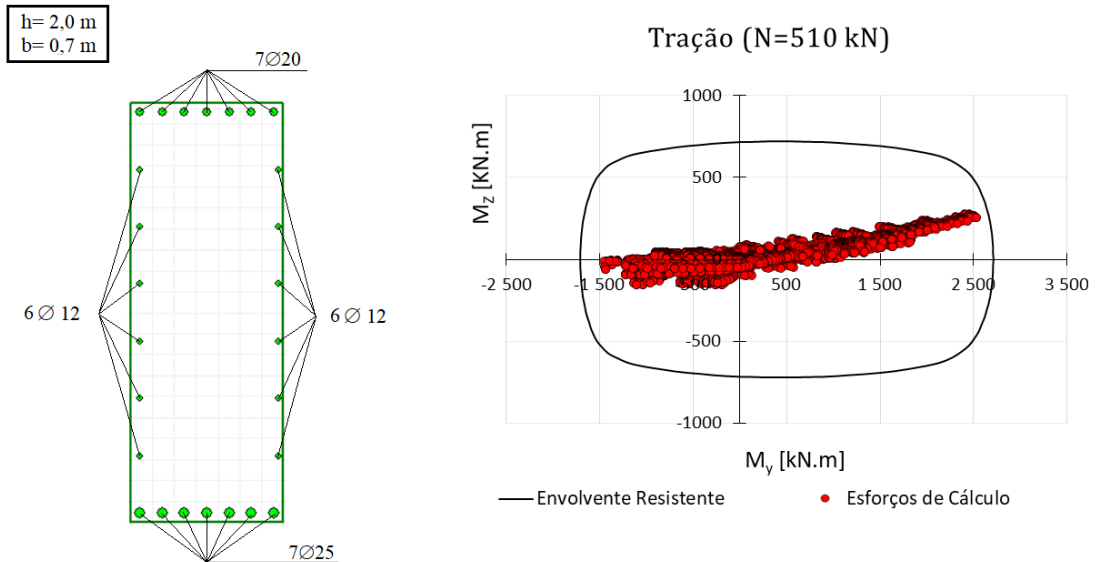


Figura 9.144 Armaduras longitudinais na viga V3F e ábaco de dimensionamento.

Dimensionamento das Armaduras Transversais

O dimensionamento das armaduras de esforço transversal das vigas de betão armado encontra-se resumido na tabela 9.147.

Tabela 9.147 Dimensionamento das armaduras de Esforço Transverso nas Vigas de Betão Armado.

Armaduras de Esforço Transverso							
Viga	V_{Ed} (kN)	$(A_{sw}/S)_{min}$ (Cm^2/m)	$(A_{sw}/S)_{max}$ (Cm^2/m)	$(A_{sw}/S)_{calc}$ (Cm^2/m)	Nº ramos -	Armaduras adotadas	$(A_{sw}/S)_{adot.}$ (Cm^2/m)
V1B	705,0	6,13	84,97	18,56	4	$\phi 8//0.10$	20,00
V1A	257,4	7,89	84,97	7,89	4	$\phi 8//0.225$	8,88
V2B	289,5	6,13	84,97	11,04	4	$\phi 8//0.175$	11,44
V3B	1961,4	8,76	121,38	25,43	4	$\phi 12//0.175$	25,84
V4B	198,4	5,26	72,83	5,82	4	$\phi 8//0.25$	8,00
V1F	335,4	6,13	84,97	8,16	4	$\phi 8//0.225$	8,88
V3F	1794,2	6,13	84,97	23,26	4	$\phi 12//0.175$	25,84
V1G	189,9	6,13	84,97	5,58	4	$\phi 8//0.25$	8,00
V4F	154,4	4,38	60,69	6,92	4	$\phi 8//0.25$	8,00
V1AB	1597,2	8,76	121,38	42,06	4	$\phi 10//0.075$	42,12
V2AB	1177,9	8,76	121,38	31,02	4	$\phi 10//0.10$	31,60
V3AB	1364,5	8,76	121,38	35,93	4	$\phi 12//0.125$	36,16
V1FG	1726,0	6,13	89,97	45,1	4	$\phi 12//0.1$	45,21
V2FG	1152,3	6,13	89,97	30,34	4	$\phi 10//0.10$	31,60
V3FG	792,3	6,13	89,97	20,86	4	$\phi 10//0.15$	21,10
V.Fund.	1236	8,76	121,38	16,40	4	$\phi 12//0.25$	18,1

Dimensionamento das vigas aos Estados Limites de Serviço

A verificação dos Estados Limite de Utilização nas vigas baseou-se no controlo da fendilhação e da deformação vertical máxima obtida com base nas combinações mais condicionantes.

Controlo da Fendilhação

O controlo da Fendilhação nas vigas foi realizado a partir do programa “Gala Reinforcement” através do cálculo da abertura de fendas, tendo-se comparado com o valor limite W_{max} que, para as classes de exposição XC4, assumem os valores máximos de 0.3mm. Os resultados encontram-se apresentados nas figuras seguintes.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	82	152	L1	2	0.52	-0.12	268.750	0.13943	0.23703	0.25091

Figura 9.145 Controlo da fendilhação nas Vigas V1B.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	197	232	L1	2	0.61	-0.11	250.893	0.15221	0.25876	0.27293

Figura 9.146 Controlo da fendilhação nas Vigas V1A.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	59	80	L1	2	0.50	-0.13	268.750	0.13352	0.21631	0.23505

Figura 9.147 Controlo da fendilhação nas Vigas V2B.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	359	1382	L1	2	0.66	-0.16	140.922	0.09358	0.15909	0.16365

Figura 9.148 Controlo da fendilhação nas Vigas V3B.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	21	46	L1	2	0.19	-0.04	284.375	0.05415	0.08340	0.08828

Figura 9.149 Controlo da fendilhação nas Vigas V4B.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	162	88	L1	2	0.70	-0.12	246.875	0.17298	0.29407	0.31860

Figura 9.150 Controlo da fendilhação nas Vigas V1F.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	56	71	L1	2	0.45	-0.11	268.750	0.12007	0.20412	0.22177

Figura 9.151 Controlo da fendilhação nas Vigas V2F.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	222	972	L1	2	1.63	-0.43	100.916	0.16420	0.27914	0.29746

Figura 9.152 Controlo da fendilhação nas Vigas V3F.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	21	103	L1	2	0.34	-0.10	225.000	0.07732	0.13144	0.14027

Figura 9.153 Controlo da fendilhação nas Vigas V1G.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	17	22	L1	2	0.02	-0.01	85.000	0.00153	0.00261	0.00280

Figura 9.154 Controlo da fendilhação nas Vigas V4F.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	35	203	L1	2	0.38	-0.11	245.313	0.09238	0.15705	0.16650

Figura 9.155 Controlo da fendilhação nas Vigas V1AB.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	49	415	L1	2	0.75	-0.22	221.875	0.16711	0.28409	0.30126

Figura 9.156 Controlo da fendilhação nas Vigas V2AB.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	69	404	L1	2	0.75	-0.22	221.875	0.16630	0.28271	0.29974

Figura 9.157 Controlo da fendilhação nas Vigas V3AB.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	33	152	L1	2	0.46	-0.12	268.750	0.12335	0.19983	0.21174

Figura 9.158 Controlo da fendilhação nas Vigas V1FG.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	30	216	L1	2	0.63	-0.17	268.750	0.16961	0.27477	0.29123

Figura 9.159 Controlo da fendilhação nas Vigas V2FG.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	112	132	L1	2	0.50	-0.10	268.750	0.13483	0.21843	0.23103

Figura 9.160 Controlo da fendilhação nas Vigas V3FG.

Calcularam-se também as armaduras mínimas longitudinais necessárias para limitar a fendilhação nas zonas tracionadas. Os resultados obtidos constam da tabela 9.148.

Tabela 9.148 Armaduras mínimas de fendilhação nas vigas.

Vigas	h (m)	b (m)	k -	k_c -	$f_{ct,eff}$ (Mpa)	A_{ct} (m^2)	F_{yk} (Mpa)	$A_{s,min}$ (cm^2)
V1B	1	0,7	0,65	0,4	2,9	0,38	500	10,27
V1A	1,05	0,9	0,65	0,4	2,9	0,54	500	14,61
V2B	0,7	0,7	0,72	0,4	2,9	0,27	500	7,94
V3B	2	1	0,65	0,4	2,9	1,09	500	29,26
V4B	1	0,6	0,65	0,4	2,9	0,32	500	8,69
V1F	0,7	0,7	0,72	0,4	2,9	0,30	500	8,88
V2F	0,7	0,7	0,72	0,4	2,9	0,33	500	9,91
V3F	2	0,7	0,65	0,4	2,9	0,75	500	20,29
V1G	0,9	0,7	0,65	0,4	2,9	0,40	500	10,72
V4F	0,6	0,5	0,79	0,4	2,9	0,16	500	5,29
V1AB	1	1	0,65	0,4	2,9	0,51	500	13,85
V2AB	1	1	0,65	0,4	2,9	0,51	500	13,73
V3AB	1	1	0,65	0,4	2,9	0,56	500	14,96
V1FG	1	0,7	0,65	0,4	2,9	0,36	500	9,77
V2FG	1	0,7	0,65	0,4	2,9	0,36	500	9,64
V3FG	1	0,7	0,65	0,4	2,9	0,40	500	10,76

Controlo da deformação

Relativamente às deformações verticais nas vigas, considerou-se para as vigas da ponte rolante (Vigas V3B e V3F) uma deformação vertical máxima admissível de $\delta_{adm} = L/1000$, e para as restantes vigas $\delta_{adm} = L/250$. Os resultados estão reunidos na tabela 9.149.

Tabela 9.149 Controlo das deformações verticais nas vigas.

Vigas	Vão (m)	δ_v (mm)	δ_{adm} (mm)	Rácio
V1B	8,21	5,6	32,84	0,17
V1A	8,21	5,6	32,84	0,19
V2B	8,21	6,3	32,84	0,19
V3B	8,21	6,8	8,21	0,83
V4B	8,21	7,5	32,84	0,23
V1F	8,21	5,2	32,84	0,16
V2F	8,21	5,9	32,84	0,18
V3F	8,21	6,4	8,21	0,78
V1G	8,21	5,5	32,84	0,17
V4F	8,21	6,7	32,84	0,21
V1AB	2,7	2,2	10,8	0,21
V2AB	2,7	2,8	10,8	0,26
V3AB	2,7	3,2	10,8	0,30
V1FG	2,1	2,1	8,4	0,25
V2FG	2,1	2,6	8,4	0,31
V3FG	2,1	3,3	8,4	0,39

9.3.3 Lajes

As lajes do Hangar são lajes maciças vigadas e foram modeladas no *software* “SAP2000” através de elementos do tipo “Shell”. A figura 9.161 mostra numa perspetiva tridimensional as lajes dimensionadas.

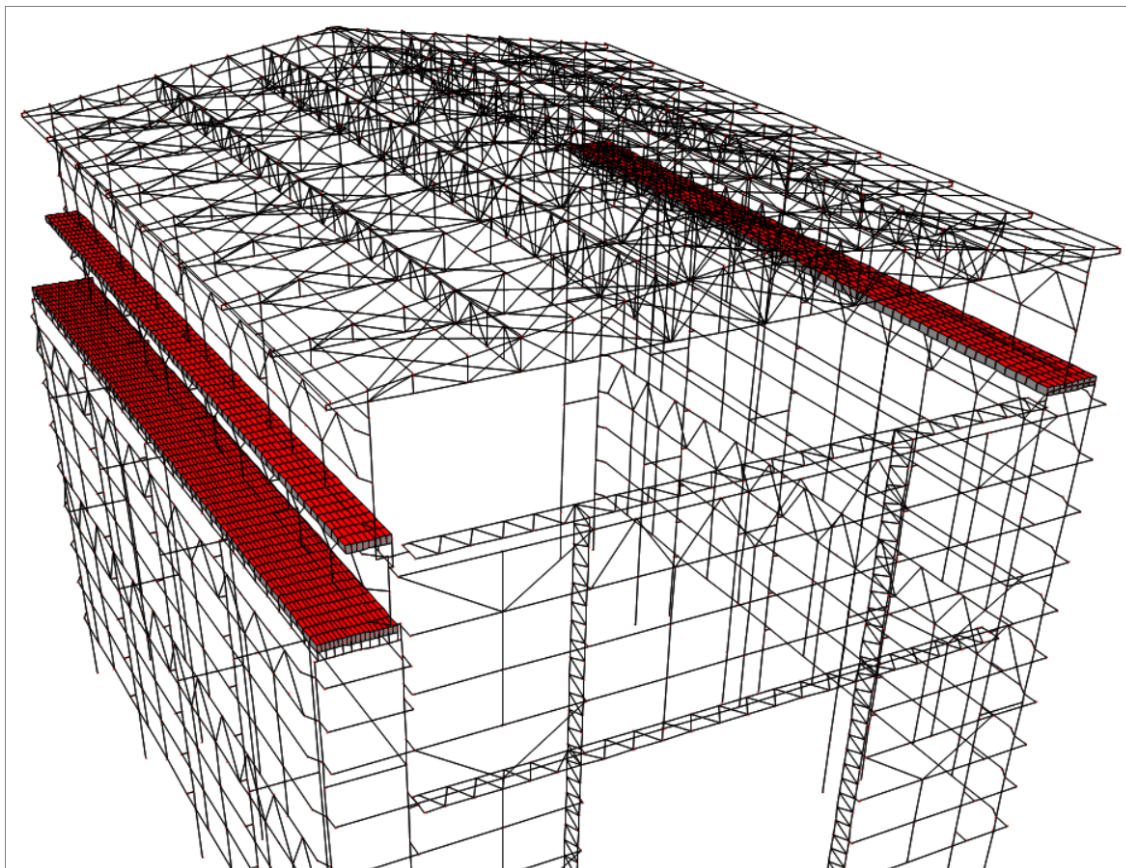


Figura 9.161 Perspetiva tridimensional das lajes.

Na determinação dos momentos fletores de cálculo importa referir que é necessário combinar os momentos M_{11} e M_{22} com os momentos de torção M_{12} , de acordo com as expressões:

$$\text{Para } M_{11} < 0, M_{11,Ed} = M_{11} - |M_{12}| \quad (9.15)$$

$$\text{Para } M_{11} > 0, M_{11,Ed} = M_{11} + |M_{12}| \quad (9.16)$$

$$\text{Para } M_{22} < 0, M_{22,Ed} = M_{22} - |M_{12}| \quad (9.17)$$

$$\text{Para } M_{22} > 0, M_{22,Ed} = M_{22} + |M_{12}| \quad (9.18)$$

M_{11} - Momentos segundo a direção 1 (momentos em torno do eixo 2).

M_{22} - Momentos segundo a direção 2 (momentos em torno do eixo 1).

Lajes L1 AB

As lajes L1 AB são lajes vigadas com um bordo livre e uma altura de 0,16m.

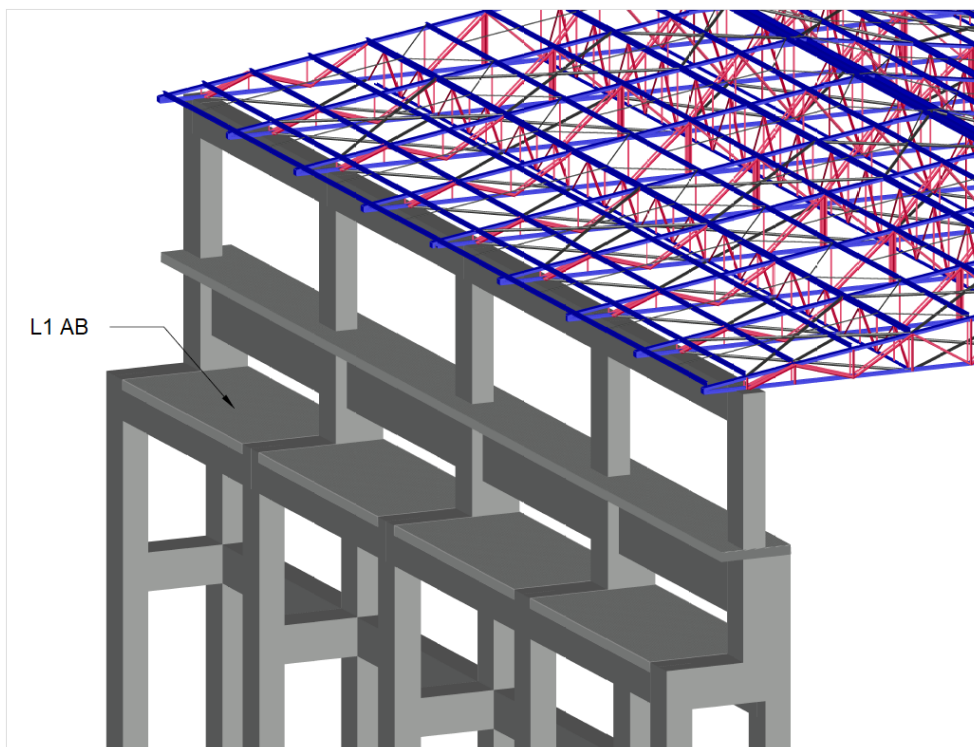


Figura 9.162 Identificação das Lajes L1 AB.

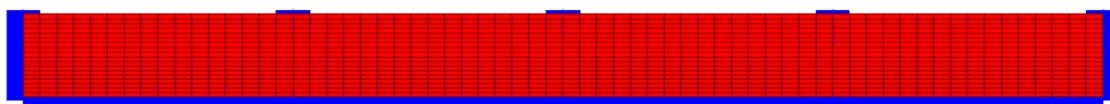


Figura 9.163 Esquema extrudido das lajes L1 AB no software “SAP2000”.

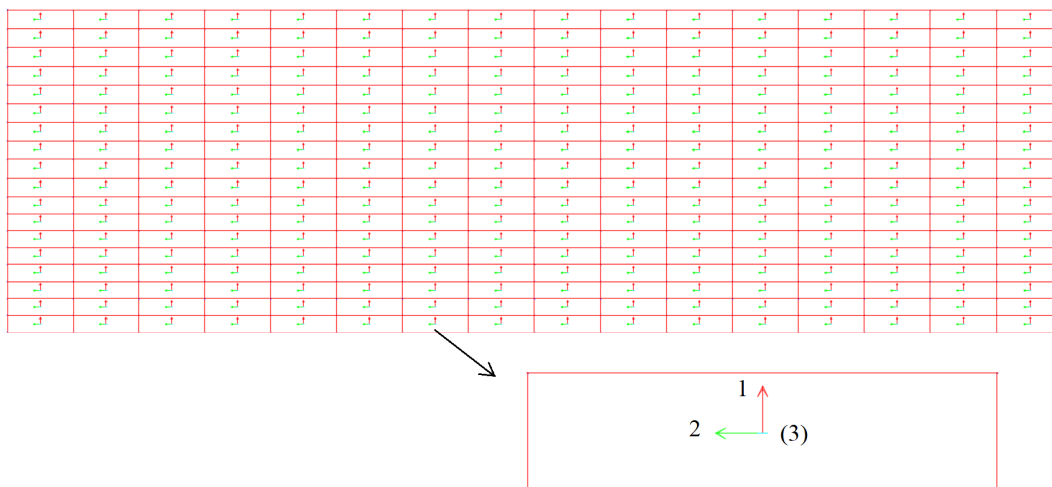


Figura 9.164 Identificação dos eixos locais da laje.

As envolventes máximas e mínimas de cálculo dos momentos M_{11} , M_{22} e M_{12} encontram-se representadas nas figuras seguintes.

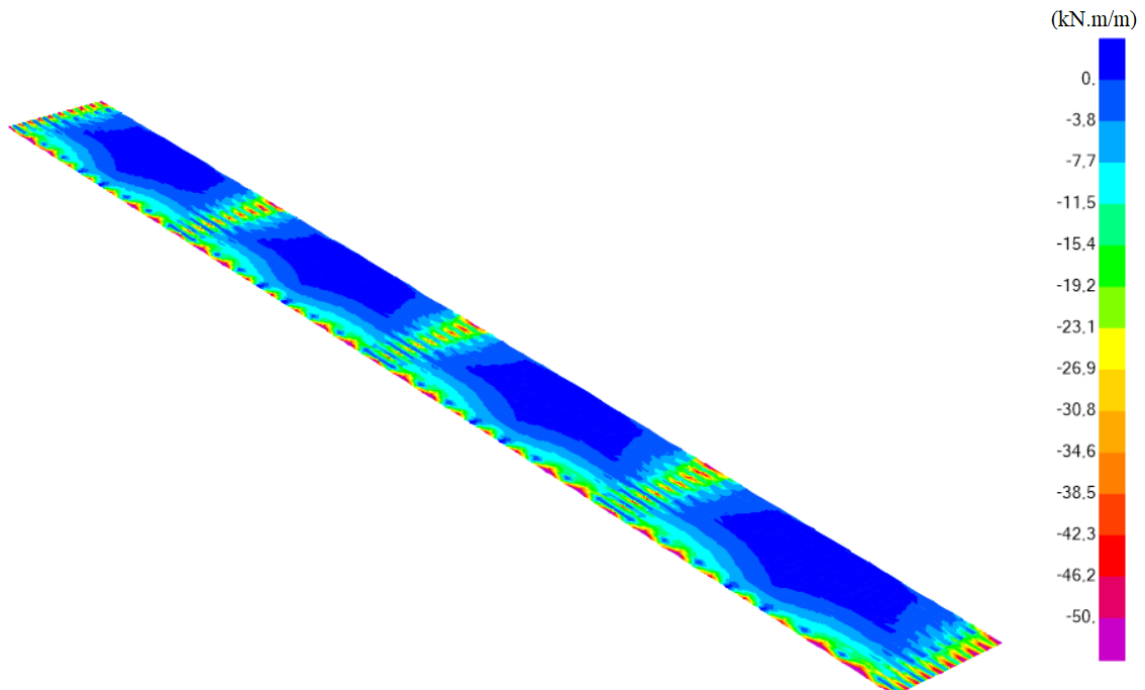


Figura 9.165 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11} .

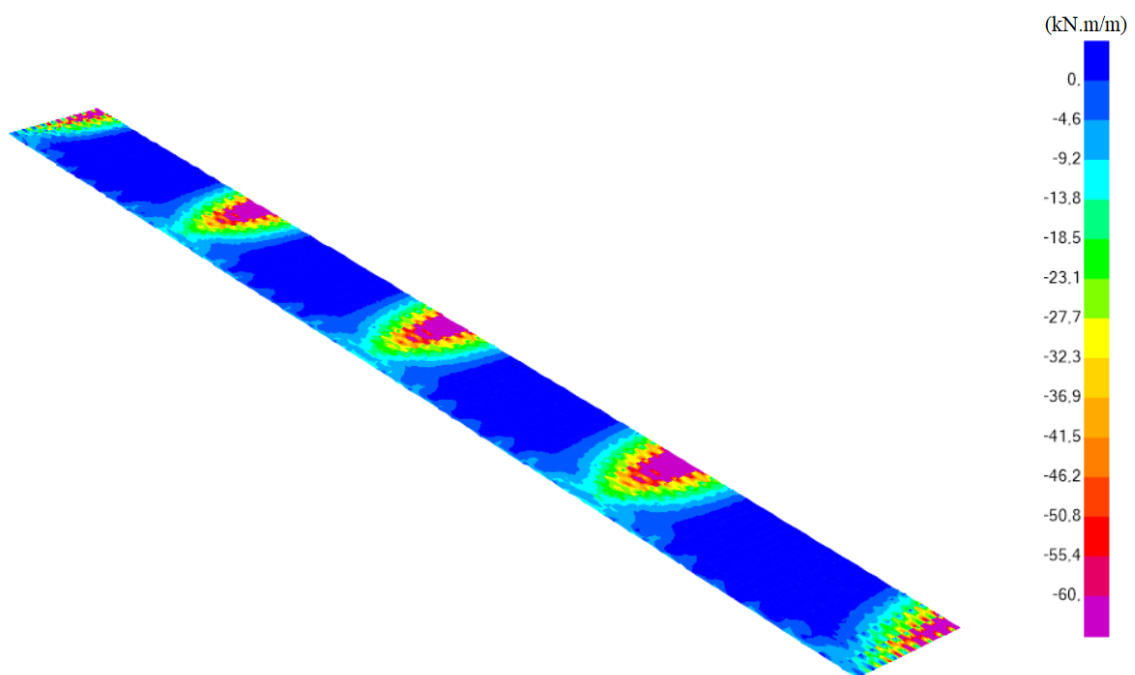


Figura 9.166 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22} .

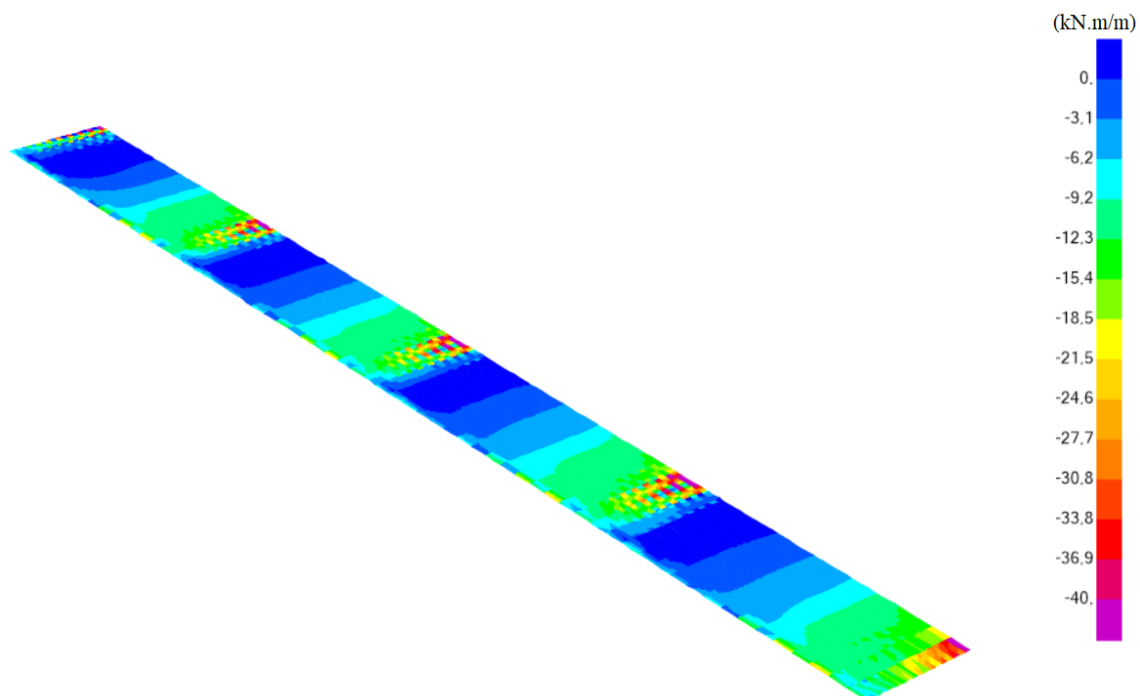


Figura 9.167 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12} .

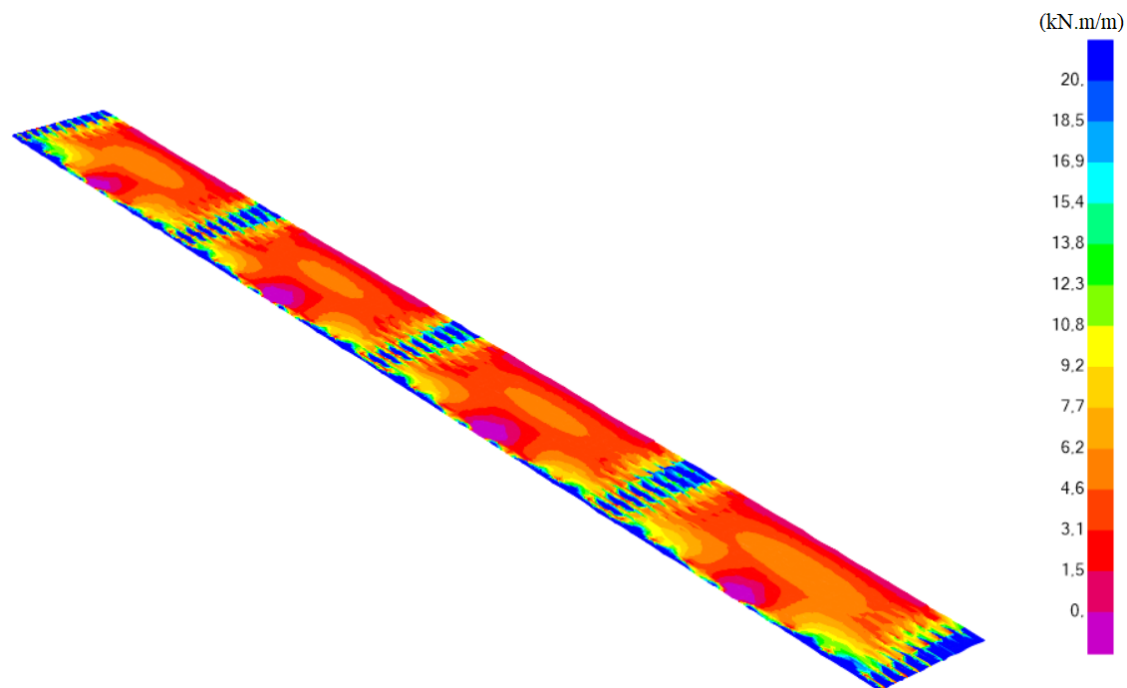


Figura 9.168 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .

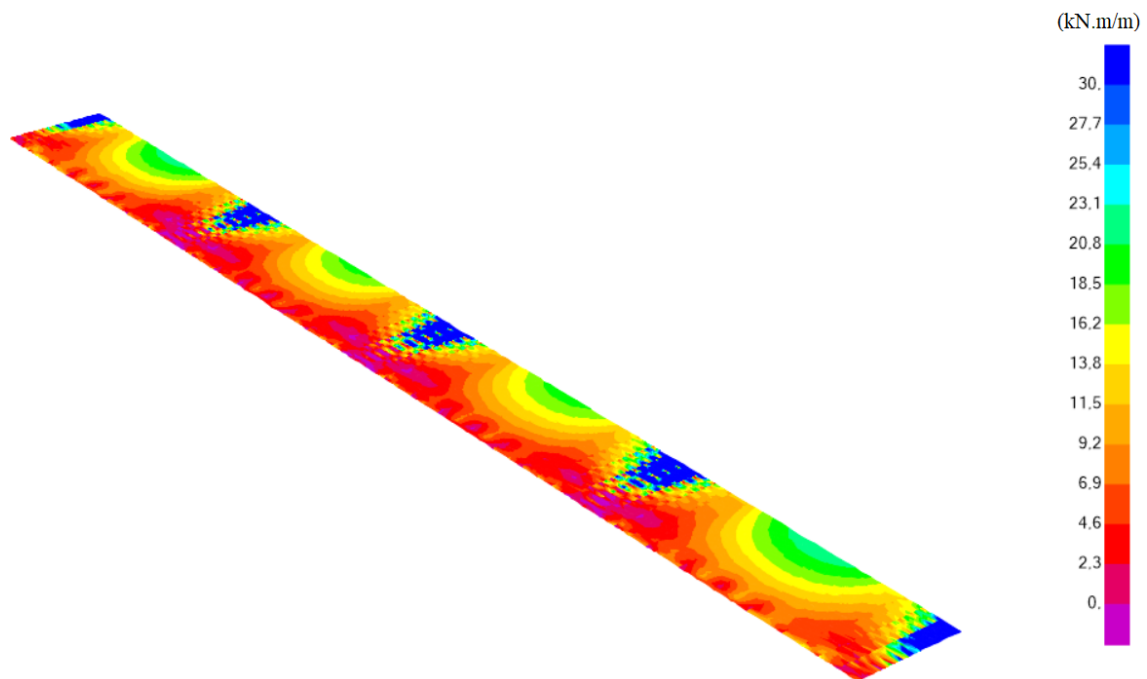


Figura 9.169 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .

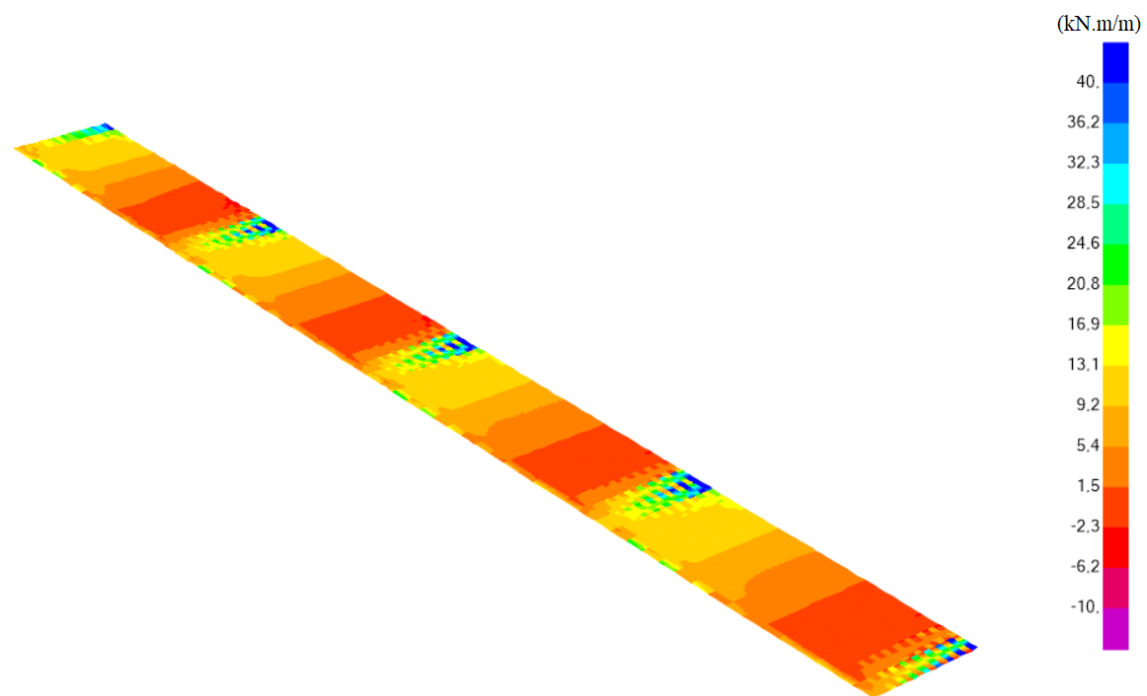


Figura 9.170 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .

Laje L2 AB

As lajes L2 AB funcionam em consola e têm uma altura de 0,22 m.

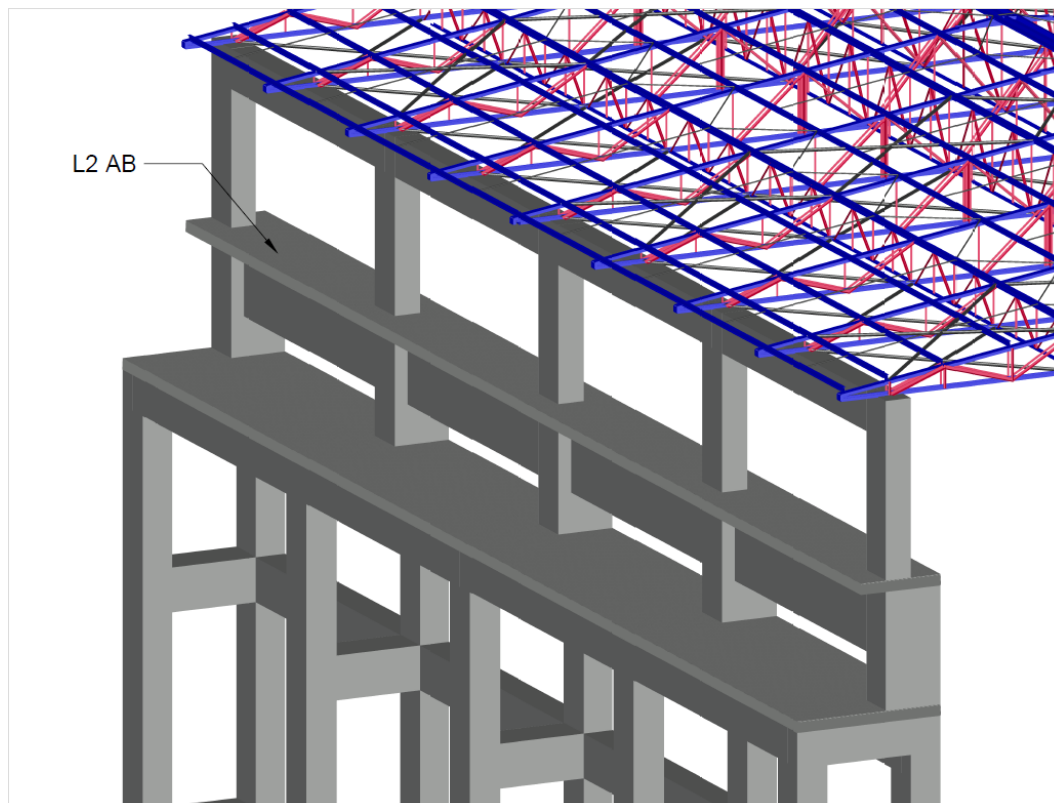


Figura 9.171 Identificação das lajes L2 AB.

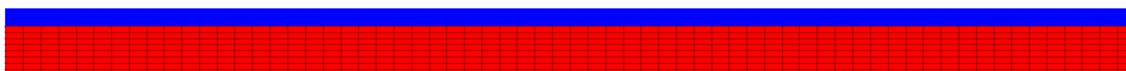


Figura 9.172 Esquema extrudido das lajes L2 AB.

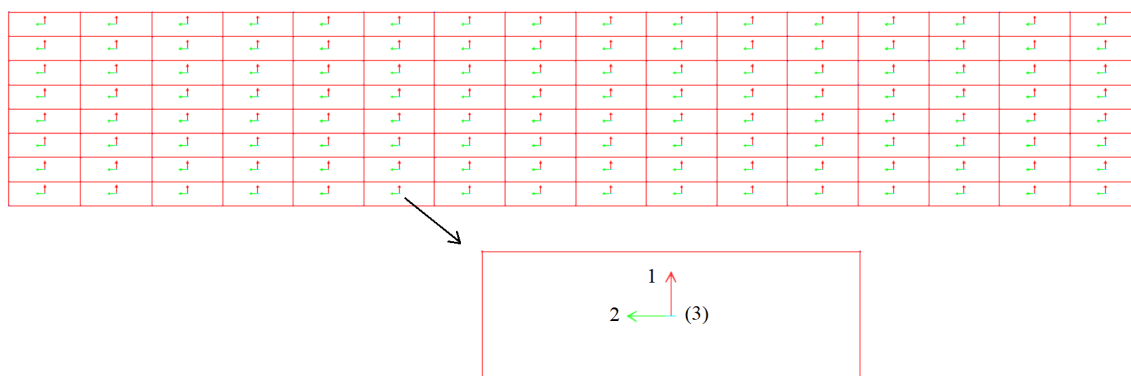


Figura 9.173 Identificação dos eixos locais das lajes.

As envolventes de cálculo dos Momentos M_{11} , M_{22} e M_{12} estão identificadas nas figuras seguintes.

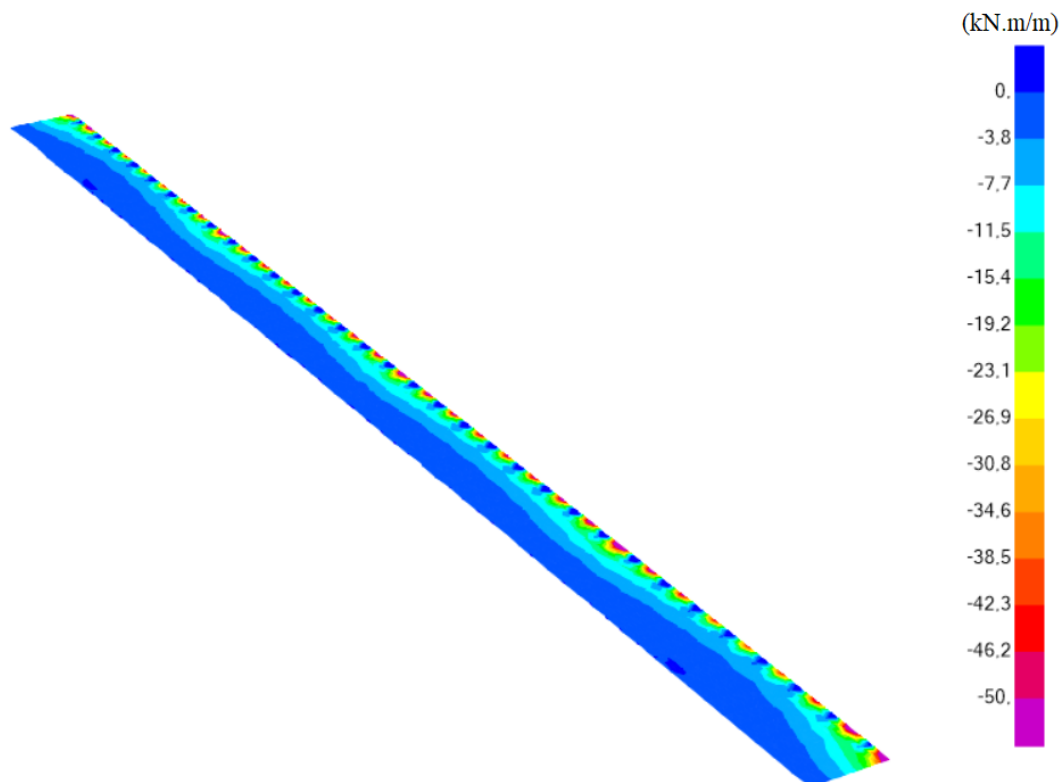


Figura 9.174 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11} .

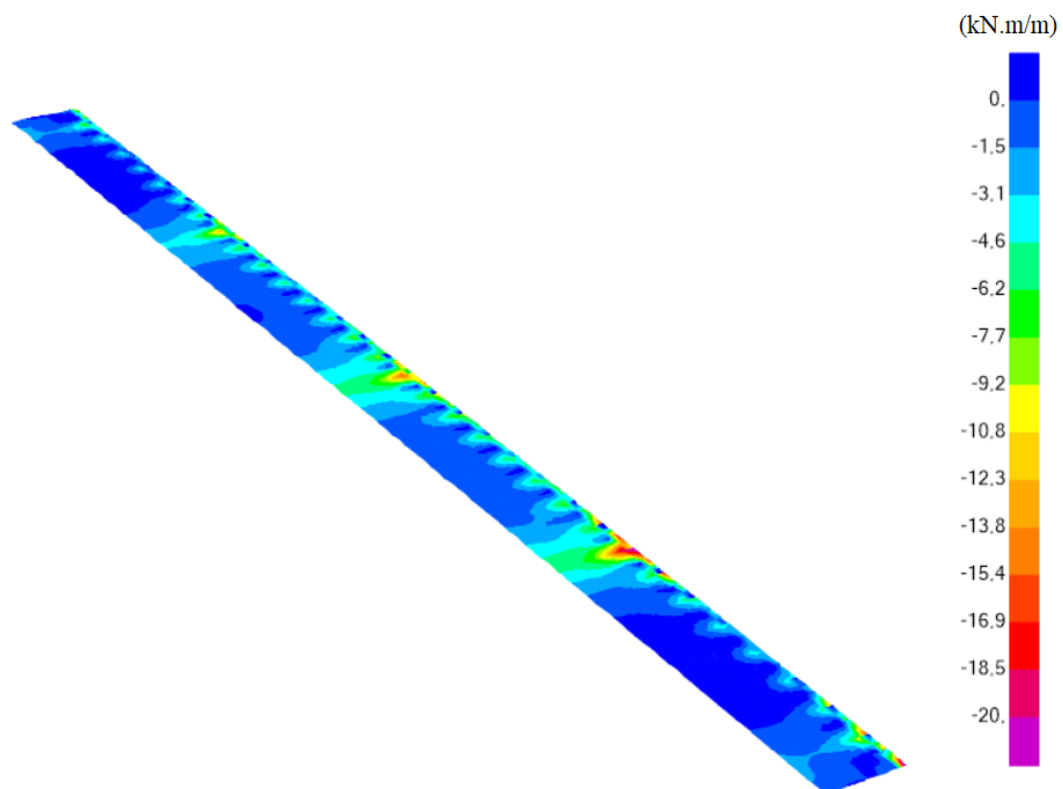


Figura 9.175 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22} .

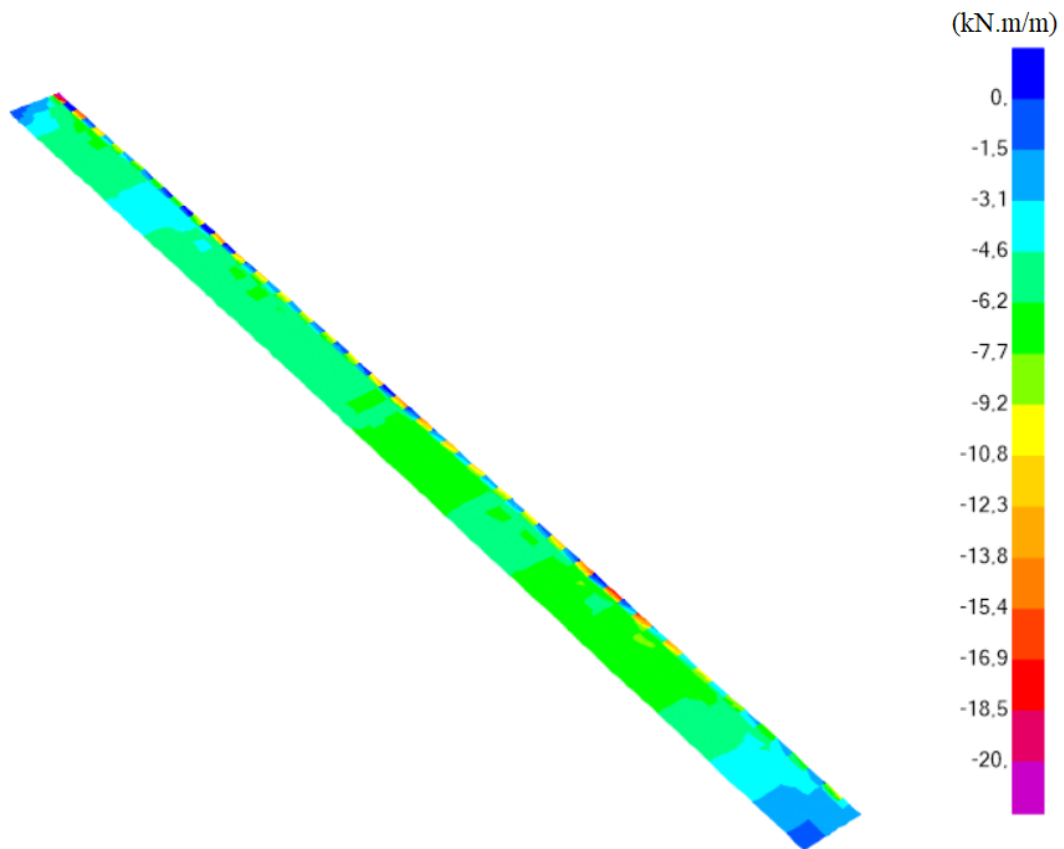


Figura 9.176 Envoltória Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12} .

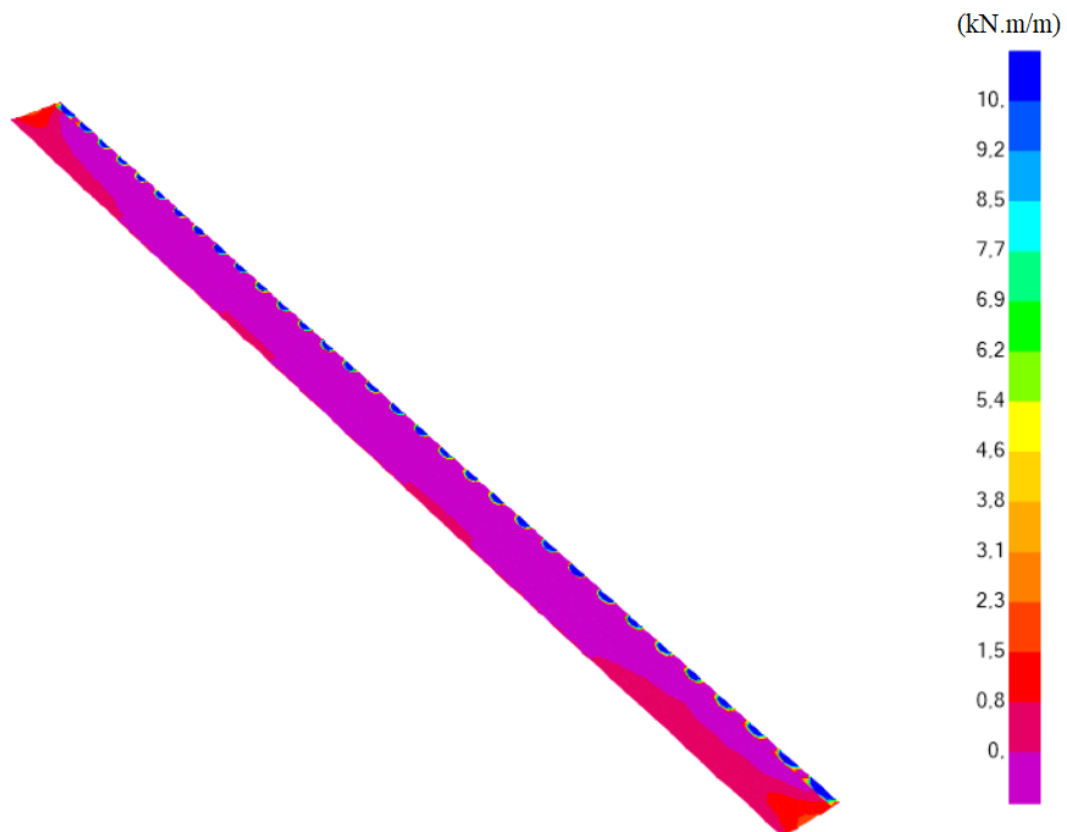


Figura 9.177 Envoltória Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .

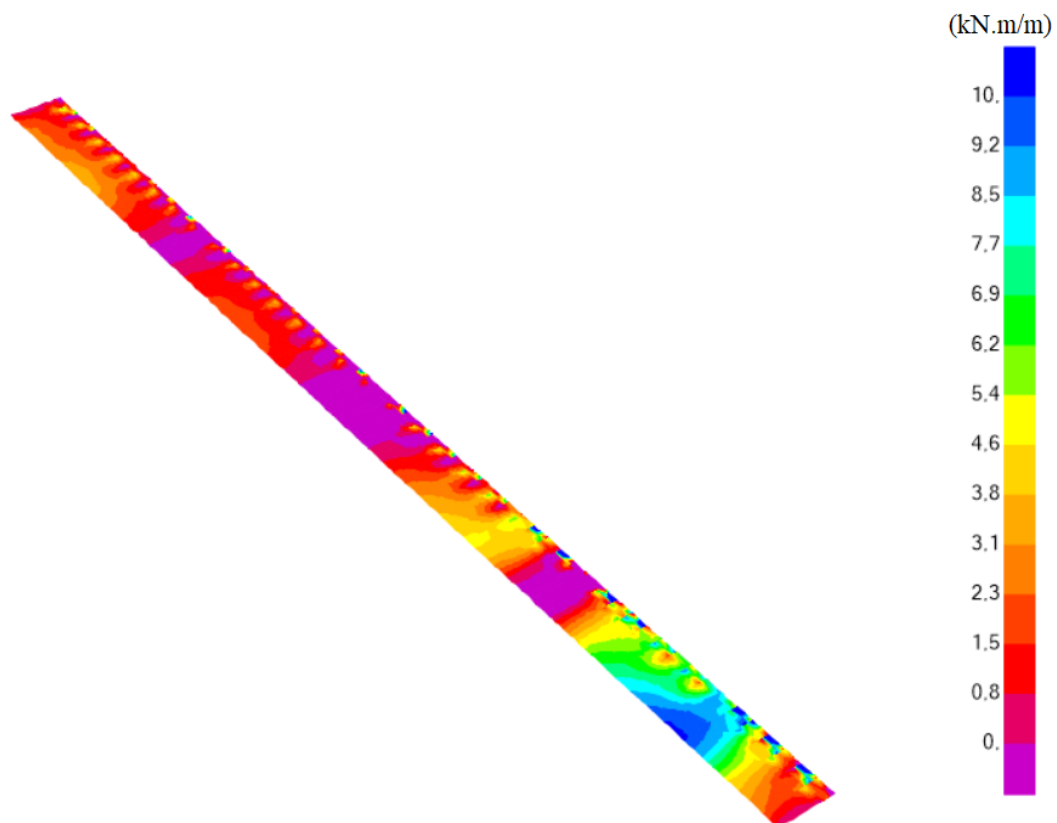


Figura 9.178 Envoltória Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .

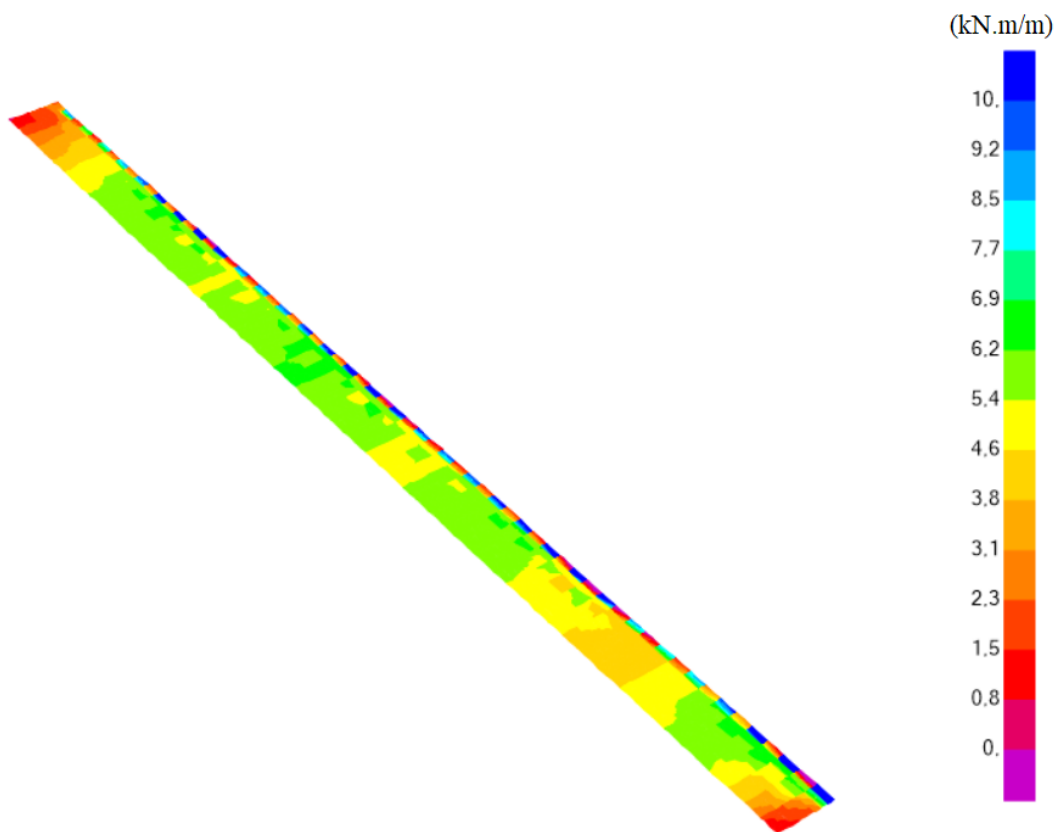


Figura 9.179 Envoltória Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .

Laje L1 FG

A laje L1 FG é uma laje maciça vigada com uma altura de 0,16m.

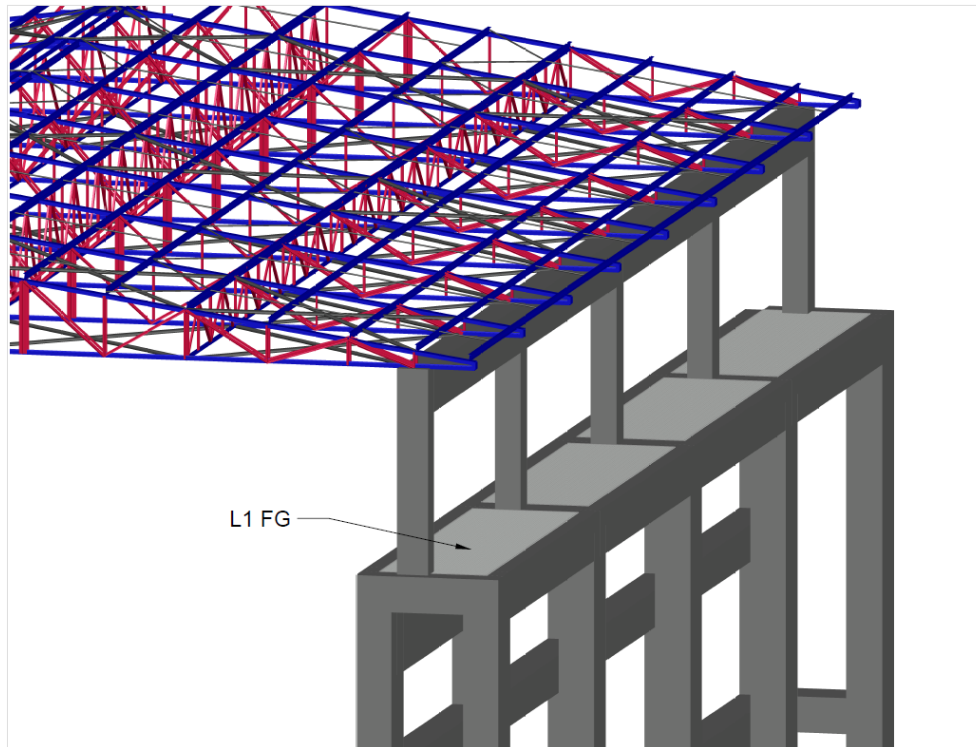


Figura 9.180 Identificação das Lajes L1 FG.

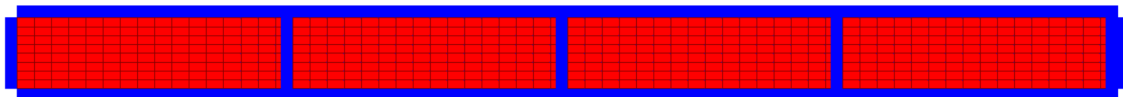


Figura 9.181 Esquema extrudido das lajes.

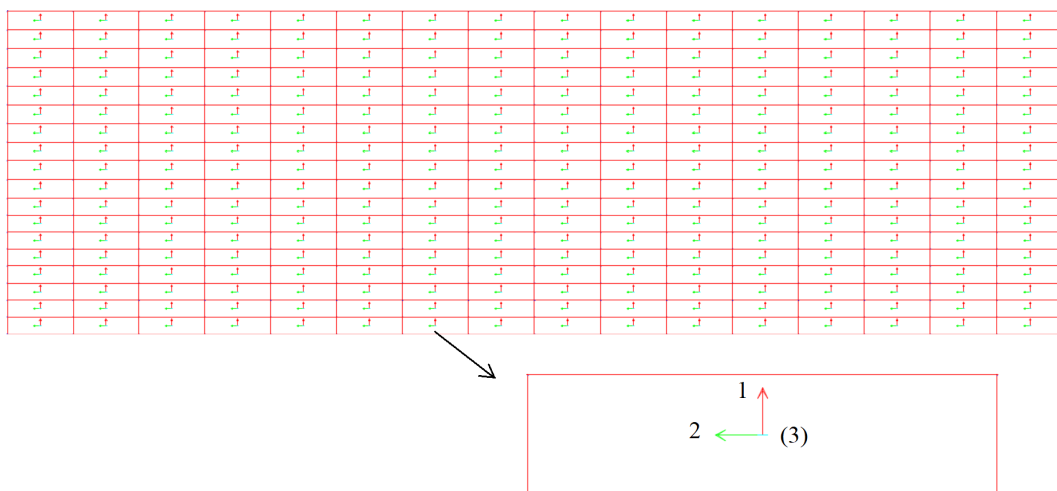


Figura 9.182 Identificação dos eixos locais.

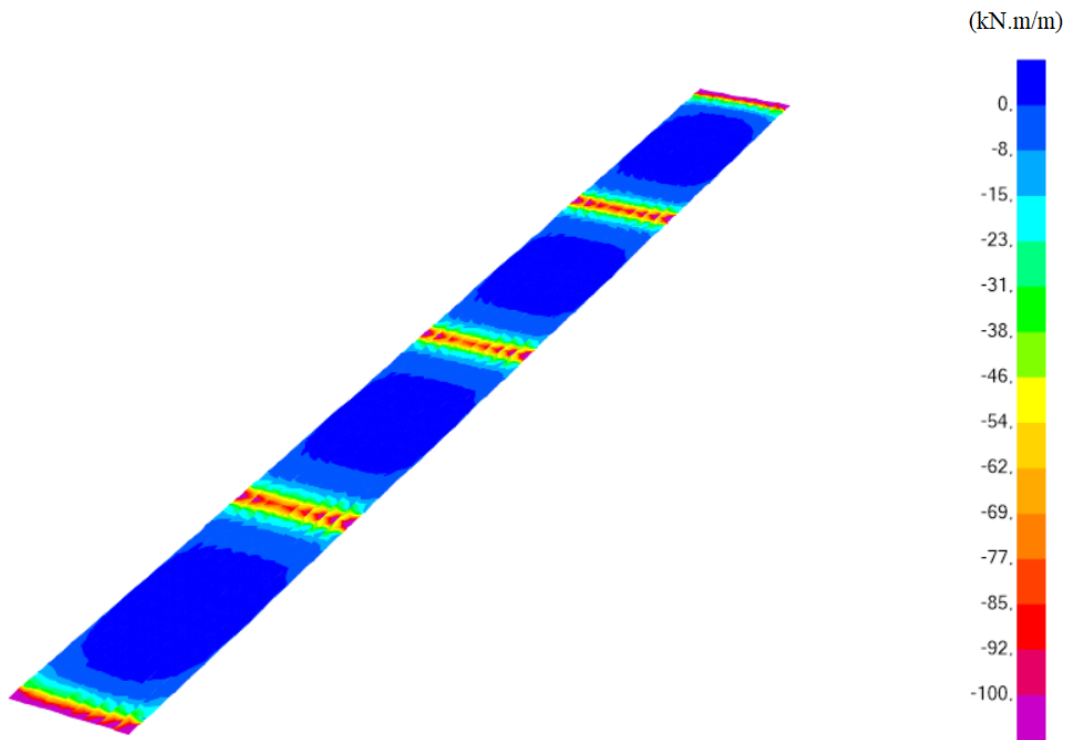


Figura 9.183 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{11} .

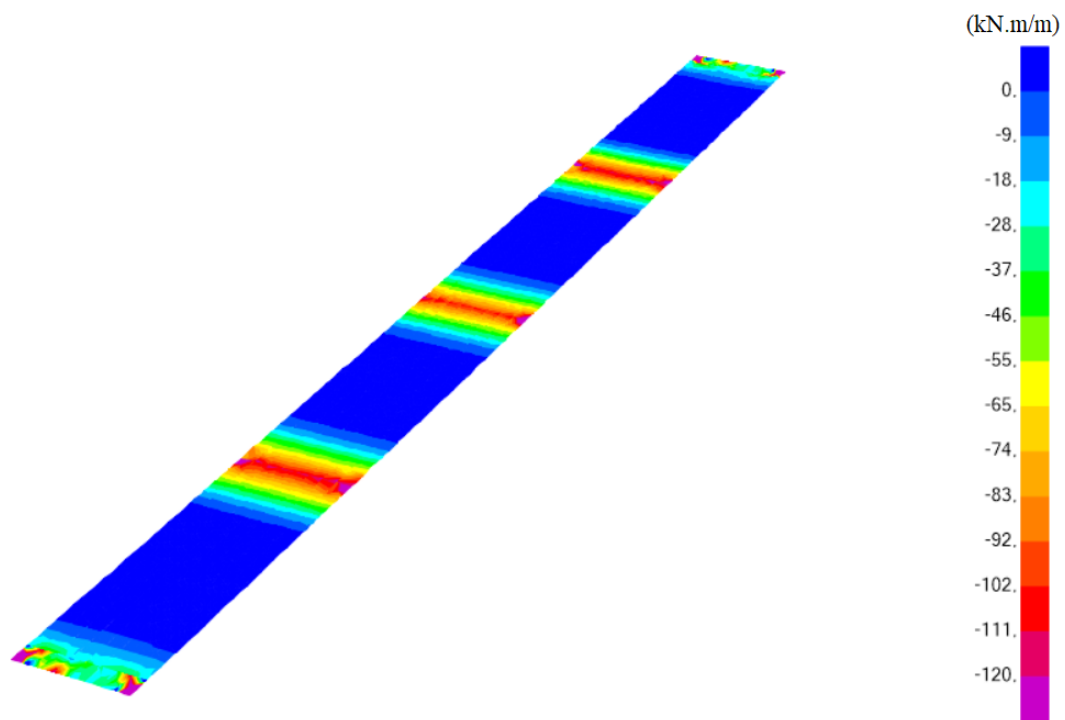


Figura 9.184 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{22} .

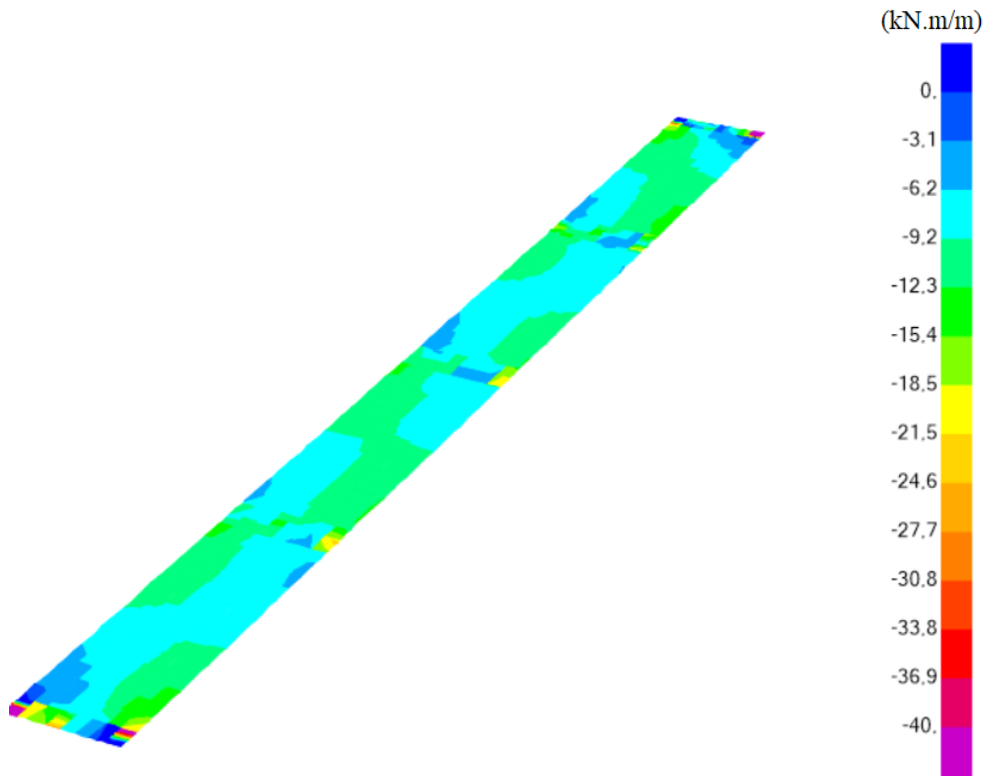


Figura 9.185 Envolvente Mínima dos Momentos Negativos de Cálculo M_{12} .

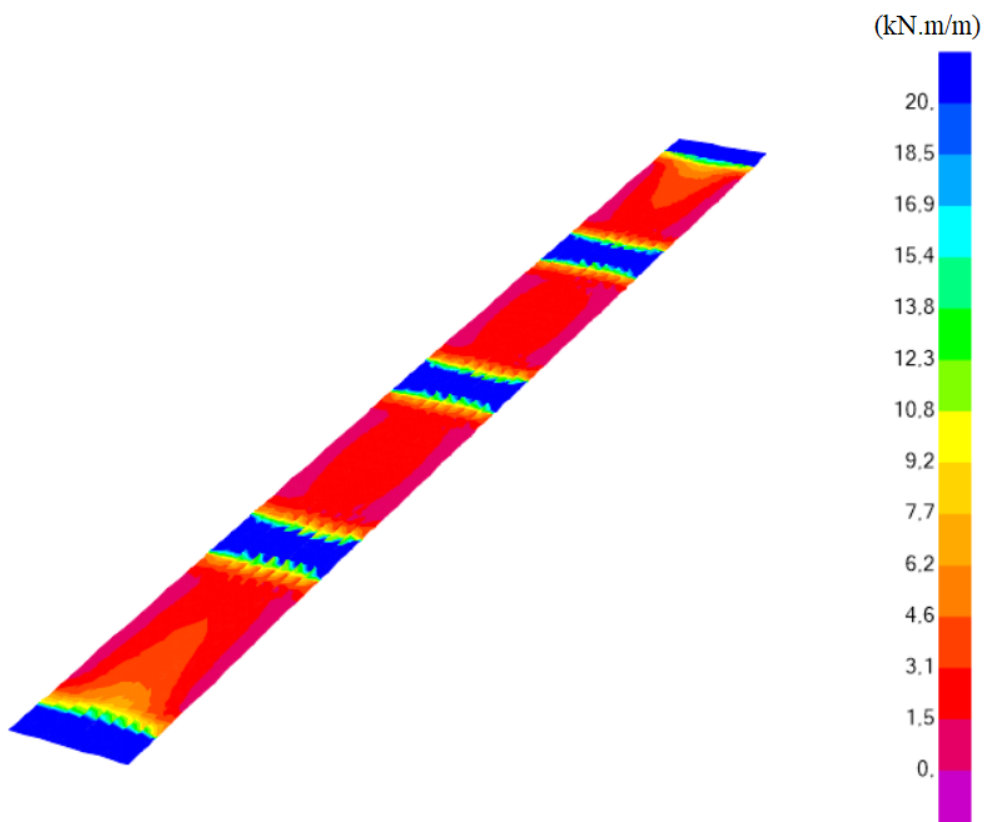


Figura 9.186 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{11} .

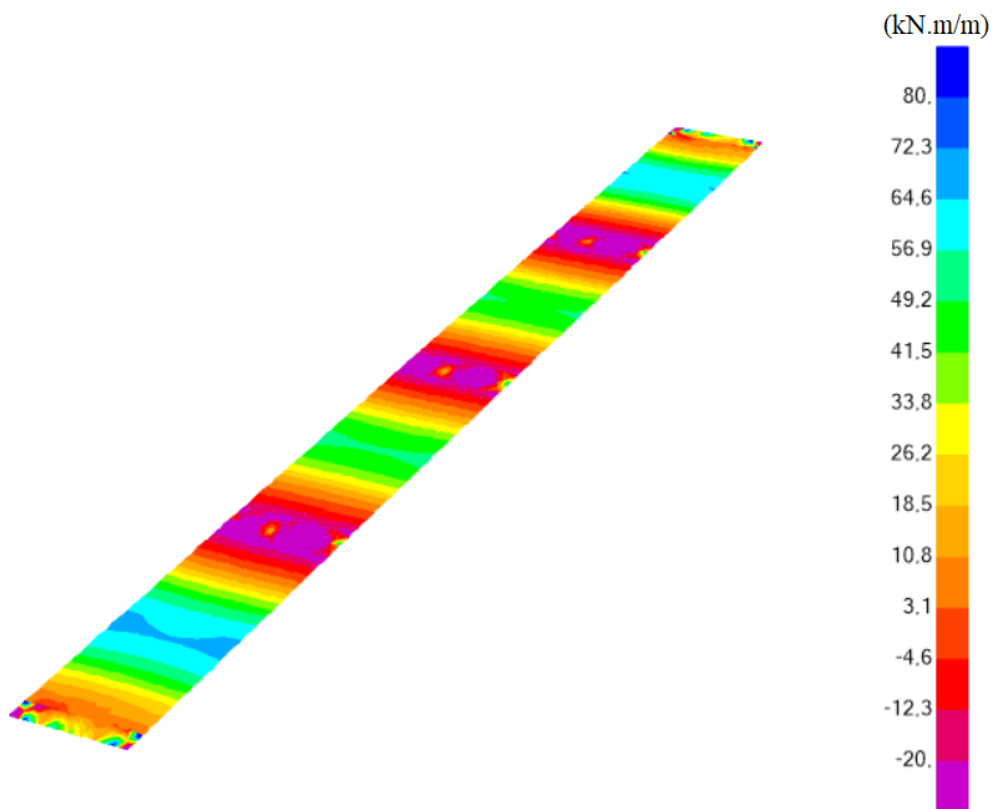


Figura 9.187 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{22} .

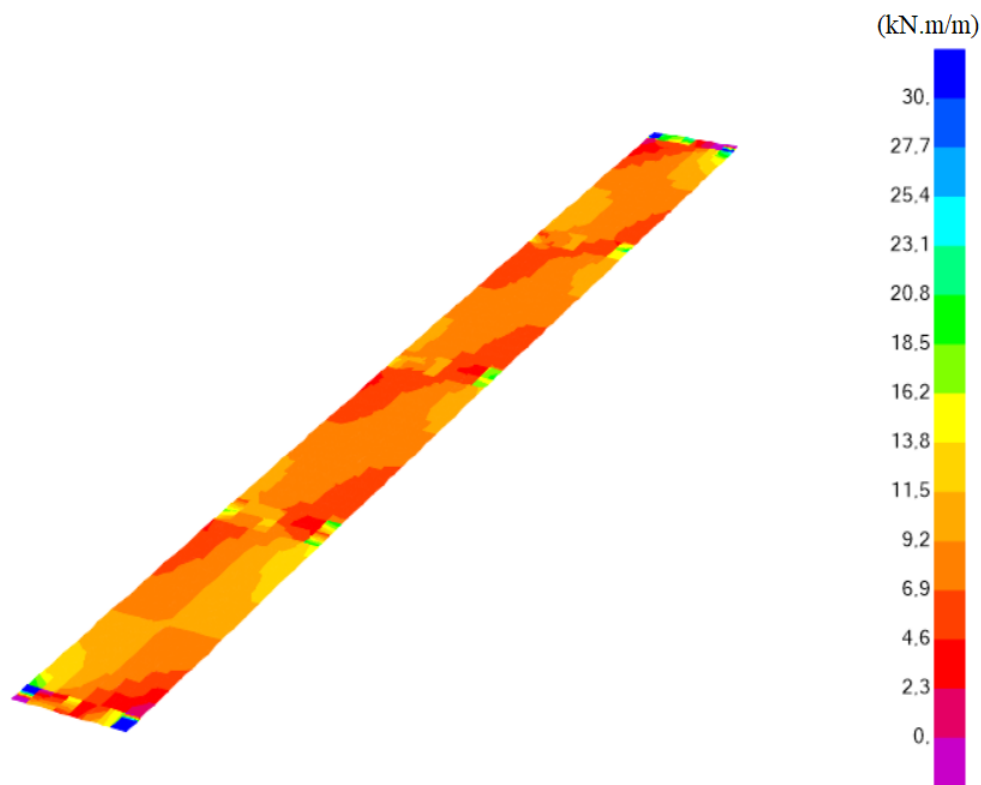


Figura 9.188 Envolvente Máxima dos Momentos Positivos de Cálculo M_{12} .

Dimensionamento das Lajes aos Estados Limites Últimos

O dimensionamento das armaduras de flexão está resumido na tabela 9.150.

Tabela 9.150 Armaduras de Flexão nas Lajes.

Armaduras de flexão							
Laje	M_{Ed}	$M_{Ed,max}$ (kN.m/m)	h (m)	$A_{s,min}$ (cm ² /m)	$A_{s,cal}$ (cm ² /m)	Armaduras adotadas	$A_{s,gdot}$ (cm ² /m)
Laje	$M_{11,Ed}^{(-)}$	-20,9	0,16	1,75	4,32	$\phi 10 // 0.175$	4,51
	$M_{11,Ed}^{(+)}$	30,2	0,16	1,75	6,36	$\phi 10 // 0.1$	7,9
L1 AB	$M_{22,Ed}^{(-)}$	-52,5	0,16	1,75	11,68	$\phi 16 // 0.15$	13,4
	$M_{22,Ed}^{(+)}$	33,2	0,16	1,75	7,04	$\phi 12 // 0.15$	7,53
Laje	$M_{11,Ed}^{(-)}$	-46	0,22	2,65	6,25	$\phi 12 // 0.175$	6,46
	$M_{11,Ed}^{(+)}$	7,82	0,22	2,65	2,65	$\phi 10 // 0.275$	2,9
L2 AB	$M_{22,Ed}^{(-)}$	-21,6	0,22	2,65	2,87	$\phi 10 // 0.275$	2,9
	$M_{22,Ed}^{(+)}$	13,4	0,22	2,65	2,65	$\phi 10 // 0.275$	2,9
Laje	$M_{11,Ed}^{(-)}$	-31,1	0,16	1,75	6,57	$\phi 12 // 0.15$	7,53
	$M_{11,Ed}^{(+)}$	11,4	0,16	1,75	2,31	$\phi 10 // 0.275$	2,9
L1 FG	$M_{22,Ed}^{(-)}$	-84,4	0,16	1,75	20,77	$\phi 12 // 0.15 + \phi 16 // 0.15$	20,9
	$M_{22,Ed}^{(+)}$	69,6	0,16	1,75	16,28	$\phi 12 // 0.175 + \phi 16 // 0.175$	17,95

Dimensionamento das Lajes aos Estados Limites de Serviço

Controlo da Fendilhação

A verificação da fendilhação foi efetuada com recurso ao *software* “Gala Reinforcement” no cálculo das aberturas de fendas, comparando-se posteriormente os valores obtidos com o limite W_{max} , para classes de exposição XC4 que deve ser inferior a 0,3mm.

Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	1	0,99	-0,62	151,641	0,14956	0,19443	0,32181

Figura 9.189 Controlo da fendilhação nas Lajes L1 AB.

Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	2	0,20	-0,34	306,744	0,06172	0,10493	0,14402

Figura 9.190 Controlo da fendilhação nas Lajes L2 AB.

Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	1	1,45	-1,10	91,378	0,13289	0,17276	0,30715

Figura 9.191 Controlo da fendilhação nas Lajes L2 FG.

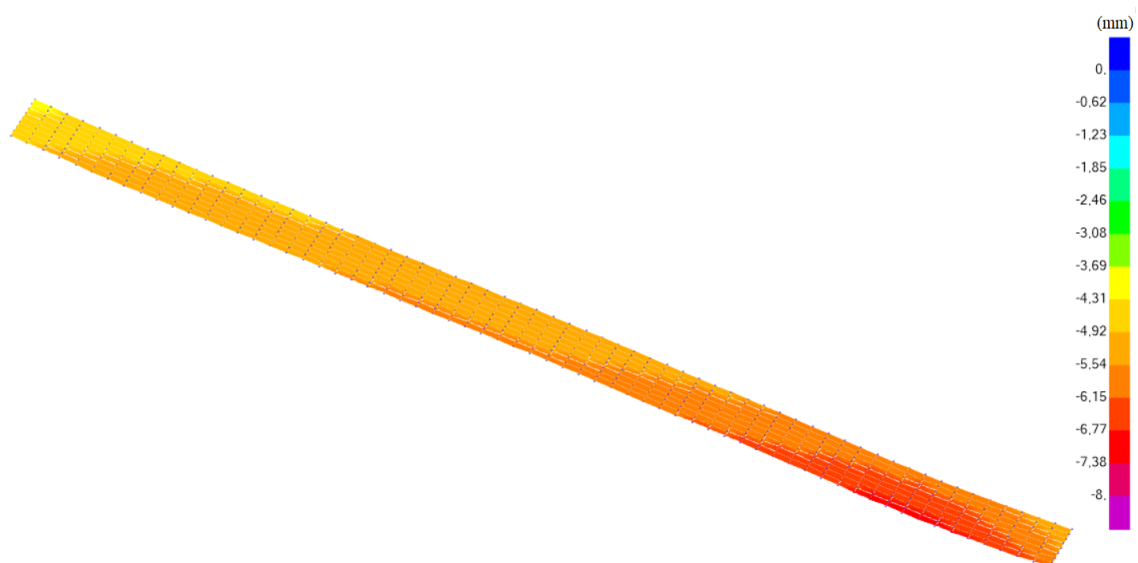
As armaduras mínimas de fendilhação encontram-se indicadas na tabela 9.151.

Tabela 9.151 Armaduras mínimas de fendilhação nas lajes.

Lajes	h (m)	b (m)	k -	k_c -	$f_{ct,eff}$ (Mpa)	A_{ct} (m^2)	F_{yk} (Mpa)	$A_{s,min}$ (cm^2)
L1 AB	0,16	1	1	0,4	2,9	0,08	500	3,28
L2 AB	0,22	1	1	0,4	2,9	0,11	500	4,64
L1 FG	0,16	1	1	0,4	2,9	0,08	500	3,34

Controlo da Deformação

As lajes do hangar servem apenas de vistoria pelo que se considerou uma deformação vertical admissível de $\delta_{adm} = L/250$. Nas figuras seguintes encontram-se representadas as flechas verticais máximas nas lajes em regime elástico.

**Figura 9.192** Deformações verticais máximas nas lajes L1 AB.**Figura 9.193** Deformações verticais máximas nas lajes L2 AB.

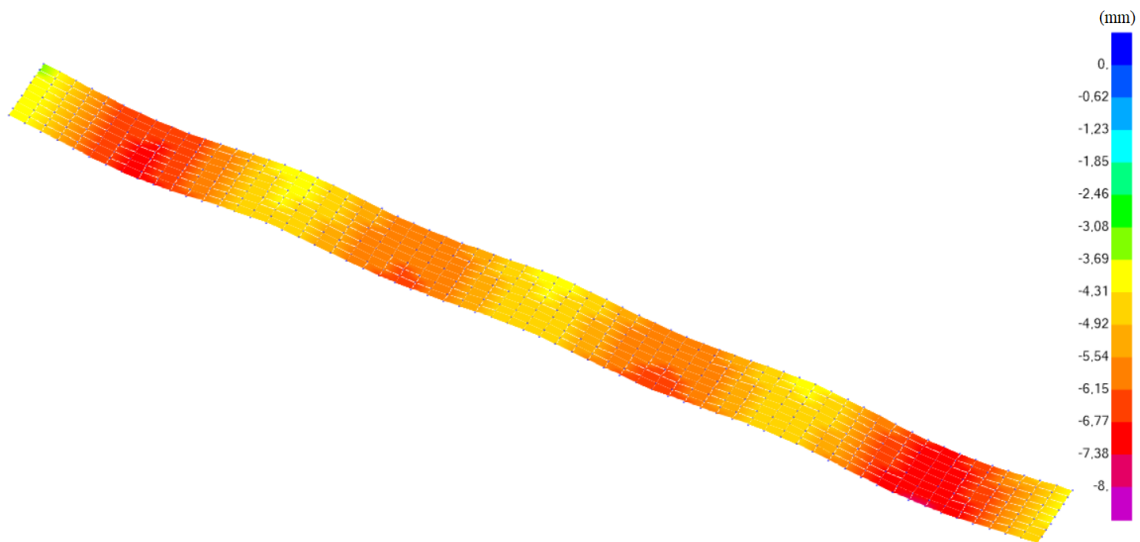


Figura 9.194 Deformações verticais máximas nas lajes L1 FG.

Tabela 9.152 Controlo das deformações verticais nas lajes.

Lajes	Vão (<i>m</i>)	δ_v (<i>mm</i>)	δ_{adm} (<i>mm</i>)	Rácio
L1 AB	1,65	1,9	6,6	0,29
L2 AB	1,4	2,8	5,6	0,50
L1 FG	2,1	4,0	8,4	0,48

Nota: O cálculo das flechas nas lajes pressupõe a subtração entre os deslocamentos observados nas secções extremas e nos pontos de deslocamento máximo.

9.3.4 Maciços de encabeçamento das estacas

A função destes elementos é transmitir as cargas da superestrutura às estacas. Todos os maciços de encabeçamento do Hangar apresentam a mesma geometria, e apoiam em 8 estacas com diâmetros de 0,5m e comprimentos de 29 metros.

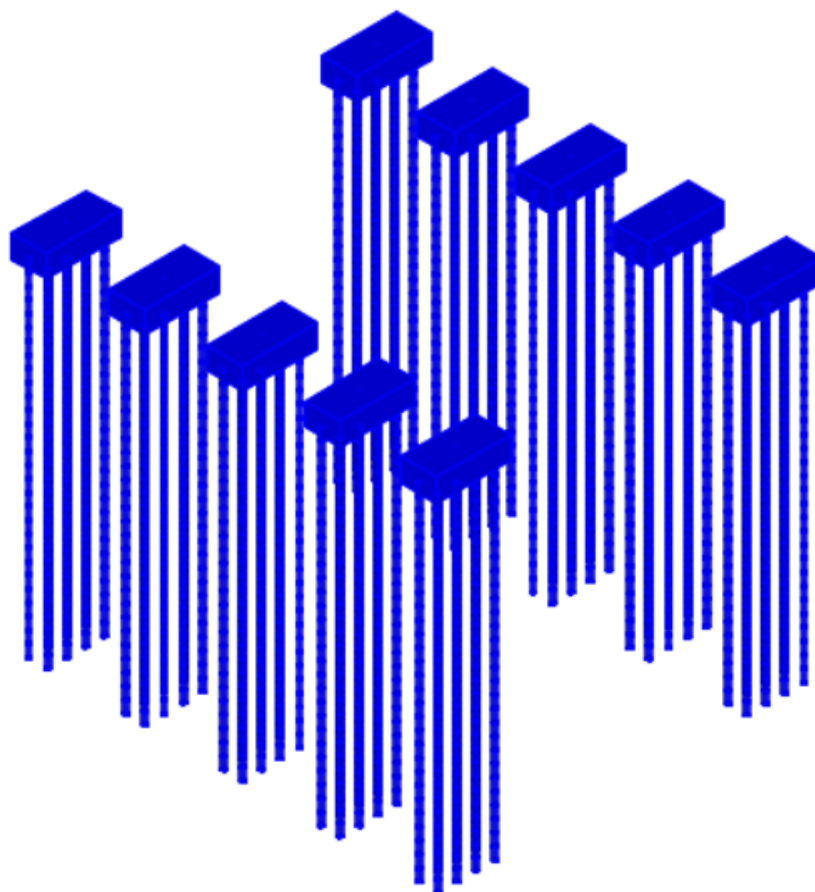


Figura 9.195 Maciços de Encabeçamento e Estacas .

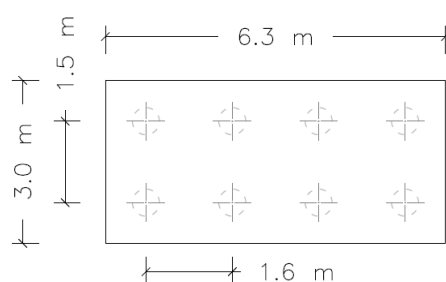


Figura 9.196 Geometria dos maciços.

Dimensionamento aos Estados Limites Últimos

Uma vez que os maciços não podem ser considerados como peças de eixo linear, recorreu-se ao método das escoras e tirantes para o seu cálculo. Foi considerado um modelo de treliça de modo a equilibrar as cargas aplicadas nos pilares, próximo do comportamento elástico para garantir o controlo das deformações e fendilhações. As escoras foram posicionadas de

modo a seguirem as trajetórias dos campos de compressão do betão, e os tirantes orientados segundo as direções das trações. Este sistema garante o equilíbrio das ações exteriores.

Com base neste modelo, concluiu-se que as armaduras, correspondiam às armaduras mínimas.

Dimensionamento aos Estados Limites de Serviço

Controlo da Fendilhação

O controlo da fendilhação foi efetuado com recurso ao programa “Gala Reinforcement” para a determinação da abertura de fendas. A segurança à fendilhação verifica-se sempre que o valor de cálculo das aberturas W_k , seja inferior ao valor limite W_{max} , que no caso de uma classe de exposição XC2 tem o valor de 0,3mm.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	S _m [mm]	W _m [mm]	W _k [mm]	W _s [mm]
L1	-2883	-3145	-80	L1							No cracks
L2	-2888	2910	-9	L2							No cracks
L3	-3408	1825	-507	L3							No cracks
L4	-3162	-2163	512	L4							No cracks

Figura 9.197 Controlo da fendilhação nos maciços.

9.3.5 Estacas

Conforme referido na memória descritiva deste projeto recorreu-se ao modelo de “Winkler” para a determinação das rigidezes das molas que simulam a interação das estacas com os diferentes estratos atravessados.

Na tabelas 9.153 e 9.154 indicam-se os parâmetros necessários para o cálculo das rigidezes das molas.

Tabela 9.153 Características geométricas e elásticas das estacas.

Parâmetro	D_e (m)	A_e (m ²)	I_e (m ⁴)	E_e (Gpa)
Valor	0,5	0,196	0,003	33

Tabela 9.154 Características geológicas do terreno.

Estrato	Terreno	N_{SPT}	Espessura (m)	E_s (kPa)	ν_s
1	Argilas médias	16	14	10000	0,2
2	Argilas duras	30	11	15000	0,2
3	Argilas muito duras	50	4	30000	0,2

Na tabela 9.155 resumem-se as rigidezes calculadas para as “molas” das estacas.

Tabela 9.155 Rigidez das “molas” das estacas ao longo dos estratos.

Profundidade $Z(m)$	$K_z(kN/m)$		
	u1	u2	u3
-1	8862	8862	0
-2	8862	8862	0
-3	8862	8862	0
-4	8862	8862	0
-5	8862	8862	0
-6	8862	8862	0
-7	8862	8862	0
-8	8862	8862	0
-9	8862	8862	0
-10	8862	8862	0
-11	8862	8862	0
-12	8862	8862	0
-13	8862	8862	0
-14	8862	8862	0
-15	13750	13750	0
-16	13750	13750	0
-17	13750	13750	0
-18	13750	13750	0
-19	13750	13750	0
-20	13750	13750	0
-21	13750	13750	0
-22	13750	13750	0
-23	13750	13750	0
-24	13750	13750	0
-25	13750	13750	0
-26	29136	29136	0
-27	29136	29136	0
-28	29136	29136	0
-29	29136	29136	37025913

Dimensionamento das estacas aos Estados Limites Últimos

- Verificação da capacidade resistente do terreno

A verificação da capacidade resistente do terreno foi efetuada com recurso a uma folha de cálculo “Excel”, a partir dos princípios definidos na memória descritiva e considerando os parâmetros indicados na tabela 9.156.

Tabela 9.156 Parâmetros geotécnicos utilizados no cálculo.

Estrato	Terreno	N_{SPT}	Espessura (m)	$C_u(kPa)$	α	N_c
1	Argilas médias	16	14	50	0,5	9
2	Argilas duras	30	11	150	0,5	9
3	Argilas muito duras	50	4	250	0,5	9

Tabela 9.157 Verificação do estado limite de rotura do terreno para a Combinação 1 - Abordagem de Cálculo 1.

Estado Limite Último de Rotura do Terreno - AC1 Combinação 1					
Grupo de estacas	Ações		Valor de cálculo	Capacidade resistente	Rácio
	$G_k(kN)$	$Q_k(kN)$	$F_{c,d}(kN)$	$R_{c,d}(kN)$	
Grupo 1	1674,7	691,3	3297,795	14293,3	0,231
Grupo 2	1426,7	860,1	3216,195	14293,3	0,225
Grupo 3	2327,3	992,3	4630,305	14293,3	0,324
Grupo 4	1911,7	1025,3	4118,745	14293,3	0,288
Grupo 5	2306,8	992,3	4602,63	14293,3	0,322
Grupo 6	1870,2	1025,3	4062,72	14293,3	0,284
Grupo 7	2215,2	992,3	4478,97	14293,3	0,313
Grupo 8	1815,6	1025,3	3989,01	14293,3	0,279
Grupo 9	1647	691,3	3260,4	14293,3	0,228
Grupo 10	1375,3	860,1	3146,805	14293,3	0,220

Tabela 9.158 Verificação do estado limite de rotura do terreno para a Combinação 2 - Abordagem de Cálculo 1.

Estado Limite Último de Rotura do Terreno - AC1 Combinação 2					
Grupo de estacas	Ações		Valor de cálculo	Capacidade resistente	Rácio
	$G_k(kN)$	$Q_k(kN)$	$F_{c,d}(kN)$	$R_{c,d}(kN)$	
Grupo 1	1674,7	691,3	2573,39	10958,2	0,235
Grupo 2	1426,7	860,1	2544,83	10958,2	0,232
Grupo 3	2327,3	992,3	3617,29	10958,2	0,330
Grupo 4	1911,7	1025,3	3244,59	10958,2	0,296
Grupo 5	2306,8	992,3	3596,79	10958,2	0,328
Grupo 6	1870,2	1025,3	3203,09	10958,2	0,292
Grupo 7	2215,2	992,3	3505,19	10958,2	0,320
Grupo 8	1815,6	1025,3	3148,49	10958,2	0,287
Grupo 9	1647	691,3	2545,69	10958,2	0,232
Grupo 10	1375,3	860,1	2493,43	10958,2	0,228

- Dimensionamento orgânico

Flexão Composta

As armaduras longitudinais foram calculadas com recurso ao *Software* “Gala Reinforcement” com base no traçado das envolventes resistentes ($N + M_y + M_z$), na geometria da secção e nas armaduras previamente arbitradas.

Na figura 9.198 encontra-se representada a variação dos esforços axiais ao longo do grupo de estacas mais solicitado.

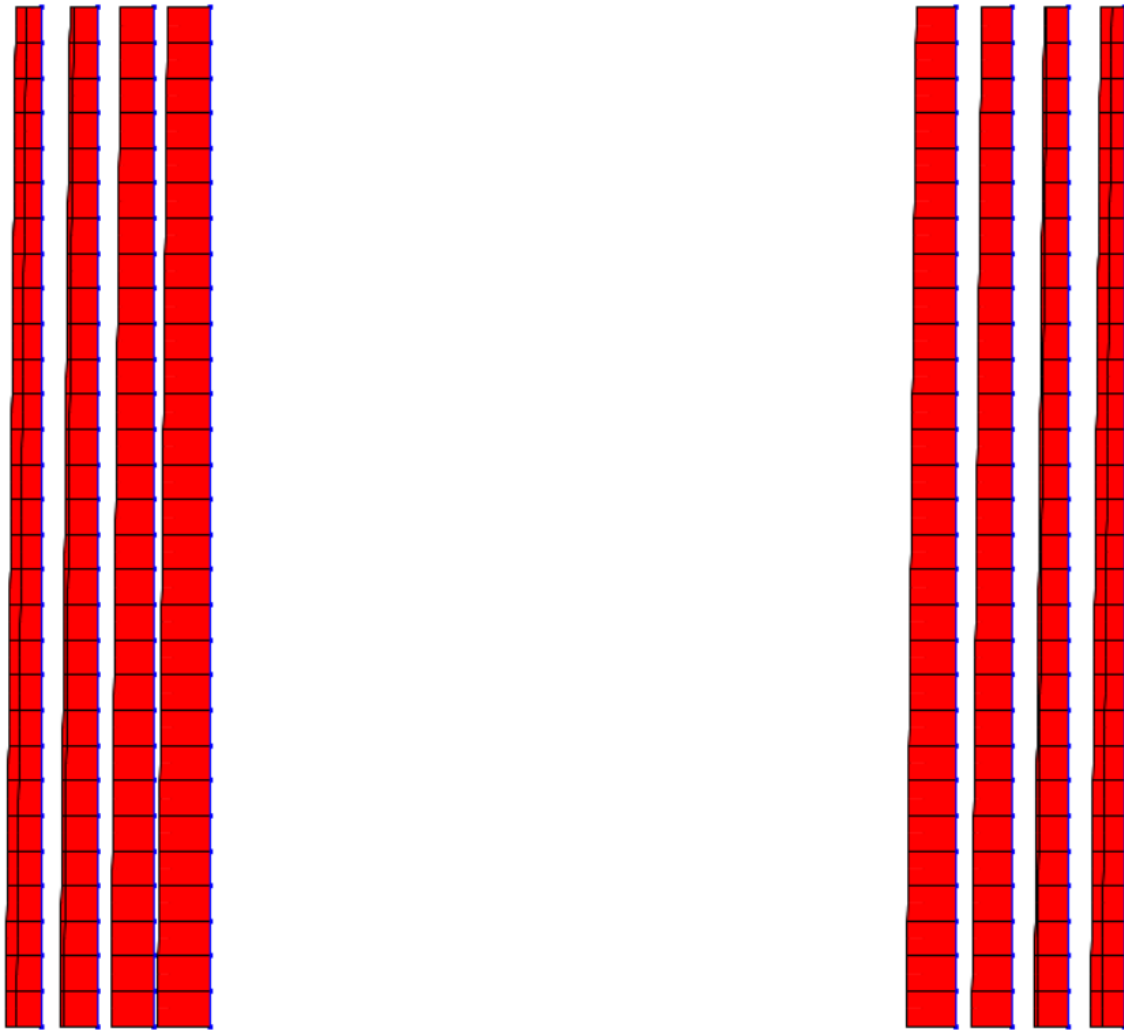


Figura 9.198 Diagrama de esforços axiais.

Tendo em consideração a geometria circular das secções das estacas:

$$M_{Final} = \sqrt{M_{22}^2 + M_{33}^2}$$

Os valores dos maiores esforços de flexão encontram-se localizados nas secções correspondentes aos primeiros 6 metros, acabando por diminuir gradualmente com a profundidade, conforme mostra a figura 9.199.

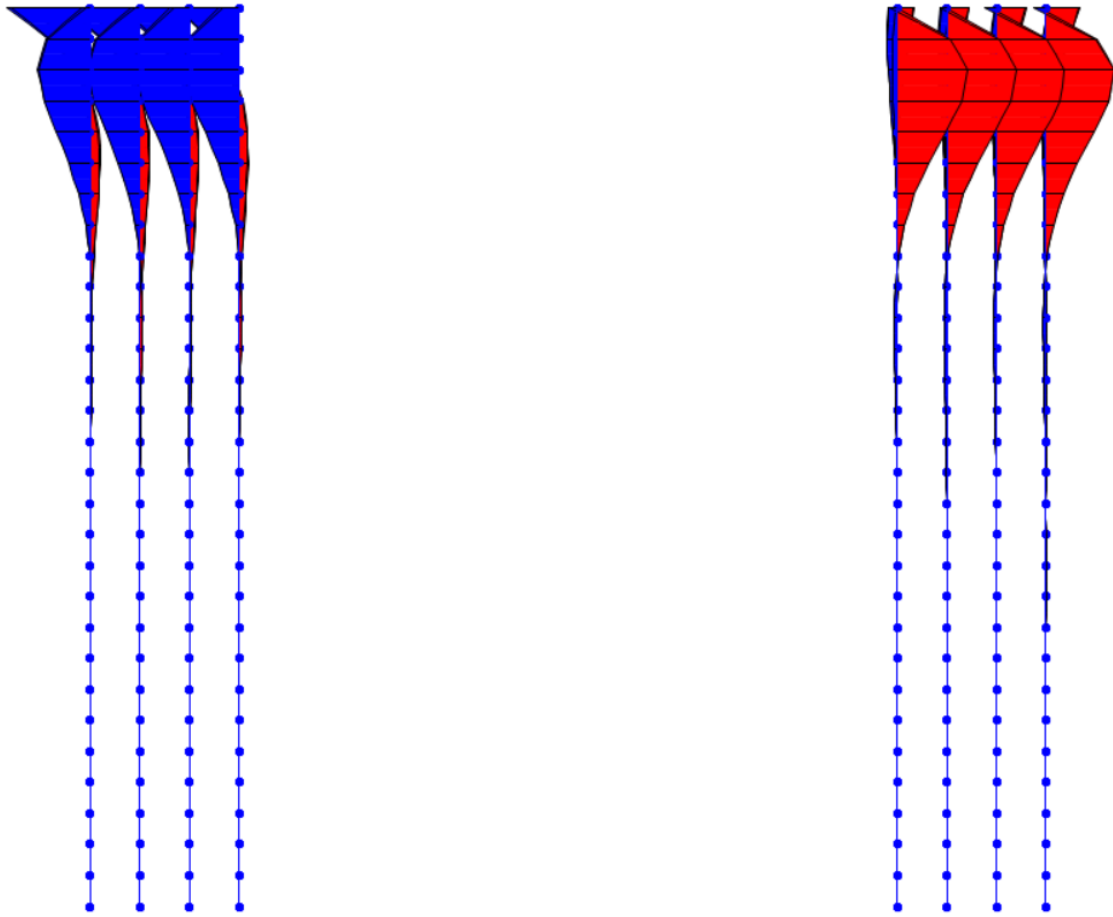


Figura 9.199 Diagrama dos momentos M_3 ao longo das estacas.

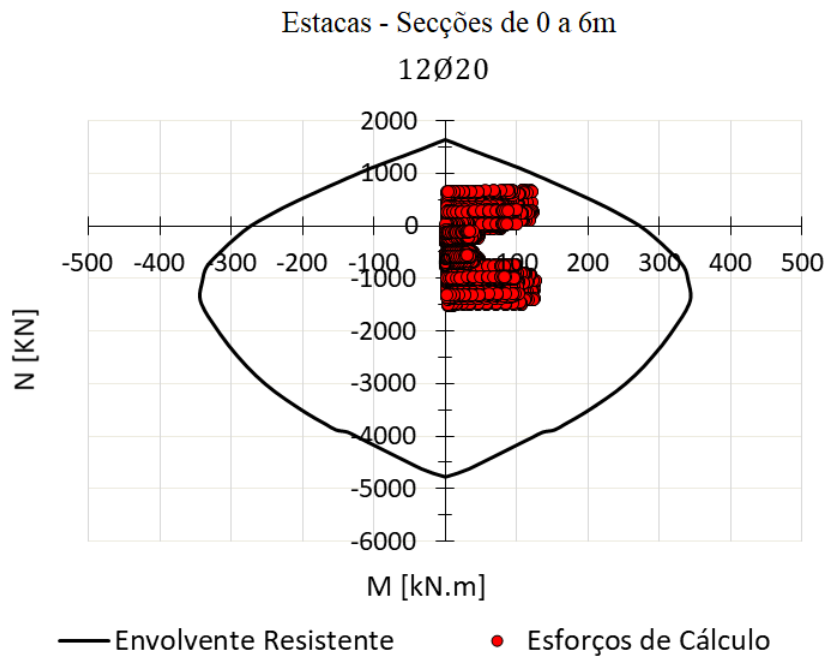


Figura 9.200 Ábaco de flexão composta das Estacas - Secções de 0 a 6m.

O dimensionamento das secções mais esforçadas nos primeiros 6 metros resume-se na tabela 9.159.

Tabela 9.159 Armadura longitudinal adotada e verificação das disposições construtivas.

Estacas		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares		
$D_e(m)$	$A_c(cm^2)$	Solução	$A_s(cm^2)$	$S(mm)$	$A_{s,bpmin}(cm^2)$	$\phi_{min}(mm)$	$S_{max}(mm)$
0,5	0,196	12 ϕ 20	37,68	110	9,82	16	200

Os momentos e esforços axiais para as combinações condicionantes nas restantes secções das estacas são pouco significativos, razão pela qual foi considerada a armadura mínima regulamentar, mantendo o mesmo número de varões, ou seja, optou-se pela utilização de 12 ϕ 16, conforme pode se observado no ábaco da figura 9.201.

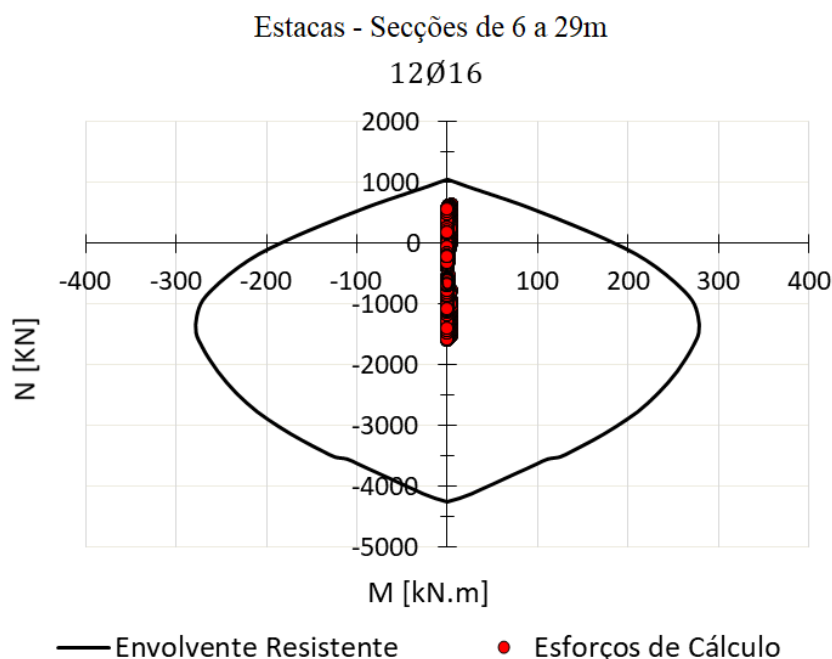


Figura 9.201 Ábaco de flexão composta das Estacas - Secções de 6 a 29m.

Esforço Transverso

O esforço transverso de cálculo considerado foi:

$$V_{Final} = \sqrt{V_{22}^2 + V_{33}^2}$$

Os resultados do dimensionamento das armaduras transversais nas estacas estão resumidos na tabela 9.160.

Tabela 9.160 Armaduras de esforço transverso nas estacas.

Estacas	V_{Ed} (kN)	$V_{Rd,max}$ (kN)	(A_{sw}/S) (cm^2/m)	$(A_{sw}/S)_{min}$ (cm^2/m)	$(A_{sw}/S)_{calc}$ (cm^2/m)	$(A_{sw}/S)_{adot}$ (cm^2/m)	ϕ -
0 m a -5 m	32,4	1045,44	1,9	4,4	4,4	4,51	ϕ 10 // 0.175
-5 m a -29 m	1,6	1045,44	0,1	4,4	4,4	4,51	ϕ 10 // 0.175

Dimensionamento das Estacas aos Estados Limites de Serviço

Controlo da Fendilhação

O cálculo das aberturas de fendas foi efetuado com recurso ao *Software* “Gala Reinforcement”, considerando uma abertura de fendas inferior a 0,3mm para uma classe de exposição XC2.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	S _m [mm]	W _m [mm]	W _k [mm]	W _s [mm]
L1	-415	89	L1	4	0.21	-0.40	127.168	0.02661	0.04523	0.05597
L2	-196	24	L2							No cracks

Figura 9.202 Controlo da Fendilhação nas Estacas.

9.3.6 Plintos

Os plintos têm como função suportar os pilares metálicos dos alçados de topo do hangar.

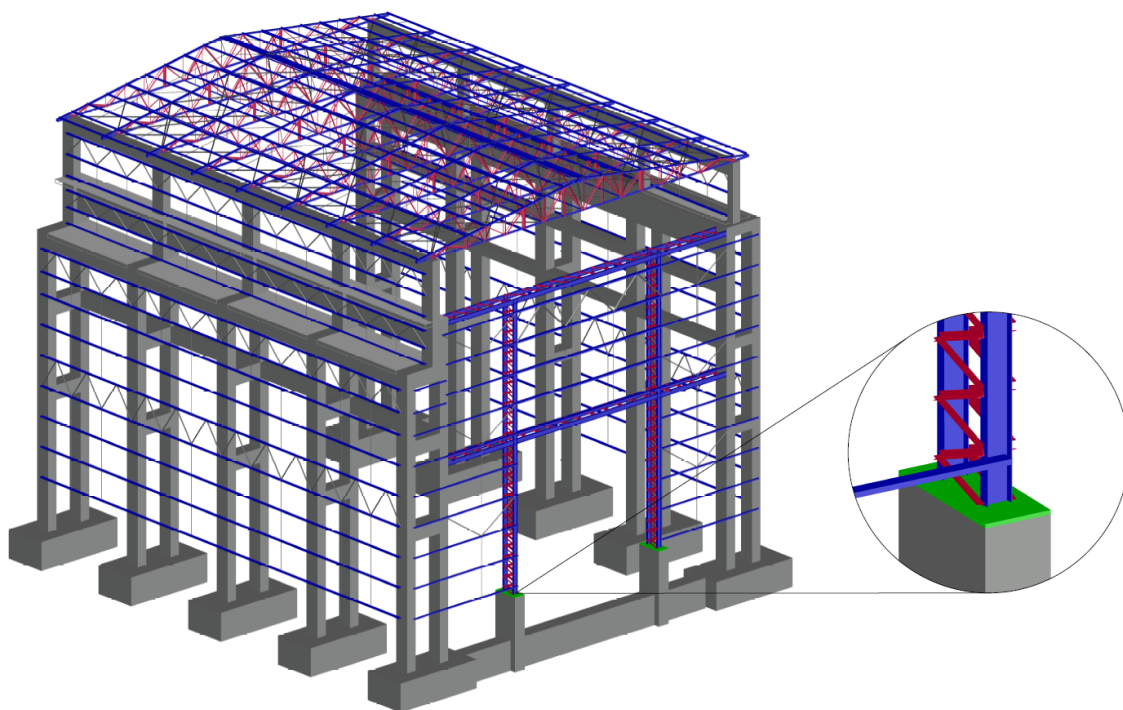


Figura 9.203 Plintos.

Dimensionamento dos Plintos aos Estados Limites Últimos

Armaduras de flexão

Os plintos foram dimensionados à flexão composta desviada com recurso também ao *software* “Gala Reinforcement” com base nos esforços das combinações mais desfavoráveis. As dimensões dos plintos foram previamente arbitradas tendo em consideração a dimensão das chapas da base e dos chumbadouros. Os ábacos de dimensionamento encontram-se representados na figura 9.204.

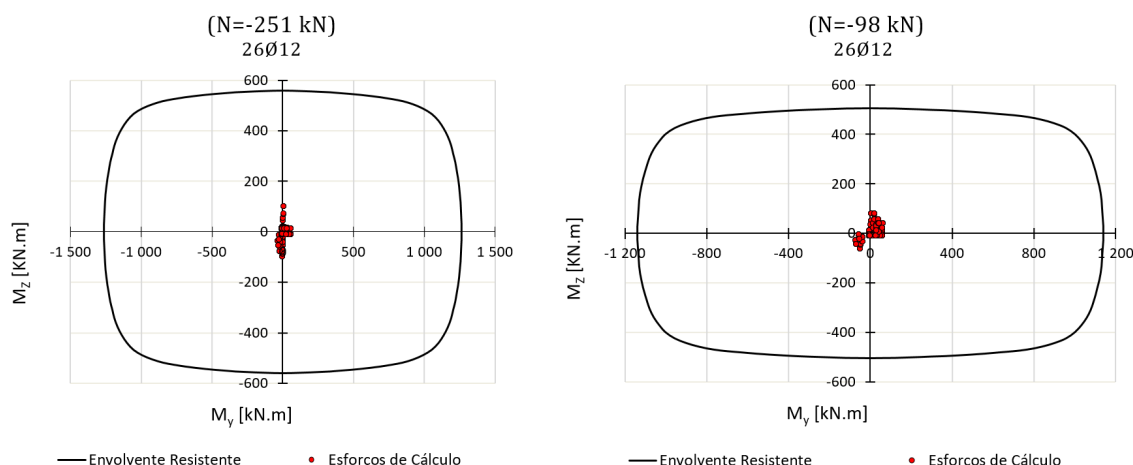


Figura 9.204 Ábacos de dimensionamento dos plintos.

Tabela 9.161 Armaduras de Flexão.

Plintos		Armaduras longitudinais			Disposições regulamentares			
$b(m)$	$h(m)$	Solução	$A_s(cm^2)$	$S(mm)$	$A_{s,min}(cm^2)$	$A_{s,max}(cm^2)$	$\phi_{min}(mm)$	$S_{min}(mm)$
0,64	1,42	26Ø12	29,4	180	18,18	363,5	8	25

Armaduras de Esforço Transverso

As armaduras transversais obtidas estão indicadas na tabela 9.162.

Tabela 9.162 Armaduras de Esforço Transverso.

Armaduras de Esforço Transverso							
$V_{Ed}(kN)$	$(A_{sw}/S)(Cm^2/m)$	Nº ramos	$(A_{sw}/S)ramo(Cm^2/m)$	Solução	$(A_{sw}/S)adot.(Cm^2/m)$	$(A_{sw}/S)min.(Cm^2/m)$	$(A_{sw}/S)max.(Cm^2/m)$
26,3	5,6	4	1,40	Ø8//0.25	8,0	5,6	77,7

Dimensionamento dos Plintos aos Estados Limites de Serviço

Controlo da fendilhação

A verificação da fendilhação foi efetuada através do *software* “Gala Reinforcement” com base no valor máximo de abertura de fendas para uma classe de exposição XC2.

Load	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Load	Bar	es [o/oo]	ec [o/oo]	Srm [mm]	Wm [mm]	Wk [mm]	Ws [mm]
L1	-126	42	-7	L1							No cracks
L2	-135	37	9	L2							No cracks
L3	-136	25	11	L3							No cracks

Figura 9.205 Controlo da Fendilhação nos Plintos.

A - PEÇAS ESCRITAS
III - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerações Finais

Com a realização deste trabalho foi possível aprofundar e consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso acadêmico, nomeadamente na área do projeto em estruturas metálicas e betão armado, através da elaboração de elementos escritos e desenhados necessários para a realização da obra.

Neste trabalho foram encontradas algumas dificuldades relacionadas com a modelação de algumas partes da estrutura, tais como as dos alçados e também as ligações dos maços de encabeçamento às estacas. Através da análise do comportamento da estrutura e dos resultados obtidos verificaram-se algumas incoerências na configuração dos diagramas de esforços que conduziram à procura de novas soluções a adotar na modelação dessas estruturas.

Importa também referir algumas evidências verificadas na realização do trabalho:

- De modo geral, os elementos metálicos da cobertura e alçados são condicionados pela ação do vento;
- Para as estruturas de betão armado a ação condicionante é o sismo;
- Alguns elementos de betão armado estão sobredimensionados de forma a cumprirem requisitos construtivos e funcionais;
- Os apoios das vigas da ponte rolante funcionam como apoios elásticos decorrentes da deformação axial dos pilares.

Em resumo, foi possível com este projeto:

- Compreender o modo de funcionamento de toda a estrutura;
- Consolidar e aprofundar os conhecimentos adquiridos de modo a serem aplicados no âmbito de futuros projetos de estabilidade;
- Desenvolver as capacidades de trabalho em *softwares* de cálculo automático de estruturas tais como o “SAP2000”;
- Adquirir domínio de outros programas de dimensionamento de estruturas nomeadamente o “Gala Reinforcement”, o “SemiComp+”, o “LTBeamN” e o “A3C”;
- Adquirir conhecimentos no âmbito do dimensionamento de ligações metálicas com recurso ao programa “AutoCad Advance Steel”;
- Realizar tabelas e ábacos de dimensionamento de estruturas metálicas e em betão armado que constituirão uma ferramenta importante para trabalhos futuros;
- Aperfeiçoar as técnicas de desenho em 2D e 3D no *software* “AutoCad” utilizadas na realização das peças desenhadas e no modelo digital deste projeto.

A - PEÇAS ESCRITAS

IV - BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

- [1] Agostinho, J. F. C. (2016). Dimensionamento de um edifício metálico de ensacagem a construir numa instalação industrial. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [2] Amarante, F. M. G. (2012). Encurvadura lateral em vigas metálicas sujeitas a flexão desviada. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [3] Appleton, J. (2014). *Estruturas de Betão I*. Instituto Superior Técnico.
- [4] Brettle, M. E., Brown, D., Georgakes, M., and Couchman, G. (2017). *Steel Building Design: Concise Eurocodes*. SCI.
- [5] Camotim, D., Vinagre, J., and Silvestre, N. (1999). Estabilidade de estruturas de betão, aço e mistas: análise comparativa das disposições dos eurocódigos 2, 3 e 4. *II Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista*.
- [6] Da Silva, L. S. and Santiago, A. (2003). Manual de ligações metálicas. *CMM-Associação Portuguesa de Estruturas Metálicas e Mistas*.
- [7] Da Silva, L. S., Simões, R., and Gervásio, H. (2012). *Design of Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. John Wiley & Sons.
- [8] Delgado, P. A. M. (2015). Dimensionamento de um pavilhão industrial misto com fundações indirectas. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [9] EC0 (2009). *Eurocódigo 0 (EC0) – NP EN 1990 (2009) – Bases para o projeto de estruturas*. Instituto Português da Qualidade.
- [10] EC1 (2009a). *Eurocódigo 1 (EC1) – NP EN 1991-1-1 – Acções em estruturas: Acções Gerais: Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. Instituto Português da Qualidade.
- [11] EC1 (2009b). *Eurocódigo 1 (EC1) – NP EN 1991-1-5 – Acções em estruturas: Acções Gerais: Acções térmicas*. Instituto Português da Qualidade.
- [12] EC1 (2010). *Eurocódigo 1 (EC1) – NP EN 1991-1-4 – Acções em estruturas: Acções Gerais: Acções do vento*. Instituto Português da Qualidade.
- [13] EC2 (2010). *Eurocódigo 2 (EC2) – NP EN 1992-1-1 – Projecto de estruturas de betão: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade.
- [14] EC3 (2010a). *Eurocódigo 3 (EC3) – NP EN 1993-1-1 – Projecto de estruturas de aço: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade.

-
- [15] EC3 (2010b). *Eurocódigo 3 (EC3) – NP EN 1993-1-8 – Projecto de estruturas de aço: Projecto de ligações*. Instituto Português da Qualidade.
- [16] EC4 (2011). *Eurocódigo 4 (EC4) – NP EN 1994 (2011) – Projeto de estruturas mistas aço-betão*. Instituto Português da Qualidade.
- [17] EC7 (2010). *Eurocódigo 7 (EC7) – NP EN 1997-1 – Projecto geotécnico: Regras gerais*. Instituto Português da Qualidade.
- [18] EC8 (2010). *Eurocódigo 8 (EC8) – NP EN 1998-1 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade.
- [19] Epalanga, J. A. (2019). Dimensionamento de um pavilhão industrial em estrutura metálica segundo o eurocódigo. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [20] Farinha, JS Brazão & dos Reis, A. C. (1998). *Tabelas técnicas*.
- [21] Gardner, L & Nethercot, D. (2005). Designers' guide to en 1993-1-1. *Thomson Telford, The Steel Construction Institute*.
- [22] Gorgulho, A. (2014). *Folhas da disciplina de Betão Estrutural II, versão atualizada segundo o EC2*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [23] Greiner, R., Lechner, A., and Kettler, M. (2011). Valorisation action of plastic member capacity of semi-compact steel sections – a more economic design. ÖSTV-Seminar - Workshop SEMI-COMP+ ; Conference date: 07-10-2011.
- [24] Jacinto, L. (2013). *Bases para o projecto de estruturas segundo o EC 0*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [25] Jacinto, L. (2014). *Ação do vento: quantificação de acordo com o EC 1*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [26] Lucas, F. M. A. (2017). Dimensionamento de uma estrutura metálica de suporte de uma tela transportadora de biomassa. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [27] Mendes, P. (2012). *Folhas da Unidade Curricular de Dinâmica de Estruturas*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [28] Morel, J. (1994). *Calcul des structures métalliques selon l'Eurocode 3*.
- [29] Narciso, S. P. d. S. et al. (2009). Determinação de modelos de escoras e tirantes para a análise de estruturas de betão armado.
- [30] Reis, A. (2006). *Folhas da disciplina de Pontes*. Instituto Superior Técnico.
- [31] Santos, J. (2008). Fundações por estacas acções horizontais-elementos teóricos. *Obras Geotécnicas, editor. IST-Instituto Superior Técnico*.
- [32] Santos, T. A. F. (2014). Modelo de escoras e tirantes para betão estrutural. Master's thesis, Universidade da Beira Interior.
- [33] Seah, L. and Khong, P. (1990). Lateral-torsional buckling of channel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 17(4):265–282.

-
- [34] Silva, J. T. M. (2013). I-steel beams under tension: Lateral torsional buckling, behaviour and design. Master's thesis, Instituto Superior Técnico.
- [35] Silva, T. F. B. S. (2011). Dimensionamento dos elementos constituintes de uma estrutura espacial em aço. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [36] Simoes, R. A. D. (2007). *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: euro-código 3: projecto de estruturas de aço*. CMM-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- [37] Teixeira, C. M. V. (2017). Dimensionamento de pavilhões metálicos em soluções treliçadas. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [38] Trahair, N. (1993). *Flexural-torsional buckling of structures*. CRC press.
- [39] Vieira, J. A. S. (2013). Dimensionamento de um pavilhão misto (metálico+ betão armado). Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [40] Vindima, P. M. G. (2012). Estabilidade em vigas metálicas: Cálculo de momentos críticos. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [41] Viseu, S. (2014a). *Apontamentos do curso de formação de introdução à NP EN 1993-1-1:2010*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [42] Viseu, S. (2014b). *Apontamentos do curso de formação de introdução à NP EN 1993-1-8:2010*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [43] Viseu, S. (2014c). *Projecto de Estruturas - Parte Metálica e NP EN 1991-1-4 - Acção do Vento*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.