



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Manuel Correia da Silva

Otimização de estruturas metálicas
modelares recorrendo a perfis mistos

Hélder Manuel Correia da Silva
Otimização de estruturas metálicas
modelares recorrendo a perfis mistos

UMinho | 2013

dezembro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Manuel Correia da Silva

Otimização de estruturas metálicas
modelares recorrendo a perfis mistos

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor António Marques Pinho
Engenheiro José Manuel Silva
Universidade do Minho

DECLARAÇÃO

Nome: Hélder Manuel Correia da Silva

Correio eletrónico: heldersilva90@hotmail.com

Tlm.: 916670847

Número do Bilhete de Identidade: 13732765

Título da dissertação: Otimização de estruturas metálicas modelares recorrendo a perfis mistos

Ano de conclusão: 2013

Orientador(es): António Costa Marques Pinho, José Manuel Silva

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia

Área de Especialização: Concepção de Estruturas

Escola: Engenharia

Departamento: Engenharia Mecânica

3. De acordo com a legislação em vigor, não é permitida a reprodução de qualquer parte desta dissertação

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Os meus mais sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a concretizar este projecto, mas em especial aos meus tutores, o professor António Costa Marques Pinho e o Engenheiro José Manuel Silva por toda a disponibilidade demonstrada ao longo da realização deste projecto.

Gostaria de agradecer também à empresa O Feliz Metalomecânica S.A. por me ter acolhido e permitir que realizasse um trabalho numa área que gosto, que é o cálculo estrutural, e a todas as pessoas da empresa que me acompanharam durante o meu estágio.

Resumo

Este relatório tem como função descrever o projecto realizado no âmbito da Dissertação de mestrado, integrado no 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Universidade do Minho.

Este trabalho foi realizado no âmbito de um estágio curricular, na empresa O Feliz Metalomecânica S.A, onde foi feito um estudo das estruturas mais requisitadas à empresa, com o objectivo de obter um documento de fácil consulta, com os perfis necessários para cada estrutura.

Para a execução deste projecto é necessário definir as acções que actuam nas estruturas e quantifica-las, e para tal são usadas as normas em vigor, nomeadamente os Eurocódigos e o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.

Das acções que actuam neste tipo de estruturas, a mais complexa de quantificar é a acção do vento, pois é variável, de acordo com a altura do edifício, da sua localização, da área exterior dos edifícios, da direcção do vento e actua de forma diferente nas diversas zonas do edifício. Esta dificuldade faz com que boa parte do relatório aborde o cálculo desta acção.

Para além da definição e quantificação das acções que actuam nas estruturas, é necessário analisá-las, e para tal foi utilizado o software Autodesk Robot Structural Analysis, através do qual são efectuados os cálculos estruturais e o cálculo de algumas ligações importantes.

Após uma breve introdução, vem um pequeno estudo sobre o estado da arte, de seguida tem-se os fundamentos teóricos, determinação das acções do vento nas estruturas, o cálculo estrutural dos edifícios, o estudo das ligações, os resultados obtidos, a discussão dos resultados, as conclusões e por último as propostas para trabalhos futuros.

Como resultado final deste projecto obtém-se três documentos distintos, um com a análise de todos os edifícios para seis tipos de travamentos diferentes, outro com as soluções mais vantajosas de cada edifício e por último um documento com as características das ligações estudadas.

Abstract

This document has like function to describe the project realized within the dissertation, which belongs to the 5th year of the Integrated Masters in Mechanical Engineering, of the University of Minho.

This work was realized in ambit of curricular stage, in the company O Feliz Metalomecânica S.A, where a study was made of the structures most requested company, in order to obtain an easy consultation document, with the profiles required for each structural element.

For the implementation of this is necessary to define the actions that act on structures, and quantify them, and are used for such rules, including the Eurocodes and Safety Regulations and Actions for Structures of Buildings and Bridges.

Actions operating in this type of structures, the more complex to quantify is the effect of the wind, because is variable, according to building height, your location, the area outside the buildings, wind direction, and acts differently in different areas of the building. This difficulty makes much of the report deals with this topic.

In addition to defining and quantifying the actions which act on structures, is necessary to analyze them, and for this was used Autodesk Robot Structural Analysis, whereby the structural calculations and the calculation of some important connections are realized.

After a brief introduction, comes a small study on the state of the art, then it has the theoretical foundations, the determination of wind actions in the structures, the structural calculation of the buildings, the study of connections, the obtained results, the discussion of the results, the conclusions and lastly the proposals for future work.

As a final result of this project we obtain three separate documents, one with the analysis of all buildings for six different types of lockups, one with the most viable solutions for each building and finally a document with the characteristics of the studied connections.

Abreviações e Nomenclatura

ϕ -imperfeição global do pórtico;

ϕ_0 -valor de base da imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade;

α_h -coeficiente de redução;

h -altura em metros;

α_m -coeficiente de redução associado ao número de colunas num piso;

m -número de colunas num piso, incluindo apenas aquelas que estão submetidas a um esforço axial superior ou igual a 50% do valor médio por coluna no plano vertical;

N_{ed} -valor de cálculo do esforço normal de compressão;

$v_{b,0}$ -valor básico da velocidade de referência do vento;

v_b -valor de referência da velocidade do vento;

c_{dir} -coeficiente de direcção;

c_{season} -coeficiente de sazão;

$v_m(z)$ -velocidade média do vento a uma altura z ;

$c_r(z)$ -coeficiente de rugosidade;

$c_0(z)$ -coeficiente de orografia;

z_0 -comprimento de rugosidade;

k_r -coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade;

$z_{0,II}$ -0,05m (categoria de terreno II);

z_{min} -altura mínima definida em função da categoria de terreno;

z_{max} -altura máxima;

$I_v(z)$ -intensidade de turbulência à altura z ;

k_I -coeficiente de turbulência;

σ_v -desvio padrão da turbulência;

$q_p(z)$ -pressão dinâmica de pico à altura z ;

ρ -massa volúmica do ar;

$c_e(z)$ -coeficiente de exposição;

q_b -pressão dinâmica de pico;

c_{pe} -coeficiente de pressão exterior;

c_{pi} -coeficiente de pressão interior;

α -ângulo de inclinação das travessas;

θ -ângulo de incidência do vento;

w_e -pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores;

w_i -pressão exercida pelo vento em superfícies interiores;

z_e -altura de referência para a pressão exterior;

z_i -altura de referência para a pressão interior;

ψ_0 -coeficiente ψ ;

ψ_1 -coeficiente ψ ;

ψ_2 -coeficiente ψ ;

$\gamma_{G,j}$ -coeficiente parcial relativo à acção permanente j;

$G_{k,j}$ -valor característico da acção permanente j;

$\gamma_{Q,1}$ -coeficiente parcial relativo à acção variável base da combinação 1;

$Q_{k,1}$ -valor característico da acção variável de base da combinação 1;

$\gamma_{Q,i}$ -coeficiente parcial relativo à acção variável i;

$Q_{k,i}$ -valor característico da acção variável acompanhante i;

e_1 -distância à extremidade 1;

e_2 -distância à extremidade 2;

p_1 -distância entre eixos 1;

p_2 -distância entre eixos 2;

t -espessura da peça exterior ligada de menor espessura;

d_0 -diâmetro de um furo;

ev_1 -espaçamento vertical 1;

ev_2 -espaçamento vertical 2;

ev_3 -espaçamento vertical 3;

eH_1 -espaçamento horizontal 1;

eH_2 -espaçamento horizontal 2;

eH_3 -espaçamento horizontal 3;

b_{fc} -comprimento do perfil;

t_{fc} -espessura do banzo do perfil;

h_c -altura do perfil;

t_{wc} -espessura da alma do perfil;

r_c -raio de curvatura na ligação entre o banzo e a alma de um perfil;

t_{pd} -espessura da placa de base;

b_{pd} -largura de uma placa de base;

I_{pd} -comprimento de uma placa de base;

t_g -espessura da camada de grout;

H -altura da fundação;

L -comprimento da fundação;

B -largura da fundação;

b_p -largura da placa;

h_p -altura da placa;

e_{pu} -distância entre a extremidade superior da placa e o início do perfil;

e_{pd} -distância entre a extremidade inferior da placa e o início do suporte;

t_{fd} -espessura do banzo do suporte das travessas;

h_d -altura do suporte das travessas;

I_d -comprimento do suporte das travessas;

w_d -largura do suporte das travessas;

t_{wd} -espessura da alma do suporte das travessas;

t_{hu} -espessura do reforço superior do pilar;

t_{hd} -espessura do reforço inferior do pilar;

w_a -largura da placa de reforço do pilar;

h_a -altura da placa de reforço do pilar;

t_a -espessura da placa de reforço do pilar;

a_s -espessura efectiva do cordão de soldadura;

a_f -espessura efectiva do cordão de soldadura;

a_w -espessura efectiva do cordão de soldadura;

a_{fd} -espessura efectiva do cordão de soldadura;

a_{p1} -espessura efectiva do cordão de soldadura;

a_{p2} -espessura efectiva do cordão de soldadura;

w_D -pressão exercida pelo vento na zona D do edifício;

w_E -pressão exercida pelo vento na zona E do edifício;

w_A -pressão exercida pelo vento na zona A do edifício;

w_B -pressão exercida pelo vento na zona B do edifício;

w_F -pressão exercida pelo vento na zona F do edifício;

w_G -pressão exercida pelo vento na zona G do edifício;

w_H -pressão exercida pelo vento na zona H do edifício;

w_J -pressão exercida pelo vento na zona J do edifício;

w_I -pressão exercida pelo vento na zona I do edifício;

u_x -deslocamento nodal horizontal máximo do edifício;

u_y -deslocamento nodal vertical máximo do edifício.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1.Introdução | 1 |
| 1.1.Introdução | 1 |
| 1.2.Motivação | 1 |
| 1.3.Objectivos | 1 |
| 1.4.Estrutura da dissertação | 2 |
| 2.Estado da arte..... | 5 |
| 2.1.Introdução histórica | 5 |
| 2.2.Importância da construção metálica em Portugal | 8 |
| 2.3.Características importantes da construção metálica | 9 |
| 3.Fundamentos teóricos..... | 11 |
| 3.1.Normas utilizadas..... | 11 |
| 3.2.Bases de projecto | 12 |
| 3.2.1.Classe de execução..... | 12 |
| 3.2.2.Tempo de vida útil..... | 13 |
| 3.2.3.Esquema estrutural | 13 |
| 3.3.Definição das acções que actuam nas estruturas..... | 15 |
| 3.3.1.Acções permanentes | 15 |
| 3.3.1.1.Peso próprio da estrutura | 15 |
| 3.3.1.2.Peso dos revestimentos | 16 |
| 3.3.1.3.Restantes cargas permanentes | 16 |
| 3.3.1.4.Imperfeições | 16 |
| 3.3.2.Acções variáveis..... | 18 |
| 3.3.2.1.Sobrecargas..... | 18 |
| 3.3.2.2.Acções da temperatura..... | 18 |
| 3.3.2.3.Acções do vento..... | 19 |
| 3.3.2.4.Acções da neve | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4.Determinação da acção do vento nas estruturas..... | 27 |
| 4.1.Valores de referência da velocidade do vento | 27 |
| 4.2.Vento médio..... | 28 |
| 4.3.Turbulência do vento | 31 |
| 4.4.Pressão dinâmica de pico | 33 |
| 4.5.Determinação dos coeficientes de pressões e pressões do vento que actuam nos edifícios estudados | 34 |
| 4.5.1.Coefficientes de pressão exterior..... | 34 |
| 4.5.1.1.Paredes verticais | 34 |
| 4.5.1.2.Coberturas..... | 42 |
| 4.5.2.Coefficientes de pressão interior | 46 |
| 4.5.3.Determinação das pressões de vento actuantes nos edifícios..... | 46 |
| 4.5.3.1.Pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores..... | 46 |
| 4.5.3.2.Pressão exercida pelo vento em superfícies interiores | 46 |
| 5.Cálculo Estrutural dos edifícios..... | 49 |
| 5.1.Desenho da estrutura..... | 49 |
| 5.1.1.Nós | 49 |
| 5.1.2.Barras | 49 |
| 5.1.3.Apoios da estrutura..... | 50 |
| 5.2.Atribuição das características dos elementos estruturais | 51 |
| 5.3. Introdução das cargas que actuam nas estruturas | 56 |
| 5.3.1.Definição das cargas presentes nos edifícios em estudo | 57 |
| 5.3.2.Combinações de acções..... | 58 |
| 5.3.3.Introdução das combinações de acções no software | 60 |
| 5.3.4. Quantificação e localização de todas as acções presentes na estrutura... .. | 62 |
| 5.4.Estudo estrutural dos edifícios | 69 |
| 5.4.1.Caracterização dos grupos..... | 69 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.2. Definição do tipo de membro e grupo de cada elemento estrutural..... | 70 |
| 5.4.3. Verificação de todos os elementos estruturais | 70 |
| 5.4.3.1. Análise estrutural para diferentes travamentos..... | 74 |
| 6. Estudo das ligações das estruturas | 77 |
| 6.1. Tipos de ligações..... | 77 |
| 6.1.1. Ligações de parafusos, rebites ou cavilhas..... | 77 |
| 6.1.1.1. Categorias de ligações aparafusadas..... | 77 |
| 6.1.1.2. Disposição dos furos de parafusos e de rebite..... | 77 |
| 6.1.2. Ligações soldadas..... | 79 |
| 6.1.2.1. Tipos de soldadura..... | 79 |
| 6.2. Ligações aplicadas nas estruturas estudadas | 83 |
| 6.2.1. Ligações aparafusadas | 84 |
| 6.2.2. Ligações soldadas..... | 85 |
| 6.3. Dimensionamento das ligações..... | 87 |
| 6.3.1. Dimensionamento das ligações através do software Autodesk Robot Structural Analysis | 88 |
| 6.3.1.1. Ligações fundação-pilar | 88 |
| 6.3.1.2. Ligações pilar-travessa | 95 |
| 6.3.1.3. Ligações travessa-travessa..... | 99 |
| 7. Resultados | 105 |
| 7.1. Resultados da Análise estrutural dos edifícios..... | 105 |
| 7.2. Resultados do Estudo das Ligações | 109 |
| 8. Discussão dos resultados..... | 113 |
| 9. Conclusões | 117 |
| 10. Propostas de trabalhos futuros | 119 |
| 11. Referências..... | 121 |
| 12. Anexos | 123 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1:Ponte sobre o rio Severn, em Inglaterra [2] | 5 |
| Figura 2:Ponte pênsil de Menai em Gales [2] | 6 |
| Figura 3: Edifício Home Insurance Building durante a construção e finalizado [2] .. | 6 |
| Figura 4:Torre Eiffel durante a montagem e actualmente [2] | 7 |
| Figura 5:Empire State Center, John Hancock Center e Sears Towers, respectivamente [2]..... | 7 |
| Figura 6:Ponte Maria Pia no Porto | 8 |
| Figura 7:Estrutura tipo dos edifícios | 14 |
| Figura 8:Substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes [11] | 18 |
| Figura 9:Definição do sistema de eixos dos edifícios em estudo [13] | 21 |
| Figura 10:Vento incidindo na direcção $x+$ [12]..... | 21 |
| Figura 11:Diferenciação da acção do vento ao longo das superfícies paralelas à direcção do vento [12] | 22 |
| Figura 12:Diferentes coeficientes de pressão exterior ao longo da cobertura do edifício com vento no sentido $x+$ [12]..... | 23 |
| Figura 13:Coeficientes de pressão exterior na cobertura quando o vento actua no sentido $y+$ [12]..... | 23 |
| Figura 14:Vista em planta do edifício ilustrando a acção do vento [12]..... | 35 |
| Figura 15:Estudo dos valores de h/d nas estruturas em estudo | 36 |
| Figura 16:Representação dos coeficientes de pressão exteriores no edifício | 36 |
| Figura 17:Análise da relação entre e e d nos edifícios | 37 |
| Figura 18:Representação gráfica dos coeficientes de pressão exterior nas paredes paralelas à direcção do vento..... | 38 |
| Figura 19:Configuração do edifício para o vento na direcção $y+$ [12]..... | 39 |
| Figura 20:Estudo do valor máximo da relação h/d | 40 |
| Figura 21:Representação dos coeficientes de pressão exteriores no edifício | 40 |
| Figura 22:Distinção das três zonas diferentes | 42 |
| Figura 23:Zonas diferenciadas da acção do vento na cobertura [12] | 42 |
| Figura 24:Representação dos coeficientes de pressão exterior num pórtico característico do edifício..... | 43 |
| Figura 25:Representação dos coeficientes de pressão exterior num pórtico das extremidades do edifício..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 26:Zonas diferenciadas da acção do vento na cobertura [12] | 44 |
| Figura 27:Representação dos coeficientes de pressão exterior na secção que passa pelo centro dos pórticos | 45 |
| Figura 28:Representação dos coeficientes de pressão exterior numa secção que passa pelas extremidades dos pórticos | 45 |
| Figura 29:Representação gráfica dos coeficientes de pressão interior num pórtico. | 46 |
| Figura 30:Definição dos nós da estrutura | 49 |
| Figura 31:Definição das barras da estrutura | 50 |
| Figura 32:Quadro de definição das características das barras | 50 |
| Figura 33:Definição dos apoios da estrutura | 51 |
| Figura 34:Demonstração do ícone que permite criar e caracterizar novos elementos estruturais | 51 |
| Figura 35:Características atribuídas aos pilares | 52 |
| Figura 36:Características atribuídas às travessas..... | 53 |
| Figura 37:Características atribuídas às empenas | 54 |
| Figura 38:Características atribuídas aos contraventamentos..... | 55 |
| Figura 39:Características atribuídas aos coroamentos..... | 55 |
| Figura 40:Características atribuídas aos pilaretes | 56 |
| Figura 41:Comando "cargas" do menu "Modelo de estrutura" | 57 |
| Figura 42:Quadro de definição das acções que actuarão na estrutura..... | 58 |
| Figura 43:Comando "Tabela de combinações" do menu "Cargas" | 61 |
| Figura 44:Quadro onde são introduzidas todas as combinações de acções..... | 61 |
| Figura 45:Quadro de aplicação das cargas | 62 |
| Figura 46:Representação da aplicação do peso próprio da estrutura..... | 62 |
| Figura 47:Representação da aplicação do peso dos revestimentos | 63 |
| Figura 48:Representação da aplicação das restantes cargas permanentes na estrutura | 64 |
| Figura 49:Representação da aplicação das imperfeições na estrutura..... | 65 |
| Figura 50:Representação da aplicação da sobrecarga na estrutura..... | 66 |
| Figura 51:Representação da aplicação do efeito da temperatura..... | 66 |
| Figura 52:Introdução da acção do vento na direcção $x+$ | 67 |
| Figura 53:Introdução da acção do vento na direcção $y+$ | 68 |
| Figura 54:Introdução da acção do vento na direcção $x+$ para a platibanda..... | 68 |
| Figura 55:Introdução da acção do vento na direcção $y+$ para a platibanda..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 56:Quadro para definição das características dos grupos | 70 |
| Figura 57:Quadro de caracterização de cada elemento estrutural | 70 |
| Figura 58:Ilustração do comando "Projecto em aço/alumínio" do menu "Projecto de aço" | 71 |
| Figura 59:Ilustração dos elementos definidos para a realização da verificação de todos os membros | 71 |
| Figura 60:Quadro com as verificações de todos os elementos estruturais do modelo | 72 |
| Figura 61:Ilustração dos elementos definidos para a optimização de perfis | 73 |
| Figura 62:Quadro que identifica o perfil mais adequado e a combinação mais crítica de cada grupo..... | 73 |
| Figura 63:Travamento de reforço das travessas | 74 |
| Figura 64:Travamento do banzo inferior das travessas e pilares [11]..... | 75 |
| Figura 65:Símbolos para as distâncias entre eixos dos furos de peças de ligação [15] | 78 |
| Figura 66:Soldadura de ângulo contínua [16] | 80 |
| Figura 67:Soldadura de ângulo descontínua [17] | 80 |
| Figura 68:Características das soldaduras de ângulo descontínuas [15]..... | 81 |
| Figura 69: Soldadura de ângulo em todo o contorno de orifícios [18]..... | 82 |
| Figura 70:Soldadura de topo com penetração total [19]..... | 82 |
| Figura 71:Espessura efectiva de um cordão de soldadura de um contorno de um varão [15]..... | 83 |
| Figura 72:Ilustração da ligação fundação-pilar | 84 |
| Figura 73:Ilustração da ligação entre o pilar e a travessa..... | 84 |
| Figura 74:Ilustração da ligação entre duas travessas..... | 85 |
| Figura 75:Ligação soldada entre o pilar e a placa de base | 85 |
| Figura 76:Soldaduras presentes na ligação entre o pilar e a travessa | 86 |
| Figura 77:Ligações soldadas presentes na ligação entre duas travessas | 86 |
| Figura 78:Componentes básicos das juntas estruturais de perfis em H e I [15]..... | 87 |
| Figura 79:Comando "Conexões" do menu "Projeto de aço" | 88 |
| Figura 80:Pilar e fundação a ligar seleccionados | 88 |
| Figura 81:Barra de ferramentas com o comando "Nova ligação para as barras seleccionadas"..... | 89 |
| Figura 82:Janela de atribuição das características da ligação fundação-pilar | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figura 83:Subjanela referente às características da placa de base..... | 90 |
| Figura 84:Subjanela referente às características dos parafusos de ancoragem | 90 |
| Figura 85:Subjanela referente às características da cunha | 91 |
| Figura 86:Subjanela referente às características das soldas | 91 |
| Figura 87:Subjanela referente às características das soldas | 92 |
| Figura 88:Subjanela referente aos parâmetros de cálculo da ligação | 92 |
| Figura 89:Comando para a realização do cálculo da ligação | 93 |
| Figura 90:Documento com toda a informação acerca da análise da ligação..... | 93 |
| Figura 91:Parte final do documento com os dados acerca de uma ligação do edifício com 25 metros de vão, 9 metros de altura de pilar e 7,5 metros de afastamento entre pórticos | 94 |
| Figura 92:Barra de ferramentas com o comando "Cópia de ligação" | 94 |
| Figura 93:Pilar e travessa do mesmo pórtico seleccionados | 95 |
| Figura 94:Janela de atribuição das características da ligação pilar-travessa..... | 95 |
| Figura 95:Subjanela referente às características geométricas da placa de base | 96 |
| Figura 96:Subjanela referente aos suportes da travessa | 96 |
| Figura 97:Subjanela referente às características dos parafusos..... | 97 |
| Figura 98:Subjanela referente aos reforços dos pilares e das travessas | 97 |
| Figura 99:Subjanela referente às características das soldas | 97 |
| Figura 100:Subjanela que permite definir os parâmetros de cálculo da ligação | 98 |
| Figura 101:Comando "Análise detalhada" do menu "Resultados" | 99 |
| Figura 102:Análise detalhada de duas travessas..... | 100 |
| Figura 103:Comando "Define uma ligação viga-viga" | 100 |
| Figura 104:Janela de definição das características da ligação..... | 101 |
| Figura 105:Subjanela referente às características da placa | 101 |
| Figura 106:Subjanela referente às características dos suportes das travessas..... | 102 |
| Figura 107:Subjanela referente aos parafusos | 102 |
| Figura 108:Definição das espessuras efectivas dos cordões de soldadura | 103 |
| Figura 109:Subjanela referente aos parâmetros de cálculo | 103 |
| Figura 110:Comando "Verificação Manual da ligação" | 104 |
| Figura 111:Introdução das cargas actuantes na ligação..... | 104 |
| Figura 112:Imagem ilustrativa do edifício e suas características | 105 |
| Figura 113:Acções actuantes na estrutura | 106 |
| Figura 114:Parte da tabela dos resultados finais para a zona B de vento | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figura 115:Parte da tabela das ligações Fundação-Pilar | 110 |
| Figura 116:Tabela referente às ligações Pilar-Travessa | 110 |
| Figura 117:Tabela referente às ligações Travessa-Travessa | 111 |
| Figura 118:Exemplo de uma alteração do tipo de travamento | 113 |
| Figura 119:Parte da tabela de resultados finais | 114 |

Índice de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1:Perfis das madres usadas nos edifícios | 15 |
| Tabela 2:Coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [12]..... | 22 |
| Tabela 3:Coeficientes de pressão para coberturas de duas vertentes e vento no sentido x+ [12]..... | 24 |
| Tabela 4:Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes e vento no sentido y+ [12]..... | 24 |
| Tabela 5:Valores básicos da velocidade de referência do vento [12]..... | 27 |
| Tabela 6:Categories de terreno e coeficientes de terreno [12] | 29 |
| Tabela 7:Valores dos coeficientes de rugosidade..... | 30 |
| Tabela 8:Velocidades médias do vento | 31 |
| Tabela 9:Valores de intensidade de turbulência | 32 |
| Tabela 10:Tabela com os valores dos coeficientes de pressão exterior para as zonas D e E em função de h/d [12]..... | 36 |
| Tabela 11:Tabela com os coeficientes de pressão exterior para as zonas A, B e C [12] | 38 |
| Tabela 12:Estudo dos valores de d e e..... | 41 |
| Tabela 13:Valores dos coeficientes de pressão exterior adoptados para a cobertura [12] | 43 |
| Tabela 14:Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes na direcção y+ [12]..... | 45 |
| Tabela 15:Valores recomendados dos coeficientes ψ [9]..... | 59 |
| Tabela 16:Tabela com os valores dos coeficientes γ para os estados limites últimos | 59 |
| Tabela 17:Valores dos pesos dos revestimentos aplicados nos modelos em estudo | 63 |
| Tabela 18:Valores das restantes cargas permanentes aplicados nos modelos em estudo..... | 64 |
| Tabela 19:Resultados obtidos na análise de um dos edifícios..... | 76 |
| Tabela 20:Distâncias mínimas e máximas entre eixos, distâncias às extremidades e aos bordos [15] | 78 |
| Tabela 21:Distâncias máximas e mínimas mais relevantes..... | 79 |
| Tabela 22:Exemplo dos resultados finais de um edifício | 107 |

1.Introdução

1.1.Introdução

Este projecto é realizado no âmbito da dissertação de mestrado do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Minho, e foi realizado na empresa O Feliz Metalomecânica S.A. através de um estágio curricular que teve a duração de 11 meses, de Novembro de 2012 até Setembro de 2013.

Pretende-se com este projecto analisar um tipo de estruturas e tentar otimizar todos os parâmetros da estrutura, nomeadamente quantidade de material, peso, transporte/logística, facilidade de montagem, tudo isto com vista a diminuir o custo de todo o processo, desde a fase de projecto até à conclusão da obra.

A estrutura tipo dos edifícios estudados é constituída por um conjunto de pórticos ligados entre si através das madres e dos sistemas de contraventamento. Os pórticos são constituídos por pilares e travessas, tendo estas últimas uma inclinação de 5^0 . Foram estudados 57 edifícios com dimensões diferentes, para as zonas A e B de vento, ou seja, foram realizadas 114 análises diferentes, em que por sua vez, cada uma destas foi estudada para 6 tipos de travamentos de barras diferentes, com vista a obter a melhor solução de travamento para cada edifício.

1.2.Motivação

A realização deste projecto foi motivada pelo gosto pela área do cálculo estrutural e pela vontade de querer aprender sempre mais nesta área.

Aliado ao gosto por esta área da engenharia surge a vontade de realizar algo em ambiente laboral, e que pudesse ser útil para uma empresa, neste caso, O Feliz Metalomecânica S.A.

Uma das maiores motivações deste projecto foi a possibilidade de vivenciar e trabalhar no meio laboral, ambiente esse que a maioria dos estudantes desconhece e devia conhecer pelo menos um pouco.

1.3.Objectivos

Este projecto tinha como objectivo a análise da tipologia de edifícios mais requisitada à empresa, nomeadamente pavilhões industriais e desportivos, constituídos por um conjunto de pórticos ligados entre si através das madres e dos sistemas de

contraventamento. Foi traçado como objectivo inicial o estudo de 57 edifícios com dimensões diferentes, para as zonas A e B de vento, ou seja, 114 análises diferentes.

Depois de realizada a análise é importante conseguir um documento de fácil consulta com os resultados finais de todos os estudos efectuados.

1.4.Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 12 capítulos, sendo eles a introdução, o estado da arte, os fundamentos teóricos do projecto, a determinação da acção do vento nas estruturas, o cálculo estrutural dos edifícios, o estudo das ligações das estruturas, os resultados obtidos, a discussão dos resultados, as conclusões, as propostas de trabalhos futuros, as referências e por último os anexos.

No estado da arte é feita uma breve introdução histórica da construção metálica, é analisada a importância deste tipo de construção em Portugal, e por último são analisadas algumas características importantes deste tipo construção.

No capítulo referente aos fundamentos teóricos são apresentadas as normas utilizadas na execução deste projecto, as bases de projecto, tal como a classe de execução dos edifícios, o seu tempo de vida útil e o esquema estrutural dos edifícios, e por último são definidas as acções que actuam nas estruturas.

No quarto capítulo é determinada a acção do vento nas estruturas, demonstrando todos os passos efectuados até à determinação das pressões do vento que actuam nas estruturas.

O capítulo quinto aborda todo o processo do cálculo estrutural das estruturas, começando no desenho dos edifícios no software Autodesk Robot Structural Analysis, até à obtenção dos resultados das análises.

No capítulo seguinte é abordado o tema das ligações das estruturas, onde foram analisadas as normas das ligações aparafusadas e soldadas normalmente utilizadas neste tipo de edifícios, de seguida vem a ilustração das ligações utilizadas no estudo e por último pode verificar-se o dimensionamento das ligações.

No capítulo referente aos resultados é possível ficar a conhecer todos os resultados obtidos, quer da análise estrutural dos edifícios, quer da análise das ligações.

No oitavo capítulo é feita uma análise de todos os resultados obtidos.

Por último surgem os dois capítulos finais, nomeadamente as conclusões e as propostas de trabalhos futuros, onde são realizadas as conclusões do projecto e são

propostos trabalhos que poderão ser feitos futuramente por forma a complementar o trabalho já realizado, respectivamente.

2.Estado da arte

2.1.Introdução histórica

O domínio da arte da construção em aço surge com o desenvolvimento das indústrias naval e ferroviária, tendo estes dois sectores uma enorme influência na formação de mão-de-obra qualificada [1]. No início da construção em aço esta não era muito utilizada em infra-estruturas e edifícios, onde normalmente era utilizada a madeira como material estrutural.

As estruturas metálicas têm sido usadas desde o século XII, na forma de tirantes e pendurais de ferro fundido, que funcionavam como elementos auxiliares em estruturas de madeira. No século XVI tornaram-se comuns as estruturas de telhado em ferro fundido, com sistemas estruturais pouco racionais, uma vez que nessa época a análise estática encontrava-se ainda numa fase inicial de desenvolvimento [2].

No final do século XVIII começaram a ser construídas cúpulas de igrejas e pontes. As pontes possuíam vãos em arco ou com treliças, com elementos de ferro fundido submetidos à compressão. A primeira dessas pontes, datada de 1779, situa-se em Coalbrookdale, sobre o Rio Severn, na Inglaterra (ver fig.1), e possui arcos de ferro fundido com um vão central de 30m [2].



Figura 1:Ponte sobre o rio Severn, em Inglaterra [2]

Na primeira metade do século XIX o cálculo estrutural passou por notável progresso, surgindo os sistemas estaticamente lógicos. Além disso, teve início a laminação de perfis, o que possibilitou a produção industrializada de componentes estruturais de ferro laminado. A ponte pênsil de Menai, em Gales, com vão central de 177 m, finalizada em 1826 (ver fig.2), ilustra bem esse período, no qual, também, começaram a ser construídos edifícios industriais em estrutura metálica [2].

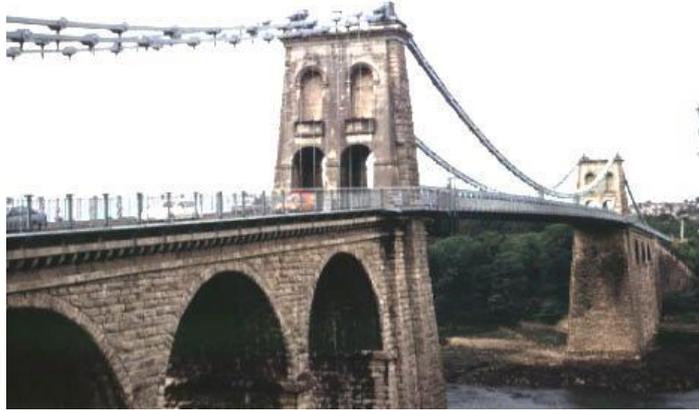


Figura 2: Ponte pênsil de Menai em Gales [2]

Os edifícios de andares múltiplos em estrutura metálica, ainda utilizando o ferro, começaram a aparecer também no início da segunda metade do século XIX. Em 1885, foi terminada a construção em Chicago, pelo engenheiro Willian le Baron Jenney, do Home Insurance Building, um edifício com dez pavimentos e o primeiro do mundo com estrutura de aço (ver fig.3). Deve-se salientar que a invenção do elevador, apresentado pela primeira vez por Elisha Graves Otis, em 1853, na Exposição de Nova York, foi fator fundamental para viabilização dos edifícios de andares múltiplos [2].

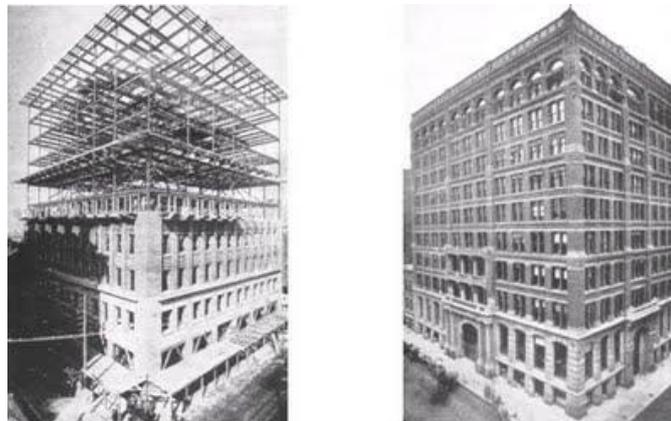


Figura 3: Edifício Home Insurance Building durante a construção e finalizado [2]

No que diz respeito às construções arrojadas, concluídas no final do século XIX, merece destaque a Torre Eiffel, finalizada em 1889 por Gustave Eiffel, com 312 m de altura, ilustrada na figura 4, símbolo até hoje da capital francesa [2].

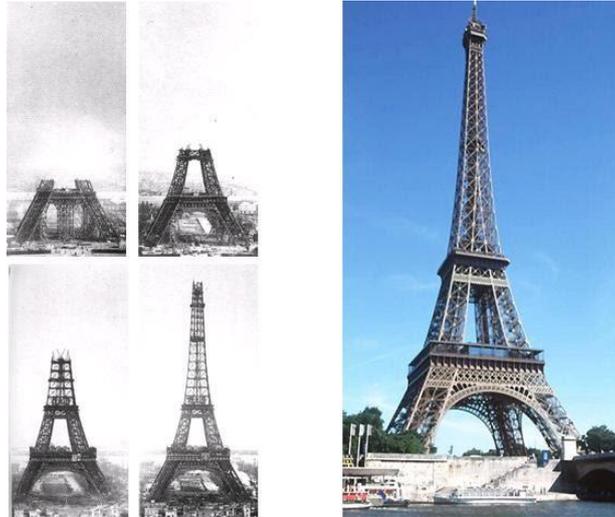


Figura 4: Torre Eiffel durante a montagem e actualmente [2]

Entre os edifícios de andares múltiplos que usam estruturas em aço, podem ser lembrados vários com cerca de uma centena de pavimentos. Um exemplo clássico é o Empire State Building, inaugurado em 1931 em Nova York, com altura total de 381 m (ver fig.5). Outros exemplos marcantes são o John Hancock Center, em Chicago, com 344 m de altura, concluído em 1969 e o Sears Towers, também em Chicago, com 443 m de altura, de 1974, tal como ilustra a figura 5 [2].



Figura 5: Empire State Center, John Hancock Center e Sears Towers, respectivamente [2]

Com a evolução da construção em aço surgem então, no séc.XIX, as primeiras infra-estruturas importantes realizadas neste tipo de construção, como é o caso das pontes realizadas em Portugal por Gustave Eiffel, sendo uma delas a ponte Maria Pia no Porto (ver fig.6).

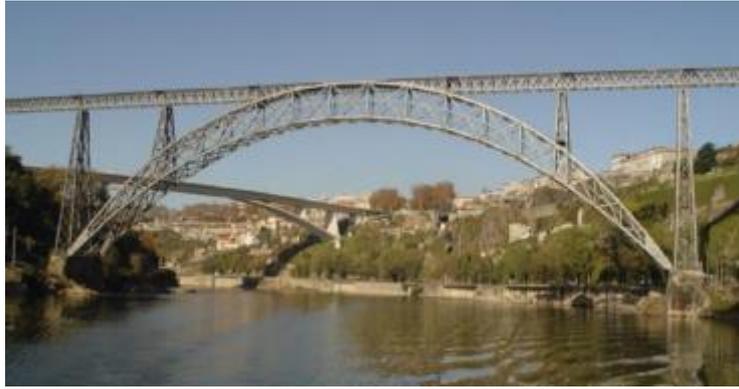


Figura 6:Ponte Maria Pia no Porto
[3]

Com a evolução da construção metálica em Portugal, esta começou a assumir outra importância, sendo usadas nas mais variadas aplicações, nomeadamente estruturas de moradias, em edifícios industriais, em coberturas, em recintos desportivos, em estruturas de máquinas de diversão, entre muitos outros.

2.2.Importância da construção metálica em Portugal

A construção metálica e mista tem demonstrado ao longo dos anos uma enorme capacidade e competência na sua sobrevivência e crescimento produtivo e financeiro, mesmo num cenário económico muito frágil e inserindo-se num mercado em clara retracção.

Tem-se revelado um sector muito dinâmico, que tem conseguido adaptar-se rapidamente às exigências e culturas distintas, contribuindo para o desenvolvimento e crescimento económico de Portugal, através de uma forte e sustentada presença em mercados internacionais.

Segundo dados dos relatórios estatísticos de produção industrial do INE de 2009-2011, a construção metálica foi responsável por 0,75% do PIB em 2011, emprega 16 mil profissionais e de 2009 para 2011 passou de 150 para 300 milhões de euros da exportação nacional [4]. O volume de negócios da construção metálica em Portugal, em 2011, foi de 1100 milhões de euros, ou seja 800 milhões em Portugal [5].

A construção metálica e mista nacional tem-se mostrado muito competitiva nos mercados internacionais, conseguindo competir com os melhores em capacidade produtiva e em competência técnica, destacando-se a participação de empresas portuguesas na construção em obras de referência arquitectónica e de engenharia em todo o mundo.

2.3.Características importantes da construção metálica

A construção metálica apresenta-se como uma forma de construção relevante e apresenta algumas características importantes, nomeadamente a flexibilidade, a durabilidade e por último a sustentabilidade.

Flexibilidade- A flexibilidade deste tipo de estruturas favorece e muito a exportação, porque permite que toda a estrutura seja totalmente preparada em fábrica e posteriormente transportada para o local da obra, ou seja, estas estruturas podem ser totalmente desenvolvidas em Portugal e de seguida transportadas em contentores para qualquer ponto do mundo. Este tipo de estruturas são utilizadas em edifícios com as mais diversas finalidades e dimensões.

Outra característica muito importante deste tipo de estruturas é o facto de serem facilmente “montáveis” e permitirem a desmontagem e uma posterior montagem noutra local caso seja pretendido.

Concluindo, estas estruturas podem ser usadas em muitas situações, com as dimensões mais variadas, que podem ser alteradas a qualquer momento, pois permitem o acréscimo de elementos estruturais ao longo do comprimento e largura da estrutura, oferecendo uma flexibilidade muito importante à estrutura que permite uma poupança considerável caso seja necessário aumentar a estrutura.

Durabilidade- As estruturas metálicas têm vários factores que influenciam a sua durabilidade, nomeadamente, os materiais constituintes, processo de execução, protecção anti corrosão e meio ambiente, possibilitando resultados de elevada fiabilidade. A Construção Metálica oferece uma vasta gama de materiais, desde aços estruturais para amplas aplicações, a ligas de alumínio de elevada resistência. Estes permitem assegurar durabilidade que se pretende para uma dada aplicação. Permitem ainda no processo de execução, quer a nível de preparação do substrato, quer ao nível de aplicação dos tratamentos anti corrosão, um controlo do processo que conduz à garantia de qualidade da protecção aplicada à estrutura. Este tipo de estruturas oferecem soluções com um largo espectro sendo, por isso, uma solução ultra flexível [6].

Sustentabilidade- Ao contrário da construção em betão, o aço é infinitamente renovável, não perdendo as suas características, propriedades ou qualidades, potenciando uma utilização sustentável do mesmo. Paralelamente, a construção metálica é reconhecidamente uma construção mais limpa e de processos mais simples,

contribuindo assim para um desenvolvimento mais sustentável e com um reduzido impacto negativo no meio-ambiente. As estruturas metálicas têm sido também uma solução amplamente utilizada em projectos relacionados com energias verdes e renováveis, cada vez mais encarados como fundamentais para o próprio desenvolvimento da humanidade [6].

3.Fundamentos teóricos

3.1.Normas utilizadas

Os fundamentos teóricos deste estudo baseiam-se nos Eurocódigos e no Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.

Os Eurocódigos estruturais dividem-se nas seguintes normas:

1. EN 1990 Eurocódigo 0: Bases para o projecto de estruturas
2. EN 1991 Eurocódigo 1: Acções em estruturas
3. EN 1992 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão
4. EN 1993 Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço
5. EN 1994 Eurocódigo 4: Projecto de estruturas mistas aço-betão
6. EN 1995 Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira
7. EN 1996 Eurocódigo 6: Projecto de estruturas de alvenaria
8. EN 1997 Eurocódigo 7: Projecto geotécnico
9. EN 1998 Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência a sismos
10. EN 1999 Eurocódigo 9: Projecto de estruturas de alumínio

Como as estruturas em estudo são executadas em aço, a norma a utilizar para o seu projecto é a NP EN 1993 e terá que ser usada em conjunto com outras normas, nomeadamente:

- EN 1990: Bases para o projecto de estruturas;
- EN 1991: Acções em estruturas;
- EN 1090: Execução de Estruturas em Aço e Alumínio – Requisitos Técnicos para Estruturas em Aço;
- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.

A norma NP EN 1990 diz respeito às bases para o projecto de estruturas, isto é, estabelece os princípios e os requisitos de segurança, de utilização e de durabilidade das estruturas, descreve as bases para o projecto e dá uma orientação sobre os aspectos de fiabilidade estrutural.

As normas da família NP EN 1991 abordam as acções gerais em estruturas e apresenta linhas de orientação para o projecto estrutural de edifícios, onde são abordados os pesos volúmicos dos materiais de construção e dos materiais armazenados

em estruturas, o peso próprio das construções, bem como as sobrecargas em edifícios. Nesta família de normas podem encontrar-se também as normas referentes à acção do vento, à acção da neve, à acção dos sismos, entre outras.

As normas da família NP EN 1993 abordam as regras de cálculo que se aplicam nos projectos de estruturas em aço. Estas abordam os requisitos de resistência, utilização, durabilidade e resistência ao fogo de estruturas de aço. As duas normas desta família utilizadas neste estudo foram a norma NP EN 1993-1-1 e a norma NP EN 1993-1-8, que dizem respeito, nomeadamente, às regras gerais e regras para edifícios e ao projecto de ligações.

O Regulamento de segurança e acções para estruturas de Edifícios e Pontes surgiu em 1983, com vista a actualizar o Regulamento de solicitações em Edifícios e Pontes, de 1961. Este regulamento aborda as verificações de segurança, a quantificação das acções, a acção das variações de temperatura, a acção do vento, a acção da neve, a acção dos sismos, as acções específicas de edifícios, as acções específicas de pontes rodoviárias, as acções específicas de passadiços e as acções específicas de pontes rodoviárias [7].

3.2.Bases de projecto

As bases de projecto são semelhantes em todos os edifícios, como é o caso da classe de execução dos edifícios, o tempo de vida útil e o seu esquema estrutural.

3.2.1.Classe de execução

A classe de execução de uma estrutura é definida recorrendo à norma EN 1090-2 (Anexo B) e permite definir os requisitos de inspecção, e deve vir indicada nas especificações do projecto [8]. O procedimento recomendado para a determinação das classes de execução são os seguintes:

- Selecção das classes de consequência, que indica as consequências, em termos de perdas humanas, económicas e ambientais expectáveis em caso de falha ou colapso de um componente;
- Selecção da categoria de serviço e categoria de produção (tabela B.1 e B.2 do mesmo anexo) que consistem nos riscos associados ao uso da estrutura e riscos associados á execução da estrutura, respectivamente;
- Determinação da classe de execução a partir dos resultados das operações anteriores, recorrendo à tabela B.3.

No caso da estrutura em estudo e efectuando o procedimento recomendado anteriormente:

- **Seleção da classe de consequência**

Recorrendo ao Anexo B da norma EN 1990:2002 podemos escolher a classe de consequência adequado às estruturas em estudo. Através do Quadro B.1 verifica-se que a classe de consequência mais adequada será a Classe de Consequência 2 que se caracteriza por originar consequência média em termos de perda de vidas humanas e consequências económicas, sociais ou ambientais mediamente importantes [9].

- **Seleção da categoria de serviço e categoria de produção**

Consultando a Tabela B.1 do Anexo B da norma EN 1090-2 verifica-se que a categoria de serviço mais indicada ao caso em estudo será a SC1, pois estamos perante uma estrutura desenhada quase só para acções estáticas, para regiões com baixa actividade sísmica [8].

Para a determinação da categoria de produção recorre-se à Tabela B.2 do mesmo documento, verificando-se que no caso das estruturas em estudo estamos perante uma Categoria de Produção 1 (PC1), uma vez que são usados aços de categoria inferior ao S355 [8].

- **Determinação da classe de execução**

Consultando a Tabela B.3 (Anexo B da norma EN 1090-2) e partindo da Classe de consequência, Categoria de serviço e Categoria de Produção determinados anteriormente, verifica-se que se esta perante uma Classe de Execução 2 e a partir daqui é obrigatório respeitar todos os requisitos que esta Classe de Execução exige ao longo do projecto [8].

3.2.2.Tempo de vida útil

Segundo a secção 2.3 da norma NP EN 1990, as estruturas em estudo terão um tempo de vida útil de projecto de 50 anos, ou seja, pertencem à categoria 4 [9].

3.2.3.Esquema estrutural

O esquema estrutural dos edifícios consiste num sistema em pórtico rígido pilar-travessa inclinada, em que para além destes dois componentes existem pilares de empena, coroamentos, contraventamentos e pilaretes (ver fig.7).

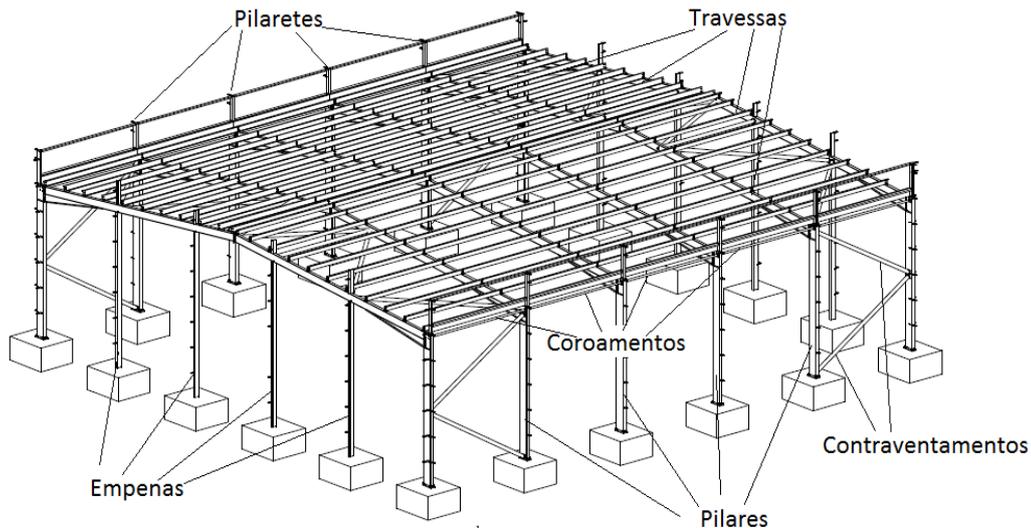


Figura 7: Estrutura tipo dos edifícios

As dimensões dos diferentes edifícios são as seguintes:

Comprimentos de vão: 10m, 12m, 15m, 20m, 24m, 25m, 30m, 35m.

Afastamentos entre pórticos:

- 5m e 6m até vãos de 15m, inclusive.
- 5m, 6m e 7,5m de vãos de 20m até 25m, inclusive.
- 6m e 7,5m desde vãos de 30m até vãos de 35m.

Alturas do pilar:

- 5m, 6m e 7,5m até vãos de 15m, inclusive.
- 6m, 7,5m e 9m nas restantes medidas de vão.

Estes valores de comprimentos de vãos, de espaçamento entre pórticos e de alturas de pilar foram seleccionados porque são os mais requisitados à empresa. Contudo, combinando estas três variáveis verifica-se um estudo para 57 estruturas com diferentes dimensões.

Todos os edifícios possuem platibanda em toda a periferia da cobertura, variando a sua altura em função dos vãos dos mesmos, nomeadamente:

- Altura de platibanda de 1m para os edifícios com um vão de 10m, 12m e 15m;
- Altura de platibanda de 1,5m para os edifícios com um vão de 20m, 24m e 25m;
- Altura de platibanda de 2m para os edifícios com um vão de 30m e 35m.

Os revestimentos dos edifícios poderão ser considerados quaisquer uns desde que o seu peso não ultrapasse os 20kg/m². As madres são enformadas a frio do tipo Z, nomeadamente as que estão representadas na tabela 1 e foram calculadas através de uma folha de cálculo fornecida pela empresa:

Tabela 1: Perfis das madres usadas nos edifícios

| Vão | Madre de cobertura | Madre de fachada |
|-----|--------------------|------------------|
| 10 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 |
| 12 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 |
| 15 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 |
| 20 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 |
| 24 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 |
| 25 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 |
| 30 | Z300x80x2,5 | Z300x80x3,0 |
| 35 | Z300x80x2,5 | Z300x80x3,0 |

Todas as estruturas têm um sistema de contraventamento necessário para fornecer à estrutura a rigidez necessária na direcção perpendicular ao plano dos pórticos. As ligações entre a base do pilar e as fundações em betão foram consideradas encastradas em todos os edifícios, com o objectivo de controlar melhor as deformações resultantes das cargas horizontais que actuam no pórtico.

3.3. Definição das acções que actuam nas estruturas

As estruturas estarão sujeitas a acções permanentes e variáveis. As acções permanentes são por exemplo, o peso próprio das estruturas, dos equipamentos fixos e dos pavimentos rodoviários, e as acções indirectas causadas por retracção e assentamentos diferenciais. As acções variáveis são por exemplo as sobrecargas nos pavimentos, vigas e coberturas dos edifícios, a acção do vento ou da neve [10].

3.3.1. Acções permanentes

As acções permanentes que são consideradas nas estruturas são o peso próprio da estrutura, o peso dos revestimentos, as restantes cargas permanentes e as imperfeições.

3.3.1.1. Peso próprio da estrutura

O peso próprio das estruturas corresponde ao peso da estrutura por unidade de área. O valor do peso próprio terá que ser estimado e segundo a experiência da empresa, e para este tipo de estruturas, o seu valor anda normalmente por volta dos 40kg/m².

Quando o modelo é estudado no software Autodesk Robot Structural Analysis, este valor é atribuído automaticamente.

3.3.1.2. Peso dos revestimentos

Tal como o próprio nome indica, esta acção na estrutura corresponde ao peso dos revestimentos que a estrutura suporta. Este valor varia com o tipo de material utilizado para os revestimentos. Normalmente, na empresa, os tipos de revestimentos utilizados são a chapa dupla com isolamento térmico e acústico, o sistema Deck com tela betuminosa e o sistema Deck com tela PVC. No estudo, o valor adoptado para o peso dos revestimentos foi de $0,2\text{kN/m}^2$, valor fornecido pela empresa, considerado um valor aceitável, tendo em conta os revestimentos fabricados e utilizados pela empresa.

3.3.1.3. Restantes cargas permanentes

As restantes cargas permanentes dizem respeito a todos os acessórios que podem ser ligados á estrutura, nomeadamente um sistema de iluminação, umas cortinas no caso de um recinto desportivo, entre muitos outros. Com a consideração destas cargas estamos a dizer que a estrutura para além das cargas provocadas pelo peso próprio da estrutura, revestimentos e imperfeições, esta ainda poderá estar sujeita a uma carga adicional sem que isso seja prejudicial para a estrutura. O valor adoptado para as restantes cargas permanentes será de 10kg/m^2 , pois é um valor aceitável para uma estrutura de um pavilhão industrial em que normalmente tem poucos acessórios ligados à cobertura, sendo este um valor sugerido pela empresa. Contudo é preciso ter em conta que quando temos um edifício que irá ter ligado à sua cobertura uma ponte rolante ou um ecrã gigante no caso de um recinto desportivo, entre outros exemplos mais críticos para a estrutura, terá que ser feito um estudo da estrutura para o caso em questão.

3.3.1.4. Imperfeições

Segundo a secção 5.3.2 da norma NP EN 1993-1-1, em pórticos susceptíveis à ocorrência de modos de encurvadura com deslocamentos laterais, como é o caso das estruturas em estudo, o efeito das imperfeições deverá ser incorporado na análise global do pórtico através de uma imperfeição equivalente com a forma de uma inclinação lateral inicial das colunas do pórtico (imperfeição global), e de deformadas iniciais dos seus elementos (imperfeições locais). As amplitudes destas imperfeições poderão determinar-se do seguinte modo (ver equação 1) [11]:

$$\phi = \phi_0 \alpha_n \alpha_m \quad (1)$$

em que:

ϕ -imperfeição global do pórtico;

ϕ_0 -valor de base: $\phi_0 = 1/200$;

α_h -coeficiente de redução, calculado em função de h através de: $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$ mas

$$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1;$$

h -altura da estrutura, em metros;

α_m -coeficiente de redução associado ao número de colunas num piso: $\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$;

m -número de colunas num piso, incluindo apenas aquelas que estão submetidas a um esforço axial N_{Ed} superior ou igual a 50% do valor médio por coluna no plano vertical considerado.

A imperfeição global do pórtico, ϕ , varia com a altura e o número de colunas num piso, logo este valor será diferente apenas em edifícios com alturas diferentes, visto que o número de colunas num piso é comum a todos os edifícios.

Depois de calculado o valor da imperfeição global do pórtico, será feita a substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes, $F_{Nó}$, aplicada num dos nós de todos os pórticos, na ligação pilares-travessas, como se pode verificar na figura 8, e o seu valor será dado através da seguinte expressão (ver equação 2):

$$F_{Nó} = \phi \cdot N_{Ed} \quad (2)$$

sendo:

$F_{Nó}$ -força horizontal equivalente

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

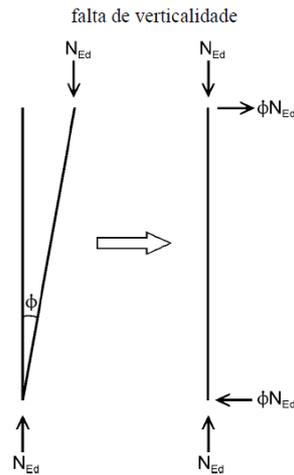


Figura 8:Substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes [11]

Os valores das forças horizontais equivalentes vão ser diferentes em todos os edifícios, pois o esforço normal de compressão varia com o afastamento entre pórticos e a imperfeição global do pórtico varia com a altura dos edifícios.

No anexo A encontram-se os valores das forças horizontais equivalentes utilizados em todos os edifícios em estudo.

3.3.2.Acções variáveis

As acções variáveis que actuam na estrutura são as sobrecargas, as acções da temperatura e as acções do vento.

3.3.2.1.Sobrecargas

No caso específico das estruturas que estão a ser estudadas, as acções de sobrecarga serão aplicadas na cobertura. Estas devem ser classificadas em três categorias, de acordo com a sua acessibilidade, e as nossas estruturas pertencem à categoria H, ou seja, coberturas não acessíveis, excepto para operações de manutenção e reparação correntes. Segundo o quadro 6.10 da EN 1991-1-1 verifica-se que o valor para a sobrecarga recomendado para coberturas da categoria H é de $0,4\text{kN/m}^2$, contudo a empresa considera este valor demasiado conservativo e sugeriu que se adoptasse o valor de $0,3\text{kN/m}^2$ [11].

3.3.2.2.Acções da temperatura

Para representar a acção das variações da temperatura ambiente sobre as estruturas consideram-se dois tipos diferentes, as variações uniformes e as diferenciais.

As variações uniformes correspondem às variações anuais da temperatura ambiente que, por se processarem com lentidão, conduzem sucessivamente a estados térmicos que se podem supor uniformes em todos os elementos da estrutura. As variações diferenciais correspondem, por sua vez, às variações rápidas da temperatura ambiente, características da evolução diária, que originam gradientes térmicos na estrutura.

Contudo, as variações diferenciais de temperatura, só são consideradas em certos tipos de estruturas que, devido à natureza dos materiais constituintes, às dimensões dos elementos e às condições de exposição, sejam particularmente sensíveis a este tipo de acção, o que não é o caso das estruturas estudadas no âmbito deste trabalho.

Segundo o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, os valores característicos das variações uniformes de temperatura em relação à temperatura média anual do local são, salvo indicação em contrário expressa pelos regulamentos relativos aos diferentes tipos de estrutura e de materiais, de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ em estruturas metálicas protegidas, que vai de encontro ao caso em estudo [7].

3.3.2.3. Acções do vento

As acções do vento variam em função do tempo e actuam directamente, na forma de pressões, sobre as superfícies exteriores das construções. No caso de construções fechadas, actuam também, indirectamente, sobre as superfícies interiores, devido à porosidade da superfície exterior. As acções do vento poderão também actuar directamente sobre a superfície interior das construções abertas [12].

Este estudo tem por objectivo abranger a zona A e B de vento, sendo a 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 600m e a zona A a generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B. Este estudo terá que ser feito para cada estrutura, logo o mesmo modelo terá duas análises distintas. Ambas as análises serão efectuadas respeitando a norma NP EN 1991-1-4 e para uma categoria de rugosidade de terreno II, ou seja, para zonas de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si, pelo menos, 20 vezes a sua altura [12].

✓ Valores de referência da velocidade do vento na zona A e B de vento

Para a quantificação das acções na zona A foi utilizado um valor de referência para a velocidade do vento de 27m/s, para a zona B considerou-se um valor de 30m/s, tal como prevê a secção 4.2 da norma NP EN 1991-1-4. Os valores das pressões dinâmicas de

pico actuantes nos edifícios variam de acordo com a velocidade de referência da sua zona de vento e com a altura do mesmo, e estes valores podem ser consultados no anexo B [12].

✓ **Coefficientes de pressões exteriores e interiores**

Os coeficientes de pressão exterior fornecem o efeito do vento sobre as superfícies exteriores dos edifícios. Os coeficientes de pressão interior fornecem o efeito do vento sobre as superfícies interiores dos edifícios.

• **Coefficientes de pressão exterior**

Os coeficientes de pressão exterior, c_{pe} , aplicáveis a edifícios e a partes de edifícios dependem das dimensões da superfície carregada. Os valores de $c_{pe,1}$ destinam-se ao cálculo de elementos de pequena dimensão e de ligações com uma área igual ou inferior a 1m^2 , tais como elementos de revestimento e elementos de cobertura. Os valores de $c_{pe,10}$ podem ser utilizados para o cálculo da estrutura resistente global de edifícios [12].

Os coeficientes de pressão exterior dividem-se em duas categorias, os que são aplicados nas paredes verticais dos edifícios e nas coberturas. Os valores dos coeficientes de pressão exterior aplicados nas paredes verticais apenas dependem da direcção do vento e das dimensões do edifício, já os que se aplicam nas coberturas dependem do tipo de cobertura e da direcção do vento. Segundo a norma NP EN 1991-1-4 as coberturas dividem-se em 5 tipos diferentes, nomeadamente coberturas em terraço, de uma vertente, de duas vertentes, de quatro vertentes e por último coberturas múltiplas [12].

Os edifícios irão ser estudados com o vento nos sentidos $x+$ e $y+$ (ver fig.9), pois os edifícios são simétricos e o comportamento do edifício é o mesmo com o vento nas direcções $x+$ e $x-$, e nas direcções $y+$ e $y-$.

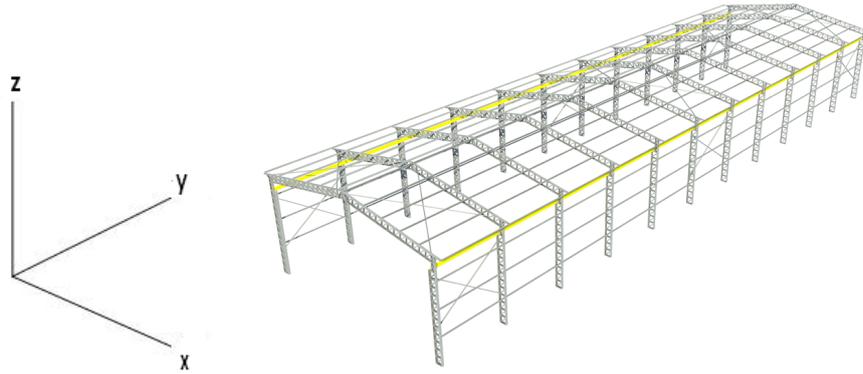


Figura 9: Definição do sistema de eixos dos edifícios em estudo [13]

➤ **Paredes verticais de edifícios de planta rectangular**

Com o vento a actuar no sentido $x+$ (ver fig.10), a acção deste não vai ser a mesma na fachada em que o vento está a incidir e na contrária, por isso tem-se para estas duas fachadas coeficientes de pressão exteriores diferentes.

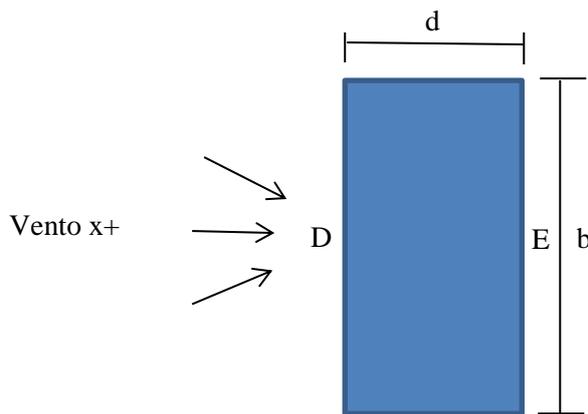


Figura 10: Vento incidindo na direcção $x+$ [12]

Nas fachadas com direcção paralela à do vento o vento também se faz sentir, variando também a influência do vento ao longo da superfície, dependendo da relação entre o e e o d , em que:

- ✓ e é o menor valor entre b e $2h$ (sendo h a altura do edifício);
- ✓ d é o comprimento da superfície (ver fig.11).

Assim, consultando a norma EN 1991-1-4, secção 7.2.2, verifica-se as diferentes divisões da superfície são as que estão representadas na figura 11:

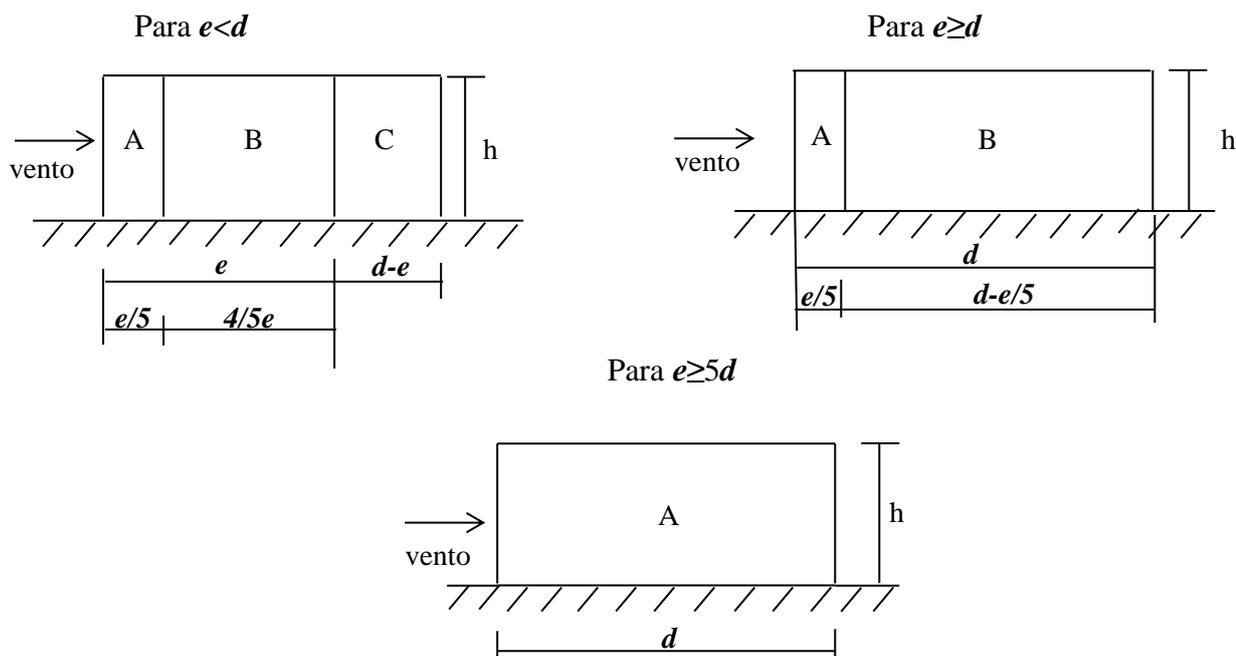


Figura 11: Diferenciação da acção do vento ao longo das superfícies paralelas à direcção do vento [12]

No caso dos edifícios em estudo $e=2h$, pois os valores de b serão todos maiores do que o dobro da maior altura, ou seja todos maiores que 18m.

Recorrendo à norma EN 1991-1-4, quadro 7.1, pode-se verificar os valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular (ver tabela 2):

Tabela 2: Coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [12]

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

➤ Coberturas

O primeiro passo para a determinação do coeficiente de pressão exterior em coberturas é definir qual é o tipo de coberturas que existem e em qual delas se encaixam os edifícios em estudo. No caso em estudo, os edifícios têm uma inclinação das travessas, α , de 5° , tratando-se então de coberturas de 2 vertentes.

O vento não vai actuar da mesma forma em toda a cobertura, ou seja, existem umas partes das coberturas que irão ser mais solicitadas que outras, assim pode-se dividir a cobertura nas seguintes partes (ver figuras 12 e 13):

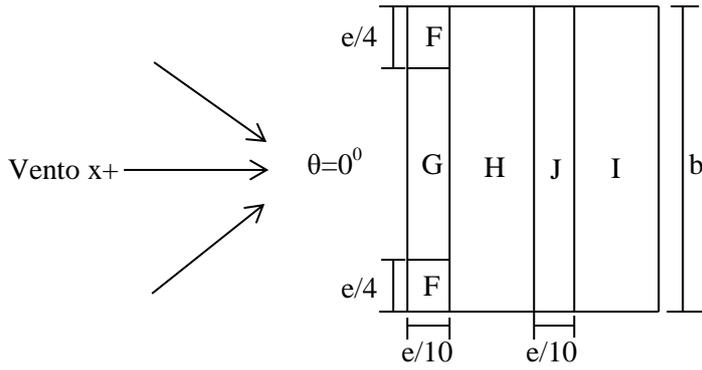


Figura 12:Diferentes coeficientes de pressão exterior ao longo da cobertura do edifício com vento no sentido x+ [12]

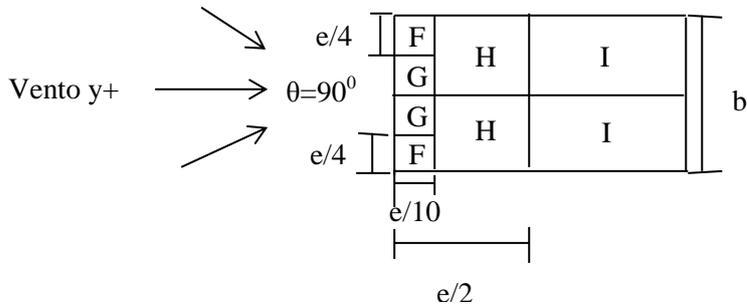


Figura 13:Coeficientes de pressão exterior na cobertura quando o vento actua no sentido y+ [12]

As letras presentes na cobertura das figuras correspondem a um coeficiente de pressão exterior diferente entre estas e estes valores estão presentes nos seguintes quadros (ver tabelas 3 e 4):

Tabela 3: Coeficientes de pressão para coberturas de duas vertentes e vento no sentido x+ [12]

| Ângulo de inclinação α | Zona; Direcção do vento $\theta=0^0$ | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 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 | -0,6 | | -0,6 | | -0,8 | | -0,7 | | -1,0 | -1,5 |
| -30^0 | -1,1 | -2,0 | -0,8 | -1,5 | -0,8 | | -0,6 | | -0,8 | -1,4 |
| -15^0 | -2,5 | -2,8 | -1,3 | -2,0 | -0,9 | -1,2 | -0,5 | | -0,7 | -1,2 |
| -5^0 | -2,3 | -2,5 | -1,2 | -2,0 | -0,8 | -1,2 | 0,2 | | 0,2 | |
| | | | | | | | -0,6 | | -0,6 | |
| 5^0 | -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 | -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 | -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 | | -0,2 | | -0,3 | |
| | 0,7 | | 0,7 | | 0,6 | | 0,0 | | 0,0 | |
| 60^0 | 0,7 | | 0,7 | | 0,7 | | -0,2 | | -0,3 | |
| 75^0 | 0,8 | | 0,8 | | 0,8 | | -0,2 | | -0,3 | |

Tabela 4: Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes e vento no sentido y+ [12]

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

- **Coefficientes de pressão interior**

As pressões interiores e exteriores devem ser consideradas como actuando simultaneamente. Deve ser considerada a combinação mais desfavorável das pressões exteriores e interiores para cada combinação de possíveis aberturas e outras vias de passagem de ar.

O coeficiente de pressão interior, c_{pi} , depende da dimensão e da distribuição das aberturas na envolvente do edifício.

Recorrendo à secção 7.2.9 da norma EN 1991-1-4, verifica-se que o valor do coeficiente de pressão interior que se deve considerar, nos casos em estudo, deverá ser o valor mais gravoso de entre 0,2 e -0,3 [12].

3.3.2.4. Acções da neve

Uma vez que os edifícios em estudo estão apenas destinados a ser implantados a uma cota inferior a 200 m, não foi considerada a acção da neve [14].

4.Determinação da acção do vento nas estruturas

As acções do vento variam em função do tempo e actuam directamente, na forma de pressões, sobre as superfícies exteriores das construções. No caso de construções fechadas, actuam também, indirectamente, sobre as superfícies interiores, devido à porosidade da superfície exterior. As acções do vento poderão também actuar directamente sobre a superfície interior das construções abertas.

4.1.Valores de referência da velocidade do vento

Segundo EN 1991-1-4, o valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos, independentemente da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de 10m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura [12].

Recorrendo ao Anexo Nacional NA da norma EN 1991-1-4, verifica-se que para a determinação do valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, considera-se o País dividido nas duas zonas seguintes [12]:

Zona A- a generalidade do território, excepto 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 5km de largura ou a altitudes superiores a 600m.

Os valores básicos da velocidade de referência do vento serão então os que se encontram na tabela 5.

Tabela 5:Valores básicos da velocidade de referência do vento [12]

| Zona | $v_{b,0}$ [m/s] |
|------|-----------------|
| A | 27 |
| B | 30 |

Nos casos em estudo irão ser projectados edifícios quer para a zona A, quer para a zona B, por isso estes dois valores irão ser utilizados.

O valor de referência da velocidade do vento deve ser calculado através da expressão (ver equação 3) [12]:

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3)$$

em que:

v_b -valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano a uma altura de 10m acima da superfície de um terreno da categoria II;

$v_{b,0}$ -valor básico da velocidade de referência do vento;

c_{dir} -coeficiente de direcção: o valor recomendado é 1,0.

c_{season} -coeficiente de sazão: o valor recomendado é 1,0.

Assim pode-se calcular os valores de referência da velocidade do vento para as zonas A e B.

➤ **Zona A**

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 27 = 27m/s$$

➤ **Zona B**

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 30 = 30m/s$$

4.2.Vento médio

➤ **Variação com a altura**

A velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$, depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, v_b , e é determinada através da expressão (ver equação 4) [12]:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (4)$$

sendo que:

$c_r(z)$ -coeficiente de rugosidade;

$c_0(z)$ -coeficiente de orografia: considerado igual a 1,0 excepto em casos em que, devido à orografia (por exemplo, colinas, falésias, etc.), as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5%, não sendo situações consideradas no nosso estudo.

➤ **Rugosidade do terreno**

O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção, em função da altura do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direcção do vento considerada e pode ser calculado através da seguinte expressão (ver equação 5) [12]:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (5)$$

sendo que:

z_0 -comprimento de rugosidade;

k_r -coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade, e determinado a partir a seguinte expressão (ver equação 6):

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (6)$$

em que:

$z_{0,II} = 0,05m$ (categoria de terreno II);

z_{\min} -altura mínima definida em função da categoria de terreno;

z_{\max} -deve ser considerado igual a 200m.

Os valores de z_0 e z_{\min} dependem da categoria de terreno.

O valor deste coeficiente de terreno depende da categoria do terreno onde a estrutura será construída e segundo o Quadro NA 4.1 da EN-1991-1-4 estas categorias dividem-se em quatro diferentes, tal como demonstra a tabela 6:

Tabela 6: Categorias de terreno e coeficientes de terreno [12]

| Categoria de terreno | z_0 [m] | z_{\min} [m] |
|--|-----------|----------------|
| I -Zona costeira exposta aos ventos de mar | 0,005 | 1 |
| II -Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si, pelo menos, 20 vezes a sua altura | 0,05 | 3 |
| 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: zonas suburbanas, florestas permanentes) | 0,3 | 8 |
| IV -Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m | 1,0 | 15 |

Contudo este estudo só se restringe a estruturas presentes em terrenos de categoria II, logo o valor do coeficiente de terreno será:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19$$

Já o cálculo do coeficiente de rugosidade irá depender não só do coeficiente de terreno como também da altura do edifício. Depois de realizado um estudo considera-se que para os vãos de 10m, 12m e 15m utiliza-se uma platibanda de 1m. Para vãos de 20m, 24m e 25m utiliza-se uma platibanda de 1,5m, e por último, para vãos de 30m e 35m aplica-se uma platibanda de 2m.

Depois de definidas as alturas das platibandas para os diferentes tamanhos de vãos e somando-as com as diferentes alturas de pilar existentes em cada tamanho de vão, obtém-se edifícios com alturas de 6m, 7m, 7,5m, 8m, 8,5m, 9m, 9,5m, 10,5m e 11m.

Depois de definidas as diferentes alturas dos edifícios em estudo, já se pode então calcular os diferentes valores do coeficiente de rugosidade (ver tabela 7).

Tabela 7: Valores dos coeficientes de rugosidade

| Altura do edifício [m] | Valor do coeficiente de rugosidade |
|-------------------------------|--|
| 6 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{6}{0,05}\right) = 0,91$ |
| 7 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{7}{0,05}\right) = 0,94$ |
| 7,5 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{7,5}{0,05}\right) = 0,95$ |
| 8 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,05}\right) = 0,97$ |
| 8,5 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{8,5}{0,05}\right) = 0,98$ |
| 9 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{9}{0,05}\right) = 0,99$ |
| 9,5 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{9,5}{0,05}\right) = 1$ |
| 10,5 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{10,5}{0,05}\right) = 1,02$ |
| 11 | $c_r(z) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{11}{0,05}\right) = 1,02$ |

Depois de calculados os diferentes coeficientes de rugosidade pode-se então calcular os diferentes valores da velocidade média do vento a uma altura z do solo, $v_m(z)$ (ver tabela 8).

Tabela 8: Velocidades médias do vento

| Zona de vento | Altura do edifício [m] | Velocidade média do vento [m/s] |
|---------------|------------------------|---|
| A | 6 | $v_m(z) = 0,91 \cdot 1 \cdot 27 = 24,6$ |
| A | 7 | $v_m(z) = 0,94 \cdot 1 \cdot 27 = 25,4$ |
| A | 7,5 | $v_m(z) = 0,95 \cdot 1 \cdot 27 = 25,7$ |
| A | 8 | $v_m(z) = 0,97 \cdot 1 \cdot 27 = 26,2$ |
| A | 8,5 | $v_m(z) = 0,98 \cdot 1 \cdot 27 = 26,5$ |
| A | 9 | $v_m(z) = 0,99 \cdot 1 \cdot 27 = 26,7$ |
| A | 9,5 | $v_m(z) = 1 \cdot 1 \cdot 27 = 27$ |
| A | 10,5 | $v_m(z) = 1,02 \cdot 1 \cdot 27 = 27,5$ |
| A | 11 | $v_m(z) = 1,02 \cdot 1 \cdot 27 = 27,5$ |
| B | 6 | $v_m(z) = 0,91 \cdot 1 \cdot 30 = 27,3$ |
| B | 7 | $v_m(z) = 0,94 \cdot 1 \cdot 30 = 28,2$ |
| B | 7,5 | $v_m(z) = 0,95 \cdot 1 \cdot 30 = 28,5$ |
| B | 8 | $v_m(z) = 0,97 \cdot 1 \cdot 30 = 29,1$ |
| B | 8,5 | $v_m(z) = 0,98 \cdot 1 \cdot 30 = 29,4$ |
| B | 9 | $v_m(z) = 0,99 \cdot 1 \cdot 30 = 29,7$ |
| B | 9,5 | $v_m(z) = 1 \cdot 1 \cdot 30 = 30$ |
| B | 10,5 | $v_m(z) = 1,02 \cdot 1 \cdot 30 = 30,6$ |
| B | 11 | $v_m(z) = 1,02 \cdot 1 \cdot 30 = 30,6$ |

4.3. Turbulência do vento

A intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$, é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, e é definido pela seguinte expressão (ver equação 7) [12]:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (7)$$

em que:

k_I - coeficiente de turbulência. O valor recomendado é 1,0

c_0 - coeficiente de orografia

z_0 - comprimento de rugosidade

O desvio padrão da turbulência, σ_v , poderá ser determinado através da expressão (ver equação 8) [12]:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_t \quad (8)$$

Sendo que:

k_r -coeficiente de terreno

v_b -valor de referência da velocidade do vento

k_t -coeficiente de turbulência. O valor recomendado é 1,0

Assim vem que os valores dos desvios padrão da turbulência para a zona A e B de vento são:

➤ **Zona A**

$$\sigma_v = 0,19 \cdot 27 \cdot 1 = 5,13m/s$$

➤ **Zona B**

$$\sigma_v = 0,19 \cdot 30 \cdot 1 = 5,7m/s$$

Agora, com o valor do desvio padrão da turbulência calculado, podem ser obtidos os valores das diferentes intensidades de turbulência, para os diferentes desvios padrão da turbulência e para as diferentes velocidades médias do vento, tal como se verifica na tabela 9.

Tabela 9:Valores de intensidade de turbulência

| Zona de vento | Desvio padrão da turbulência | Velocidade média do vento | Intensidade de turbulência |
|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| A | 5,13 | 24,6 | $I_v(z) = \frac{5,13}{24,6} = 0,209$ |
| A | 5,13 | 25,4 | $I_v(z) = \frac{5,13}{25,4} = 0,202$ |
| A | 5,13 | 25,7 | $I_v(z) = \frac{5,13}{25,7} = 0,200$ |
| A | 5,13 | 26,2 | $I_v(z) = \frac{5,13}{26,2} = 0,196$ |
| A | 5,13 | 26,5 | $I_v(z) = \frac{5,13}{26,5} = 0,194$ |
| A | 5,13 | 26,7 | $I_v(z) = \frac{5,13}{26,7} = 0,192$ |
| A | 5,13 | 27 | $I_v(z) = \frac{5,13}{27} = 0,19$ |

| | | | |
|---|------|------|-------------------------------------|
| A | 5,13 | 27,5 | $I_v(z) = \frac{5,13}{27,5} = 0,19$ |
| A | 5,13 | 27,5 | $I_v(z) = \frac{5,13}{27,5} = 0,19$ |
| B | 5,7 | 27,3 | $I_v(z) = \frac{5,7}{27,3} = 0,209$ |
| B | 5,7 | 28,2 | $I_v(z) = \frac{5,7}{28,2} = 0,202$ |
| B | 5,7 | 28,5 | $I_v(z) = \frac{5,7}{28,5} = 0,2$ |
| B | 5,7 | 29,1 | $I_v(z) = \frac{5,7}{29,2} = 0,195$ |
| B | 5,7 | 29,4 | $I_v(z) = \frac{5,7}{29,4} = 0,194$ |
| B | 5,7 | 29,7 | $I_v(z) = \frac{5,7}{29,7} = 0,192$ |
| B | 5,7 | 30 | $I_v(z) = \frac{5,7}{30} = 0,19$ |
| B | 5,7 | 30,6 | $I_v(z) = \frac{5,7}{30,6} = 0,19$ |
| B | 5,7 | 30,6 | $I_v(z) = \frac{5,7}{30,6} = 0,19$ |

4.4.Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico à altura z resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento e é dada pela seguinte expressão (ver equação 9) [12]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (9)$$

em que:

ρ -massa volúmica do ar, a qual depende da altitude da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. O valor recomendado é $1,25 \text{ kg/m}^3$;

$c_e(z)$ -coeficiente de exposição, calculado pela expressão (ver equação 10):

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (10)$$

q_b -pressão dinâmica de referência, calculada pela expressão (ver equação 11):

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (11)$$

Como os valores da velocidade média do vento e da intensidade de turbulência já foram determinados, os valores da pressão dinâmica de pico também poderão ser calculados. Os valores de todas as pressões dinâmicas de pico utilizadas podem ser consultadas no anexo B deste documento.

4.5.Determinação dos coeficientes de pressões e pressões do vento que actuam nos edifícios estudados

As acções do vento em edifícios é uma questão de análise complexa, pois depende das dimensões destes, da direcção do vento, das aberturas existentes nos edifícios, do tipo de cobertura, da categoria do terreno e da sua localização geográfica.

Quanto às dimensões, no nosso estudo, temos 57 estruturas com dimensões diferentes, variando as alturas dos pilares, os vãos, as distâncias entre pórticos e a altura da platibanda.

Os edifícios irão ser estudados com o vento a soprar nos sentidos $x+$ e $y+$. Não têm aberturas consideráveis, logo não possuem uma face predominante, e todos eles têm coberturas de duas vertentes. Todos eles serão estudados para a categoria de terreno II e para as zonas A e B de vento.

4.5.1.Coefficientes de pressão exterior

4.5.1.1.Paredes verticais

- **Com o vento no sentido $x+$**

Actuando neste sentido o vento irá actuar de forma diferenciada nas paredes verticais perpendiculares e paralelas à direcção do vento e na cobertura.

Nas paredes verticais perpendiculares à direcção do vento, existem diferentes acções na fachada onde o vento incide e na contrária, sendo as zonas D e E da figura 14, respectivamente.

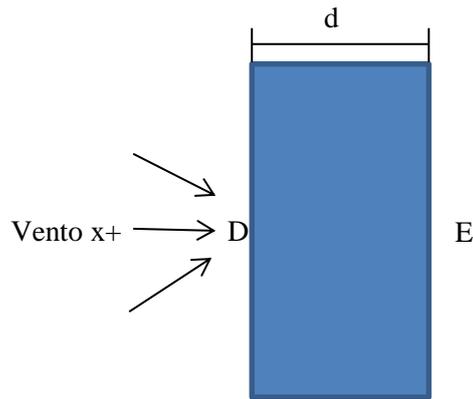


Figura 14: Vista em planta do edifício ilustrando a acção do vento [12]

Porém os valores dos coeficientes de pressão exterior, c_{pe} , para a zona D e E dependem da relação h/d , verificando-se a necessidade de se realizar um estudo destes quocientes para obter os valores dos c_{pe} para as duas zonas distintas.

Neste estudo calcularam-se todos os valores de h/d , para todas as combinações possíveis entre os vãos e as alturas de pilar de todos os edifícios (ver fig.15).

| Vão[m] | h pilar[m] | h/d |
|--------|------------|------|
| 10 | 5 | 0,50 |
| 10 | 6 | 0,60 |
| 10 | 7,5 | 0,75 |
| 12 | 5 | 0,42 |
| 12 | 6 | 0,50 |
| 12 | 7,5 | 0,63 |
| 15 | 5 | 0,33 |
| 15 | 6 | 0,40 |
| 15 | 7,5 | 0,50 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |
| 24 | 6 | 0,25 |
| 24 | 7,5 | 0,31 |
| 24 | 9 | 0,38 |
| 25 | 6 | 0,24 |
| 25 | 7,5 | 0,30 |
| 25 | 9 | 0,36 |
| 30 | 6 | 0,20 |
| 30 | 7,5 | 0,25 |
| 30 | 9 | 0,30 |
| 35 | 6 | 0,17 |

| | | | |
|----|-----|------|---|
| 35 | 7,5 | 0,21 | <div style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> Valor máximo de h/d |
| 35 | 9 | 0,26 | |

Figura 15: Estudo dos valores de h/d nas estruturas em estudo

Através do estudo verifica-se que os valores de h/d variam entre 0,17 e 0,75, existindo apenas 6 situações em que $h/d \leq 0,25$, os restantes situam-se entre $h/d > 0,25$ e $h/d = 1$. Para obter os verdadeiros valores dos c_{pe} teriam que ser feitas interpolações, com os valores da tabela 10, para cada valor de h/d, o que seria um processo muito trabalhoso e que não se justifica, pois os valores dos c_{pe} para $h/d \leq 0,25$ e $h/d = 1$ são muito próximos. Para simplificar o processo foram considerados os valores de c_{pe} mais críticos para a estrutura do edifício, ou seja os valores de $h/d = 1$ (ver tabela 10), ficando assim do lado da segurança.

Tabela 10: Tabela com os valores dos coeficientes de pressão exterior para as zonas D e E em função de h/d [12]

| Zona h/d | D | | E | |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| 5 | 0,8 | 1,0 | -0,7 | |
| 1 | 0,8 | 1,0 | -0,5 | |
| $\leq 0,25$ | 0,7 | 1,0 | -0,3 | |

Assim verifica-se que as paredes verticais perpendiculares à direcção do vento têm um coeficiente de pressão exterior de 0,8 para a parede onde o vento incide e de -0,5 para a parede contrária à anterior (ver fig.16).

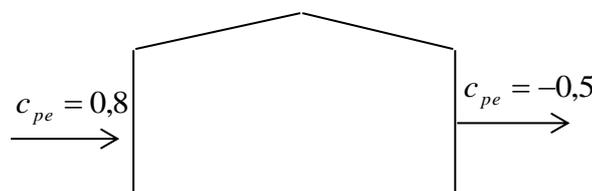


Figura 16: Representação dos coeficientes de pressão exteriores no edifício

Nas paredes verticais paralelas à direcção do vento é possível ter a acção do vento diferenciada nas zonas A, B e C, dependendo do valor do e ($e = 2h$) e do comprimento de vão (d), como foi visto anteriormente.

Para saber quais e quantas zonas diferenciadas da acção do vento irão ter as paredes verticais paralelas à acção do vento será necessário analisar as relações entre o e e o d dos edifícios em estudo.

Desta análise verifica-se que apenas existem seis casos em que $e \geq d$, como se pode verificar na figura 17, nos restantes casos verifica-se que $e < d$.

| h pilar[m] | Vão[m] | e | $d-e$ | Situações em que $e \geq d$ |
|------------|--------|-----|-------|-----------------------------|
| 5 | 10 | 10 | 0 | |
| 6 | 10 | 12 | -2 | |
| 7,5 | 10 | 15 | -5 | |
| 5 | 12 | 10 | 2 | |
| 6 | 12 | 12 | 0 | |
| 7,5 | 12 | 15 | -3 | |
| 5 | 15 | 10 | 5 | |
| 6 | 15 | 12 | 3 | |
| 7,5 | 15 | 15 | 0 | |
| 6 | 20 | 12 | 8 | |
| 7,5 | 20 | 15 | 5 | |
| 9 | 20 | 18 | 2 | |
| 6 | 24 | 12 | 12 | |
| 7,5 | 24 | 15 | 9 | |
| 9 | 24 | 18 | 6 | |
| 6 | 25 | 12 | 13 | |
| 7,5 | 25 | 15 | 10 | |
| 9 | 25 | 18 | 7 | |
| 6 | 30 | 12 | 18 | |
| 7,5 | 30 | 15 | 15 | |
| 9 | 30 | 18 | 12 | |
| 6 | 35 | 12 | 23 | |
| 7,5 | 35 | 15 | 20 | |
| 9 | 35 | 18 | 17 | |

Figura 17: Análise da relação entre e e d nos edifícios

Como já foi visto anteriormente, para as situações em que $e < d$ as paredes dividem-se nas zonas A, B e C, para as situações em que $e \geq d$ as paredes estão apenas divididas nas zonas A e B.

Para se efectuar uma correcta análise teria que ser considerados as zonas A, B e C para os edifícios em que $e < d$ e apenas zonas A e B para os edifícios em que $e \geq d$, contudo para facilitar e uniformizar a análise considera-se que estas paredes estão

diferenciadas apenas nas zonas A e B, pois é a situação mais crítica para a estrutura, pois o coeficiente de pressão exterior na zona B é maior do que na zona C, como se pode verificar na tabela 11.

Tabela 11: Tabela com os coeficientes de pressão exterior para as zonas A, B e C [12]

| Zona | A | | B | | C | |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ |
| 5 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | |
| 1 | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | |
| $\leq 0,25$ | -1,2 | -1,4 | -0,8 | -1,1 | -0,5 | |

Assim para as paredes verticais paralelas à direcção do vento temos os coeficientes de pressão exterior de -1,2 para a zona A e de -0,8 para a zona B (ver fig.18).

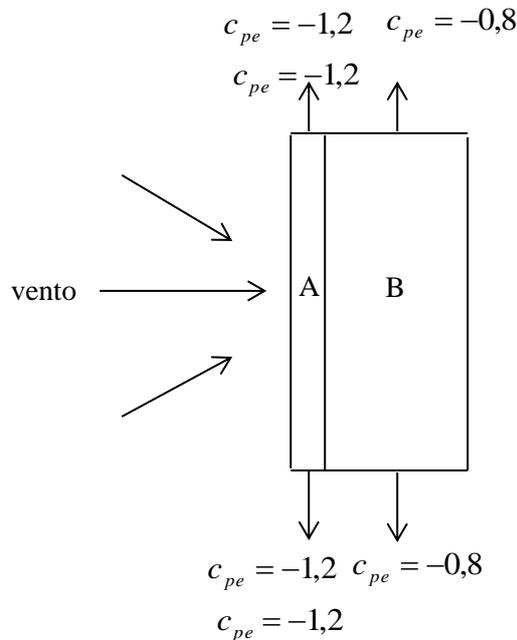


Figura 18: Representação gráfica dos coeficientes de pressão exterior nas paredes paralelas à direcção do vento

- **Com vento no sentido y+**

Com o vento na direcção y+ as paredes verticais que eram paralelas passam a ser perpendiculares à direcção do vento e vice-versa. Com isto os valores do d e do b também trocam e teremos então a seguinte configuração (ver fig.19):

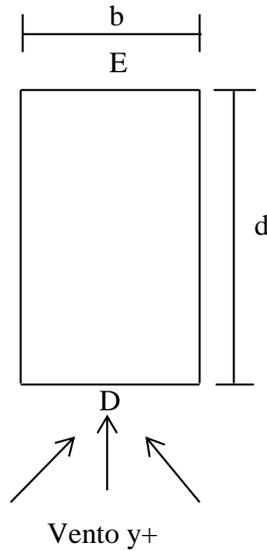


Figura 19: Configuração do edifício para o vento na direção $y+$ [12]

Para as paredes verticais perpendiculares à direção do vento, como já foi visto anteriormente, os coeficientes de pressão exterior das zonas D e E dependem da relação h/d , que neste caso irá variar pois o valor de d foi alterado. Por este motivo surge a necessidade de realizar um novo estudo da relação h/d .

Neste estudo o d corresponde ao comprimento do edifício, sendo que este valor não tem dimensões definidas, porém foi considerado que os edifícios em estudo terão um comprimento mínimo de 20m. Quando se tem o valor mínimo de d , obtém-se o maior valor para h/d , que foi analisado no seguinte estudo (ver fig.20).

| Comprimento[m] | h pilar[m] | h/d |
|----------------|------------|------|
| 20 | 5 | 0,25 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 5 | 0,25 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 5 | 0,25 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |

| | | |
|----|-----|------|
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |
| 20 | 6 | 0,30 |
| 20 | 7,5 | 0,38 |
| 20 | 9 | 0,45 |

| | |
|--|---------------------|
| | Valor máximo de h/d |
|--|---------------------|

Figura 20: Estudo do valor máximo da relação h/d

Através da análise anterior verifica-se que o máximo valor de h/d que temos é 0,45 e o mínimo será menor que 0,25, pois quando se considerar comprimentos maiores que 20m, obtém-se menores valores de h/d , logo menores valores do que os obtidos na tabela anterior.

Assim obtêm-se valores de h/d entre 1 e 0,25 e menores que este valor. Para a definição dos valores dos c_{pe} , quando $0,25 \leq h/d < 1$, teria que ser feita uma interpolação, para $h/d \leq 0,25$ seriam usados os valores presentes no Quadro 7.1 da norma EN 1991-1-4. Porém para simplificar a análise, para efeitos de cálculo, serão considerados os valores de c_{pe} de $h/d=1$ para todos os edifícios, pois são valores mais críticos para a estrutura do que os "reais", não sendo exageradamente grandes (ver fig.21).



Figura 21: Representação dos coeficientes de pressão exteriores no edifício

Nas paredes verticais paralelas à direcção do vento, a acção do vento poderá ser distinta em duas ou três zonas diferentes ou uniforme ao longo da parede. A

determinação destas zonas A, B e C depende da relação entre os valores de e e d , por isso torna-se indispensável o estudo desta relação (ver tabela 12).

Tabela 12: Estudo dos valores de d e e

| h pilar[m] | d [m] | b [m] | $2h$ | e | $d-e$ |
|-----------------|---------|---------|------|-----|-------|
| 5 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 6 | 20 | 10 | 12 | 10 | 10 |
| 7,5 | 20 | 10 | 15 | 10 | 10 |
| 5 | 20 | 12 | 10 | 10 | 10 |
| 6 | 20 | 12 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 12 | 15 | 12 | 8 |
| 5 | 20 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| 6 | 20 | 15 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 15 | 15 | 15 | 5 |
| 6 | 20 | 20 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 20 | 15 | 15 | 5 |
| 9 | 20 | 20 | 18 | 18 | 2 |
| 6 | 20 | 24 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 24 | 15 | 15 | 5 |
| 9 | 20 | 24 | 18 | 18 | 2 |
| 6 | 20 | 25 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 25 | 15 | 15 | 5 |
| 9 | 20 | 25 | 18 | 18 | 2 |
| 6 | 20 | 30 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 30 | 15 | 15 | 5 |
| 9 | 20 | 30 | 18 | 18 | 2 |
| 6 | 20 | 35 | 12 | 12 | 8 |
| 7,5 | 20 | 35 | 15 | 15 | 5 |
| 9 | 20 | 35 | 18 | 18 | 2 |

Através desta análise verifica-se que os valores de d são sempre maiores que e , logo as paredes verticais paralelas à acção do vento poderão estar divididas em três zonas distintas, a zona A, B e C (ver fig.22).

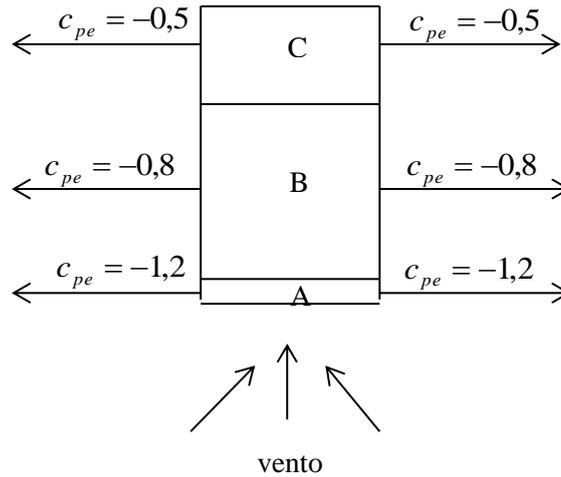


Figura 22:Distinção das três zonas diferentes

Embora em todos edifícios o valor de d seja sempre maior que e , as paredes verticais paralelas à acção do vento apenas serão divididas nas zonas A e B, com vista a sistematizar o estudo e torná-lo mais rápido, ficando sempre do lado da segurança, pois o valor do coeficiente de pressão exterior na zona B é superior ao da zona C.

4.5.1.2.Coberturas

Como já foi referido anteriormente, os edifícios em estudo têm uma inclinação das travessas, α , de 5° , que corresponde a uma cobertura de duas vertentes.

- **Com vento no sentido x+**

Como já foi verificado anteriormente, com o vento na direcção x+, a acção deste na cobertura distingue-se nas cinco zonas distintas F, G, H, I e J, de acordo com a seguinte configuração (ver fig.23):

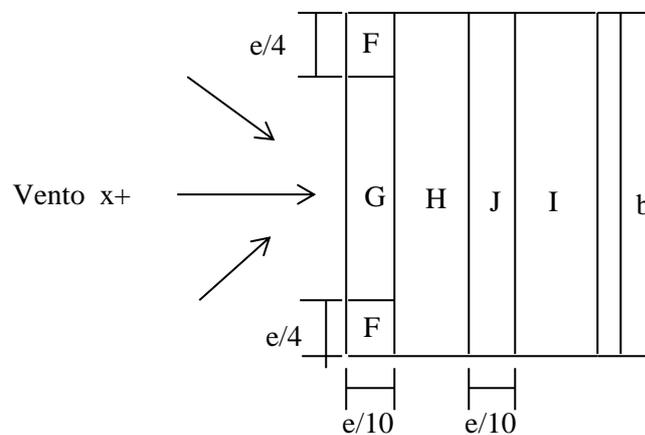


Figura 23:Zonas diferenciadas da acção do vento na cobertura [12]

Os valores dos coeficientes de pressão exteriores para coberturas de duas vertentes apenas dependem da direcção do vento e da inclinação da cobertura, e como ambos os parâmetros estão definidos, segundo o Quadro 7.4a da EN 1991-1-4, verifica-se os seguintes c_{pe} (ver tabela 13):

Tabela 13: Valores dos coeficientes de pressão exterior adoptados para a cobertura [12]

| Ângulo de inclinação α | Zona; Direcção do vento $\theta=0^0$ | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 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 | -0,6 | | -0,6 | | -0,8 | | -0,7 | | -1,0 | -1,5 |
| -30^0 | -1,1 | -2,0 | -0,8 | -1,5 | -0,8 | | -0,6 | | -0,8 | -1,4 |
| -15^0 | -2,5 | -2,8 | -1,3 | -2,0 | -0,9 | -1,2 | -0,5 | | -0,7 | -1,2 |
| -5^0 | -2,3 | -2,5 | -1,2 | -2,0 | -0,8 | -1,2 | 0,2 | | 0,2 | |
| | | | | | | | -0,6 | | -0,6 | |
| 5^0 | -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 | -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 | -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 | | -0,2 | | -0,3 | |
| | 0,7 | | 0,7 | | 0,6 | | 0,0 | | 0,0 | |
| 60^0 | 0,7 | | 0,7 | | 0,7 | | -0,2 | | -0,3 | |

Os coeficientes de pressão exterior adoptados serão os mais críticos para a estrutura, isto é, para a zona F=-1,7, para a zona G=-1,2, para a zona H=-0,6, para a zona I=-0,6 e para a zona J=-0,6. Quando se estuda a acção do vento num pórtico, considera-se um pórtico característico, ou seja, um pórtico que não seja das extremidades, pois estes estão sujeitos a esforços característicos destas zonas. Assim, representando estes valores num pórtico característico, temos a seguinte configuração (ver fig.24):

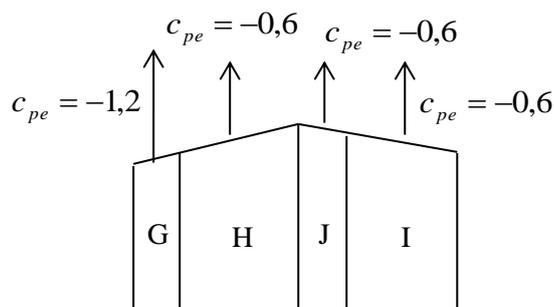


Figura 24: Representação dos coeficientes de pressão exterior num pórtico característico do edifício

Para um pórtico situado nas extremidades dos edifícios, dividido nas zonas F, H, J e I, vem a seguinte configuração (ver fig.25):

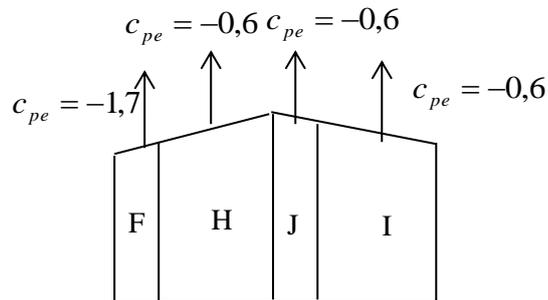


Figura 25: Representação dos coeficientes de pressão exterior num pórtico das extremidades do edifício

- **Com vento no sentido y+**

Com o vento na direcção y+, a acção do vento na cobertura vai ser diferente da que foi verificada para o vento na direcção x+, neste caso a cobertura divide-se na seguinte configuração (ver fig.26):

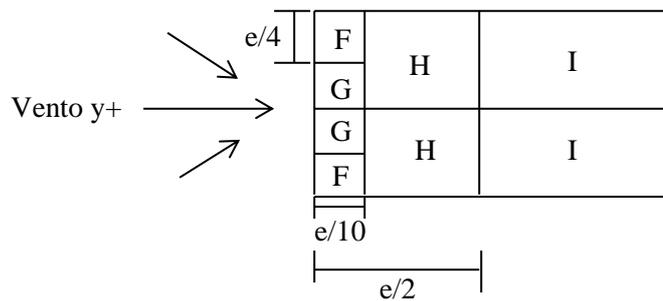


Figura 26: Zonas diferenciadas da acção do vento na cobertura [12]

Segundo o Quadro 7.4b da EN 1991-1-4, os valores dos coeficientes de pressão exterior nas zonas F, G, H e I para uma inclinação de 5^0 são (ver tabela 14):

Tabela 14: Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes na direcção y+ [12]

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

Representando agora os coeficientes de pressão exterior ao longo do comprimento do edifício, na secção que passa pelo centro dos pórticos, ou seja, dividido nas zonas G,H e I, tem-se a seguinte configuração (ver fig.27):

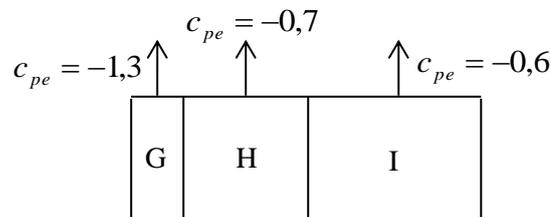


Figura 27: Representação dos coeficientes de pressão exterior na secção que passa pelo centro dos pórticos

Para uma secção que passa nas extremidades dos pórticos, dividida ao longo do seu comprimento nas zonas F, H e I, temos a seguinte configuração (ver fig.28):

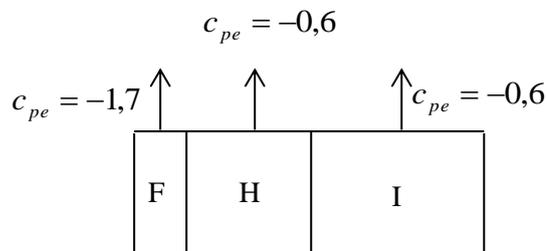


Figura 28: Representação dos coeficientes de pressão exterior numa secção que passa pelas extremidades dos pórticos

4.5.2. Coeficientes de pressão interior

Como já foi visto anteriormente, os valores do coeficiente de pressão interior deverá ser considerado o valor mais gravoso de entre 0,2 e -0,3. Devido ao facto das estruturas em estudo terem como acção mais condicionante a do vento, o coeficiente de pressão interior a considerar será de -0,3, pois agrava a acção do vento na parede onde este está a incidir, ou seja, na zona mais solicitada pelo vento (ver fig.29).

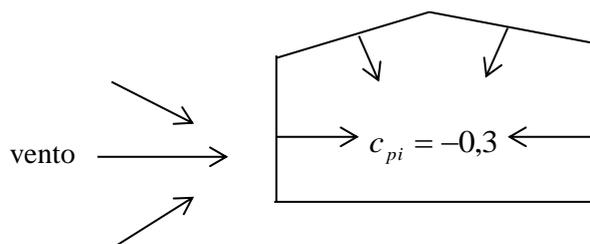


Figura 29: Representação gráfica dos coeficientes de pressão interior num pórtico

4.5.3. Determinação das pressões de vento actuantes nos edifícios

Segundo a secção 5.2 da norma NP EN 1991-1-4, as pressões exercidas pelo vento em superfícies são determinadas através do produto entre as pressões dinâmicas de pico e os coeficientes de pressão referentes às diversas zonas dos edifícios [12].

4.5.3.1. Pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores

A pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores, w_e , deverá ser obtida através da seguinte expressão (ver equação 12) [12]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (12)$$

em que:

$q_p(z_e)$ - pressão dinâmica de pico;

z_e - altura de referência para a pressão exterior;

c_{pe} - coeficiente de pressão para a pressão exterior

4.5.3.2. Pressão exercida pelo vento em superfícies interiores

A pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores de uma construção, w_i , deverá ser obtida através da seguinte expressão (ver equação 13) [12]:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (13)$$

em que:

$q_p(z_i)$ - Pressão dinâmica de pico;

z_i - altura de referência para a pressão interior;

c_{pi} - coeficiente de pressão para a pressão interior

Todas as pressões exercidas pelo vento nas superfícies em estudo podem ser consultadas no anexo C.

5.Cálculo Estrutural dos edifícios

A análise estrutural dos edifícios foi realizada recorrendo ao software Autodesk Robot Structural Analysis. Através desta ferramenta informática é possível determinar as características dos elementos estruturais dos edifícios, bem como analisar as principais ligações da estrutura.

Até à realização do estudo estrutural dos edifícios é necessário passar por várias etapas, nomeadamente o desenho da estrutura, a atribuição de características aos elementos estruturais e a introdução das cargas que actuam na mesma.

5.1.Desenho da estrutura

5.1.1.Nós

Quando é iniciada a modelação de uma estrutura, em primeiro instante são definidos os nós da mesma, nem que seja os nós de um primeiro pórtico que posteriormente será copiado. Para a definição dos nós selecciona-se a opção “Modelo de estrutura”, e dentro desta o comando “Nós”, onde são colocadas as coordenadas dos nós da estrutura (ver fig.30).

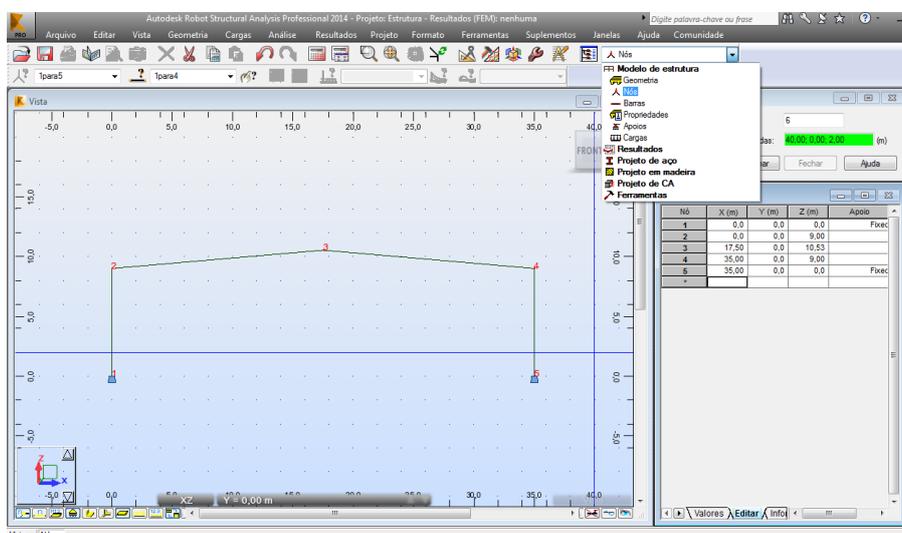


Figura 30:Definição dos nós da estrutura

5.1.2.Barras

Posteriormente à definição dos nós, serão definidas as barras da estrutura, que terão como ponto de partida um nó e como ponto de chegada um outro nó que não o primeiro.

Para definir as barras da estrutura mantém-se a opção “Modelo de estrutura”, e dentro deste selecciona-se o comando “Barras”, onde são definidas as barras da estrutura (ver fig.31).

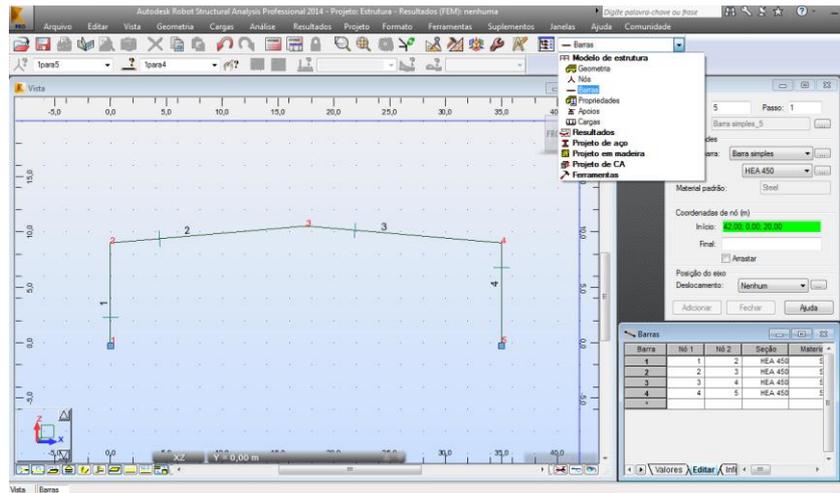


Figura 31: Definição das barras da estrutura

Dentro desta opção poderão ser definidos o nó de início e fim da barra, a sua secção, o material que a constitui e o tipo de elemento estrutural que a barra constitui, como se pode verificar na figura 32.

| Barra | Nó 1 | Nó 2 | Seção | Material | Gama (Deg) | Tipo |
|-------|------|------|---------|----------|------------|---------------|
| 1 | 1 | 2 | HEA 450 | Steel | 0,0 | Barra simples |
| 2 | 2 | 3 | HEA 450 | Steel | 0,0 | Barra simples |
| 3 | 3 | 4 | HEA 450 | Steel | 0,0 | Barra simples |
| 4 | 4 | 5 | HEA 450 | Steel | 0,0 | Barra simples |
| * | | | | | | |

Figura 32: Quadro de definição das características das barras

5.1.3. Apoios da estrutura

Depois de definidos os nós e barras dos modelos, terá que ser determinada a tipologia dos apoios da estrutura. Estes poderão ser do tipo encastrados, designado por “Fixed” ou do tipo simplesmente apoiado, designados por “Pinned”. No caso dos edifícios em estudo todos os pilares são encastrados e todas as empenas são simplesmente apoiadas. Esta definição será efectuada recorrendo ao comando “Apoios”, ainda dentro da opção “Modelo de estrutura” (Ver fig.33).

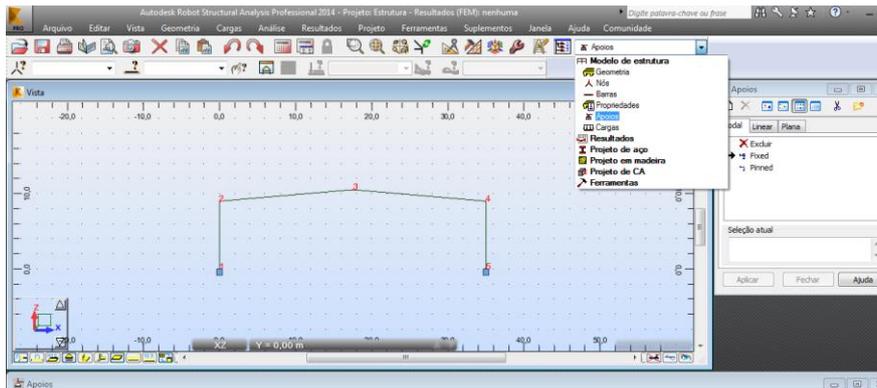


Figura 33: Definição dos apoios da estrutura

5.2. Atribuição das características dos elementos estruturais

Para a determinação das características das barras, selecciona-se a opção evidenciada na figura 34, no menu do lado direito do ecrã. Aqui pode-se determinar os comprimentos de encurvadura em relação aos eixos x e y, os coeficientes dos comprimentos de encurvadura, bem como as curvas de encurvadura que serão utilizadas.

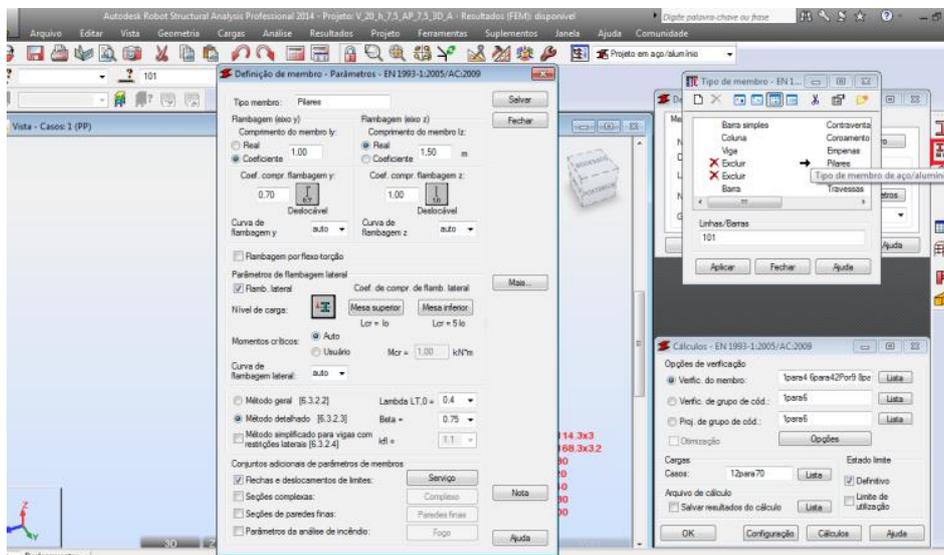


Figura 34: Demonstração do ícone que permite criar e caracterizar novos elementos estruturais

No caso dos edifícios em estudo, os pilares irão ter um comprimento de encurvadura, em relação ao eixo y, igual ao seu comprimento, o seu coeficiente de comprimento de encurvadura será de 0,7, pois está encastrada numa das extremidades, zona 1 da figura 35. Em relação ao eixo z, o seu comprimento de encurvadura será 1,5m, pois os pilares

terão madres espaçadas 1,5m entre si, com um coeficiente de comprimento de encurvadura de 1, zona 2 da figura 35. A zona 3, presente na figura 35, diz respeito aos parâmetros da encurvadura lateral, onde se verifica, para as estruturas em estudo, que os pilares têm um comprimento de encurvadura do banzo superior igual ao menor dos comprimentos de encurvadura definidos nas zonas 1 e 2 e um comprimento de encurvadura do banzo inferior que será variável, conforme os travamentos da estrutura, assunto que será abordado posteriormente na secção 5.4.3.1 deste documento. As curvas de encurvadura serão atribuídas pelo software, já que este aplica as regras presentes na norma EN 1991-1-1 (ver fig.35).

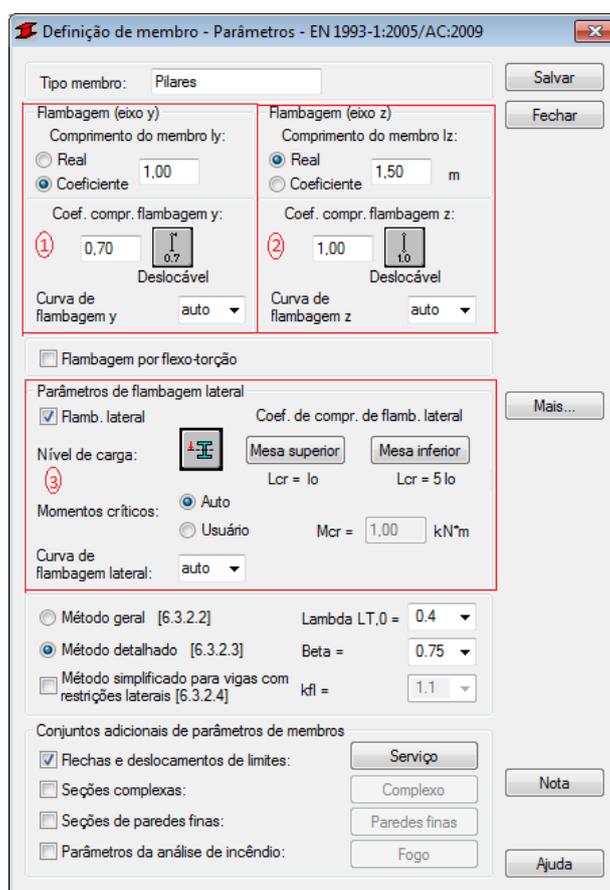


Figura 35:Características atribuídas aos pilares

As travessas irão ter um comprimento de encurvadura, em relação ao eixo y, igual ao dobro do seu comprimento, pois no modelo tem-se duas travessas consecutivas, ligadas entre si, sendo o seu coeficiente de comprimento de encurvadura de 1, pois considera-se que estas estão simplesmente apoiadas nas duas extremidades. Em relação ao eixo z, o seu comprimento de encurvadura será 1,75m, pois as travessas terão madres espaçadas 1,75m entre si, com um coeficiente de comprimento de encurvadura de 1. Quanto aos parâmetros da encurvadura lateral, as travessas, tal como os pilares, têm um

comprimento de encurvadura do banzo superior igual ao menor dos comprimentos de encurvadura definidos nas zonas 1 e 2 e um comprimento de encurvadura do banzo inferior que será variável, conforme os travamentos da estrutura. As curvas de encurvadura serão igualmente atribuídas pelo software (ver fig.36).

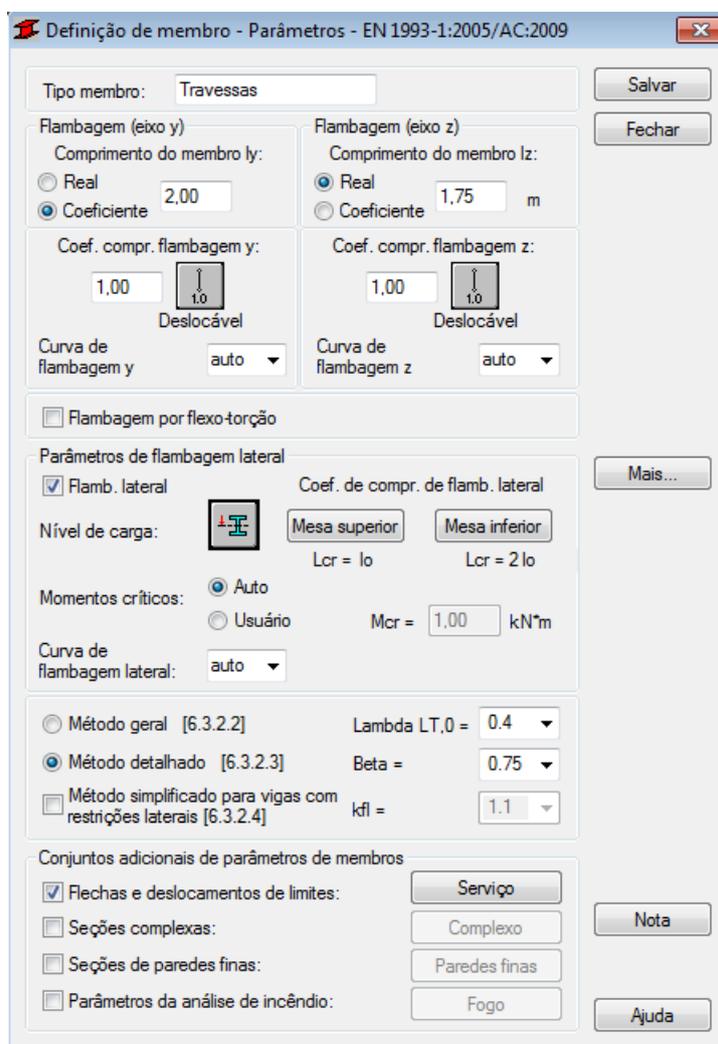


Figura 36:Características atribuídas às travessas

As empenas irão ter um comprimento de encurvadura, em relação ao eixo y, igual ao seu comprimento, com um coeficiente de comprimento de encurvadura de 1, pois estas estão simplesmente apoiadas nas duas extremidades. Em relação ao eixo z, o seu comprimento de encurvadura será 1,5m, porque, tal como os pilares, as empenas terão madres espaçadas 1,5m entre si, com um coeficiente de comprimento de encurvadura de 1. Os parâmetros da encurvadura lateral das empenas foram definidos com comprimentos de encurvadura dos banzos superior e inferior igual ao menor dos comprimentos de encurvadura definidos nas zonas 1 e 2, pois estes elementos

estruturais não sofrerão nenhuma alteração nos seus travamentos durante o estudo. As curvas de encurvadura serão atribuídas pelo software (ver fig.37).

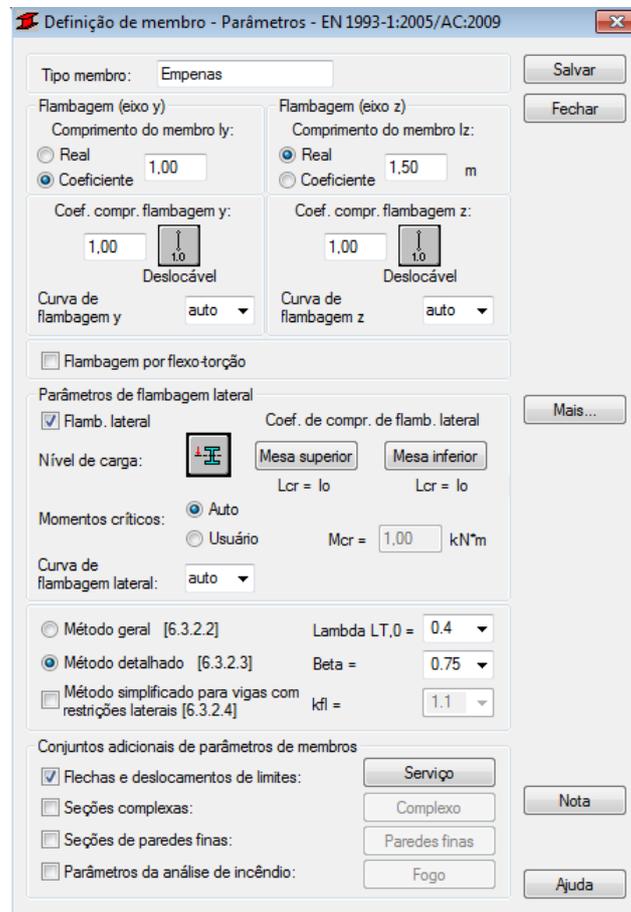


Figura 37:Características atribuídas às empenas

Quanto aos contraventamentos, os seus comprimentos de encurvadura em relação aos dois eixos serão iguais ao seu comprimento e os coeficientes de comprimento de encurvadura serão 1, pois esta é uma barra simplesmente apoiada nas duas extremidades. Os parâmetros da encurvadura lateral nestes elementos, tal como nas empenas, foram definidos com comprimentos de encurvadura dos banzos superior e inferior igual ao menor dos comprimentos de encurvadura definidos nas zonas 1 e 2, pois estes elementos estruturais não sofrerão nenhuma alteração nos seus travamentos durante o estudo. As curvas de encurvadura serão atribuídas pelo software (ver fig.38).

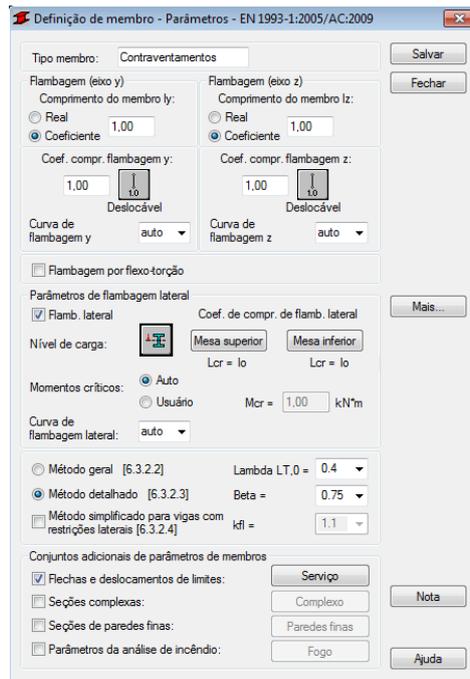


Figura 38:Características atribuídas aos contraventamentos

Tal como os contraventamentos, os coroamentos têm comprimentos de encurvadura em relação aos dois eixos iguais ao seu comprimento, os coeficientes de comprimento de encurvadura serão 1, com travamentos laterais com a mesma características e com curvas de encurvadura atribuídas pelo software (ver fig.39).

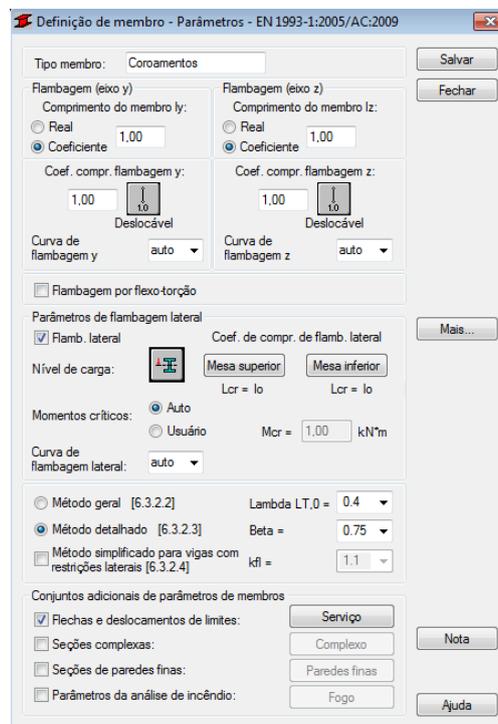


Figura 39:Características atribuídas aos coroamentos

Os pilaretes têm um comprimento de encurvadura, em relação aos eixos y e z, igual ao seu comprimento. Em relação ao eixo y, estes terão um coeficiente de comprimento de encurvadura igual a 2, porque considera-se a ligação entre os pilares/empenas e os pilaretes como encastrada e a extremidade oposta livre, ou seja, o pilarete é considerada uma barra em consola. Em relação ao eixo z o coeficiente de comprimento de encurvadura será igual a 1. Os parâmetros de encurvadura lateral serão os mesmos das empenas, coroamentos e contraventamentos e as curvas de encurvadura serão igualmente atribuídas pelo software (ver fig.40).

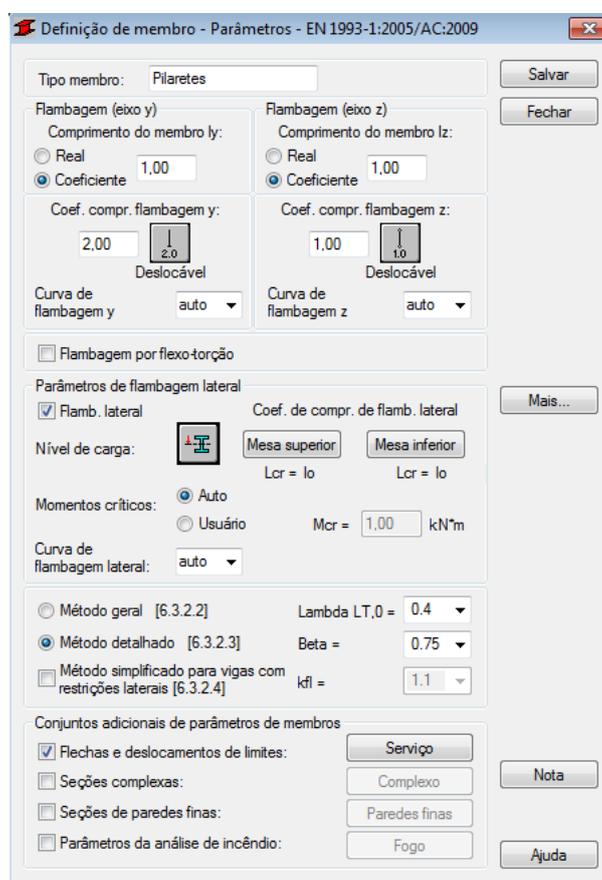


Figura 40:Características atribuídas aos pilaretes

5.3. Introdução das cargas que actuam nas estruturas

Para a realização do cálculo de estruturas de edifícios, é necessário definir as cargas que actuam nos edifícios. A definição e quantificação das cargas são efectuadas no comando “cargas”, do menu “modelo de estrutura”, como se pode verificar na figura 41. Como primeiro passo tem que se definir os tipos de acções a que a estrutura estará sujeita, nomeadamente se são cargas permanentes, sobrecargas, devido à neve, devido

ao vento, devido à temperatura, accidental ou devido à actividade sísmica. Numa segunda etapa é realizada a combinação de todas as acções presentes no edifício. Por último, é efectuada a quantificação e localização de todas as acções presentes na estrutura.

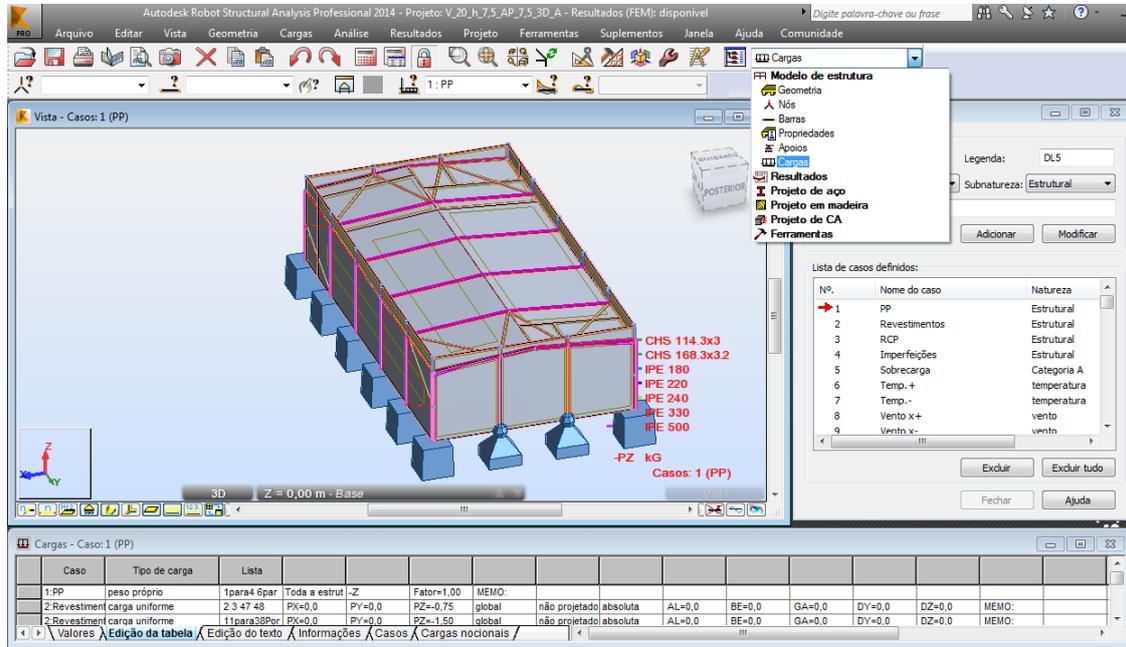


Figura 41: Comando "cargas" do menu "Modelo de estrutura"

5.3.1. Definição das cargas presentes nos edifícios em estudo

Para o estudo dos modelos foram definidas 11 cargas diferentes (ver fig.42), nomeadamente:

✓ Acções permanentes

1. **Peso próprio**- Diz respeito ao peso próprio da estrutura;
2. **Revestimentos**- Corresponde ao peso dos revestimentos dos edifícios;
3. **Restantes cargas permanentes**- Carga adicional prevista a que a estrutura terá de resistir;
4. **Imperfeições**- Carga adicional que previne as imperfeições geométricas da estrutura;

✓ Acções Variáveis

5.Sobrecarga- Acção variável aplicada na cobertura;

6.Temp.+- Acção resultante da variação de temperatura, nomeadamente a dilatação do material;

7.Temp.- - Acção resultante da variação de temperatura, nomeadamente a contracção do material;

8.Vento x+- Acção do vento na direcção x+;

9.Vento x- -Acção do vento na direcção x-;

10.Vento y+-Acção do vento na direcção y+;

11.Vento y- - Acção do vento na direcção y-.

| Nº. | Nome do caso | Natureza |
|-----|---------------|-------------|
| 1 | PP | Estrutural |
| 2 | Revestimentos | Estrutural |
| 3 | RCP | Estrutural |
| 4 | Imperfeições | Estrutural |
| 5 | Sobrecarga | Categoria A |
| 6 | Temp. + | temperatura |
| 7 | Temp. - | temperatura |
| 8 | Vento x+ | vento |
| 9 | Vento x- | vento |

Figura 42:Quadro de definição das acções que actuarão na estrutura

5.3.2.Combinações de acções

As combinações de acções tem por objectivo combinar as acções relativas aos diferentes casos de carga, no entanto as acções que, por exemplo, por razões físicas, não podem ocorrer simultaneamente, não deverão ser consideradas na mesma combinação.

As combinações de acções foram definidas de acordo com a norma NP EN 1990. Segundo o Quadro A1.1 da norma anteriormente referida, os valores recomendados dos coeficientes ψ são os que estão presentes na tabela 15:

Tabela 15: Valores recomendados dos coeficientes ψ [9]

| Caso | Nome do caso | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|------|----------------------|----------|----------|----------|
| 1 | PP Estrutura | - | - | - |
| 2 | Revestimentos | - | - | - |
| 3 | RCP | - | - | - |
| 4 | Imperfeições | - | - | - |
| 5 | Sobrecargas | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | Temperatura + | 0,60 | 0,50 | 0,00 |
| 7 | Temperatura - | 0,60 | 0,50 | 0,00 |
| 8 | Vento X+ | 0,60 | 0,20 | 0,00 |
| 9 | Vento X- | 0,60 | 0,20 | 0,00 |
| 10 | Vento y+ | 0,60 | 0,20 | 0,00 |
| 11 | Vento y- | 0,60 | 0,20 | 0,00 |

➤ Estados Limites últimos

Para as verificações de segurança dos estados limites últimos, segundo a secção 6.4.3.2 da norma NP EN 1990, tem-se as seguintes combinações fundamentais (ver equação 14) [9]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (14)$$

Onde:

$\gamma_{G,j}$ -coeficiente parcial relativo à acção permanente j (ver tabela 16);

$G_{k,j}$ -valor característico da acção permanente j;

$\gamma_{Q,1}$ -coeficiente parcial relativo à acção variável base da combinação 1 (ver tabela 16);

$Q_{k,1}$ -valor característico da acção variável de base da combinação 1;

$\gamma_{Q,i}$ -coeficiente parcial relativo à acção variável i (ver tabela 16);

$Q_{k,i}$ -valor característico da acção variável acompanhante i.

Tabela 16: Tabela com os valores dos coeficientes γ para os estados limites últimos

| Caso | Acções Permanentes $\gamma_{G,j}$ | | Acção variável base $\gamma_{Q,1}$ | Acções Variáveis $\gamma_{Q,i}$ |
|------|-----------------------------------|------------|------------------------------------|---------------------------------|
| | Desfavoráveis | Favoráveis | | |
| B | 1,35 | 1,00 | 1,50 | 1,50 |

Encontram-se no anexo D as combinações fundamentais definidas para as verificações de segurança em estados limites últimos.

➤ Estados Limites de Serviço

Para as verificações de segurança dos estados limites de serviço, segundo a secção 6.5.3 da norma NP EN 1990, tem-se as seguintes combinações características (ver equação 15) [9]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (15)$$

Onde:

$G_{k,j}$ -valor característico da acção permanente j;

$Q_{k,1}$ -valor característico da acção variável de base da combinação 1;

$Q_{k,i}$ -valor característico da acção variável acompanhante i.

Para as verificações de segurança dos estados limites de serviço, mas agora para as combinações frequentes (ver equação 16) [9]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (16)$$

Onde:

$G_{k,j}$ -valor característico da acção permanente j;

$Q_{k,1}$ -valor característico da acção variável de base da combinação 1;

$Q_{k,i}$ -valor característico da acção variável acompanhante i.

Encontram-se no anexo D as combinações características e frequentes definidas para as verificações de segurança em estados limites de serviço.

5.3.3.Introdução das combinações de acções no software

No caso deste estudo, as combinações de acções foram realizadas manualmente num ficheiro em Microsoft Excel, posteriormente copiado para o Autodesk Robot Structural Analysis. As combinações de acções são introduzidas no software através do comando “Tabela de combinações” do menu “Cargas”, como demonstra a figura 43.

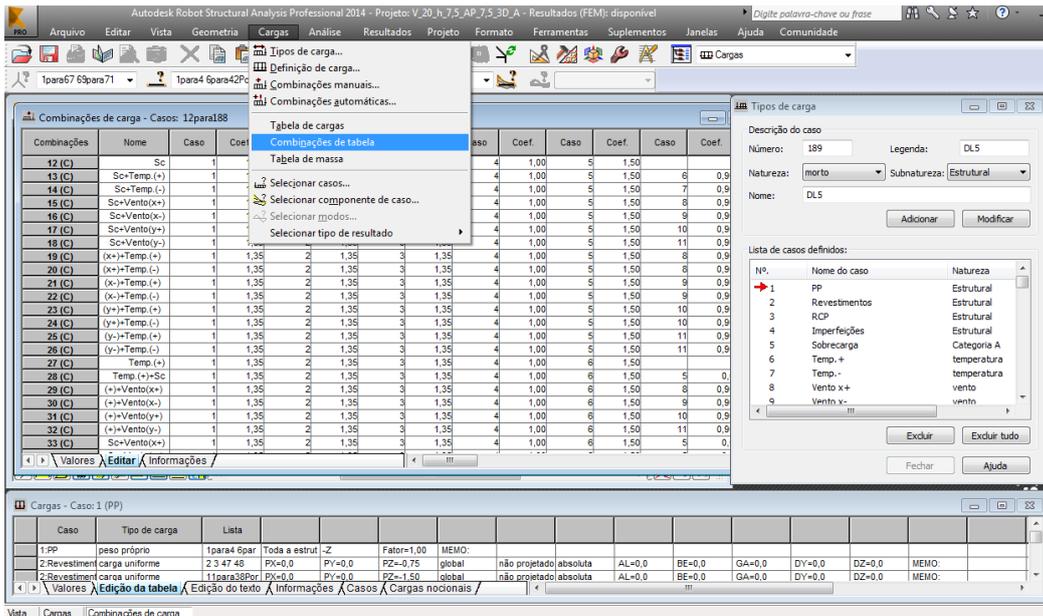


Figura 43: Comando "Tabela de combinações" do menu "Cargas"

Para o estudo dos edifícios foram realizadas as combinações dos estados limites últimos e dos estados limite de serviço, estes últimos com combinações características e combinações frequentes.

Estas combinações serão todas copiadas dos seus ficheiros em Microsoft Excel para a tabela evidenciada na figura 44.

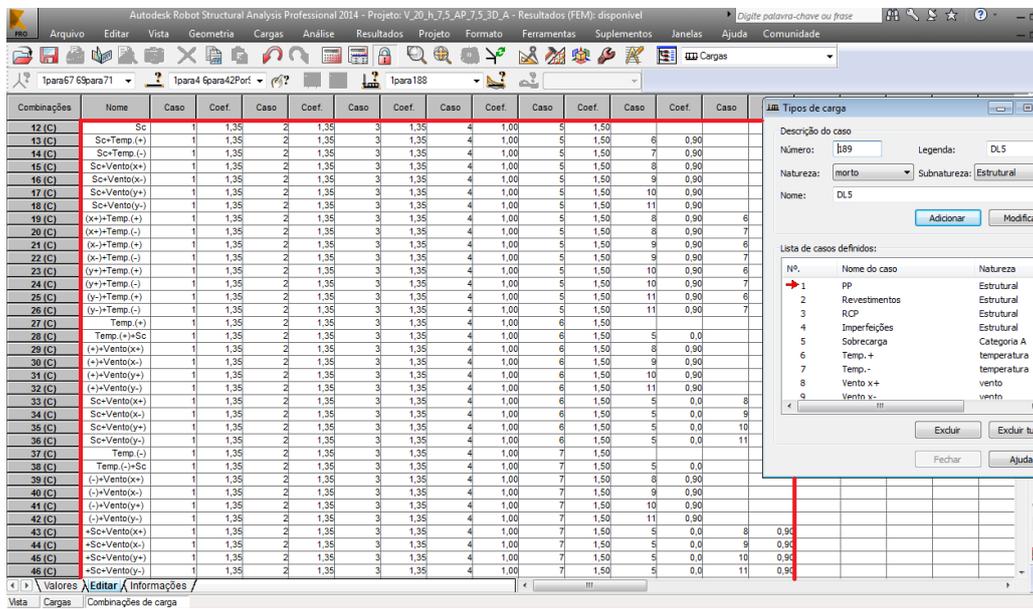


Figura 44: Quadro onde são introduzidas todas as combinações de acções

5.3.4. Quantificação e localização de todas as acções presentes na estrutura

Esta última etapa consiste na aplicação das forças na estrutura, através do quadro da figura 45. As acções que foram aplicadas na estrutura foram o peso próprio da estrutura, o peso dos revestimentos, as restantes cargas permanentes, as imperfeições, a sobrecarga, as acções da temperatura e as acções do vento.

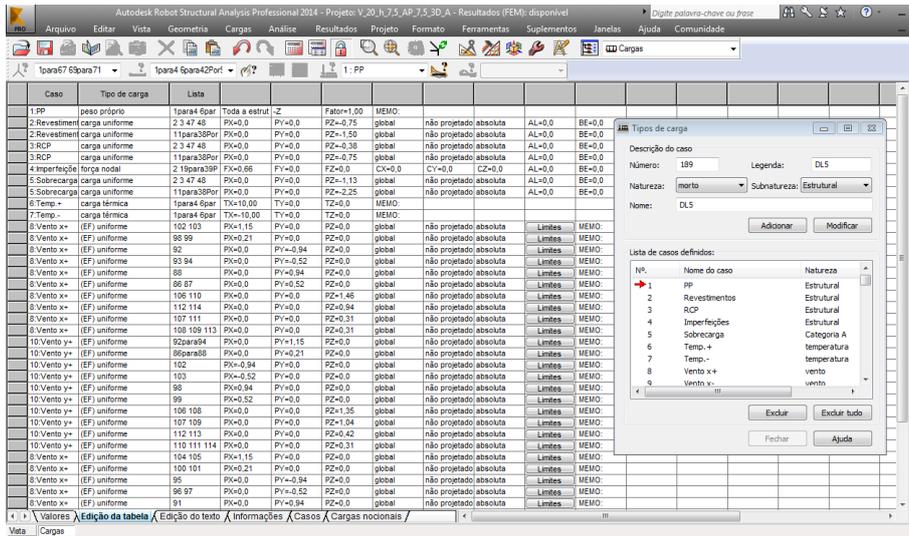


Figura 45:Quadro de aplicação das cargas

- **Peso próprio-** O peso próprio da estrutura é aplicado em toda a estrutura, como se pode ver através da zona a vermelho da figura 46, e a sua quantificação é efectuada automaticamente pelo software.

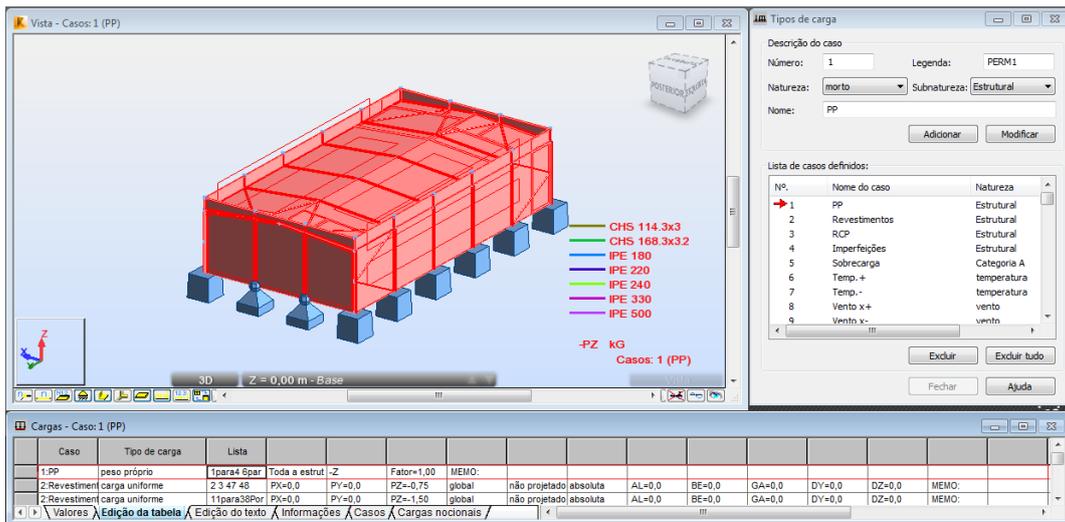


Figura 46:Representação da aplicação do peso próprio da estrutura

- **Revestimentos-** O peso dos revestimentos é aplicado na cobertura, sendo neste caso aplicado directamente nas travessas. O valor do seu peso é de 20kg/m^2 , mas para aplicar directamente nas travessas este valor terá de ser multiplicado pelo comprimento de influência da travessa. Sendo assim o valor varia com o afastamento entre pórticos dos edifícios. Neste caso o valor aplicado também difere das travessas exteriores para as interiores, pois o comprimento de influência das travessas exteriores é metade do comprimento de influência das travessas interiores. Por este motivo é que existem duas acções do peso dos revestimentos no quadro da figura 47, uma para aplicar nos pórticos interiores e outra para aplicar nos pórticos exteriores.

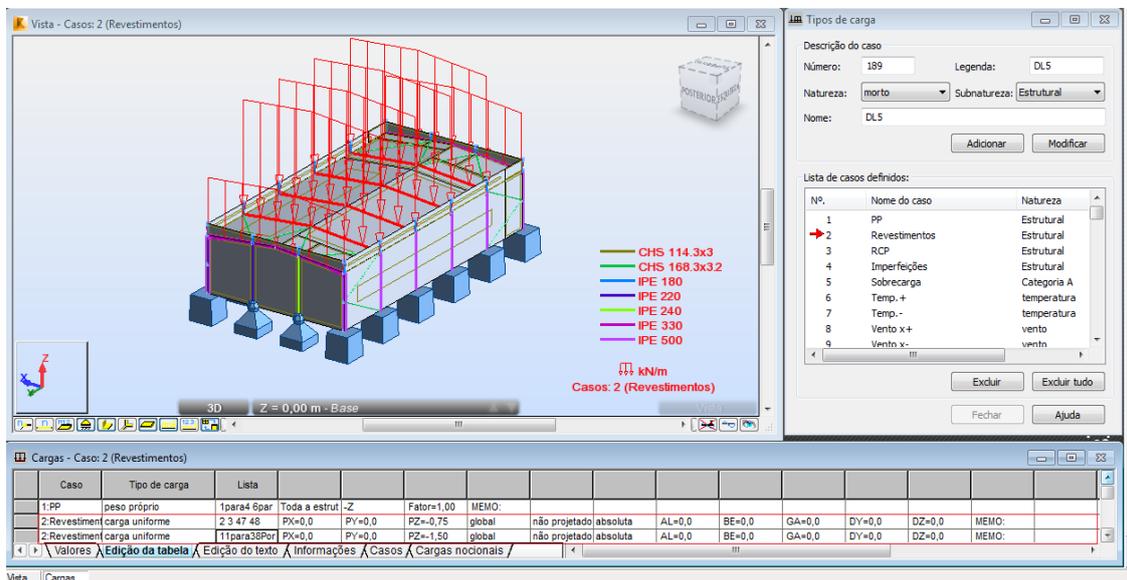


Figura 47: Representação da aplicação do peso dos revestimentos

Os valores dos pesos de revestimento aplicados nas travessas dos edifícios em estudo foram os que se encontram na tabela 17.

Tabela 17: Valores dos pesos dos revestimentos aplicados nos modelos em estudo

| | Afast. Pórticos - 5m | Afast. Pórticos - 6m | Afast. Pórticos - 7,5m |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Pórticos exteriores | 0,5 kN/m | 0,6 kN/m | 0,75 kN/m |
| Pórticos interiores | 1 kN/m | 1,2 kN/m | 1,5 kN/m |

- **Restantes cargas permanentes-** Tal como os revestimentos, as restantes cargas permanentes estão aplicadas directamente nas travessas. O valor do seu peso é

de 10kg/m^2 , mas para aplicar directamente nas travessas, este valor terá de ser multiplicado pelo comprimento de influência da travessa, tal como sucedeu nos revestimentos. Sendo assim o seu valor também varia com o afastamento entre pórticos dos edifícios, e é diferente para as travessas exteriores e interiores, pois o comprimento de influência das travessas exteriores é metade do comprimento de influência das travessas interiores. Sendo assim, no quadro das acções existem duas linhas para as restantes cargas permanentes (ver fig.48).

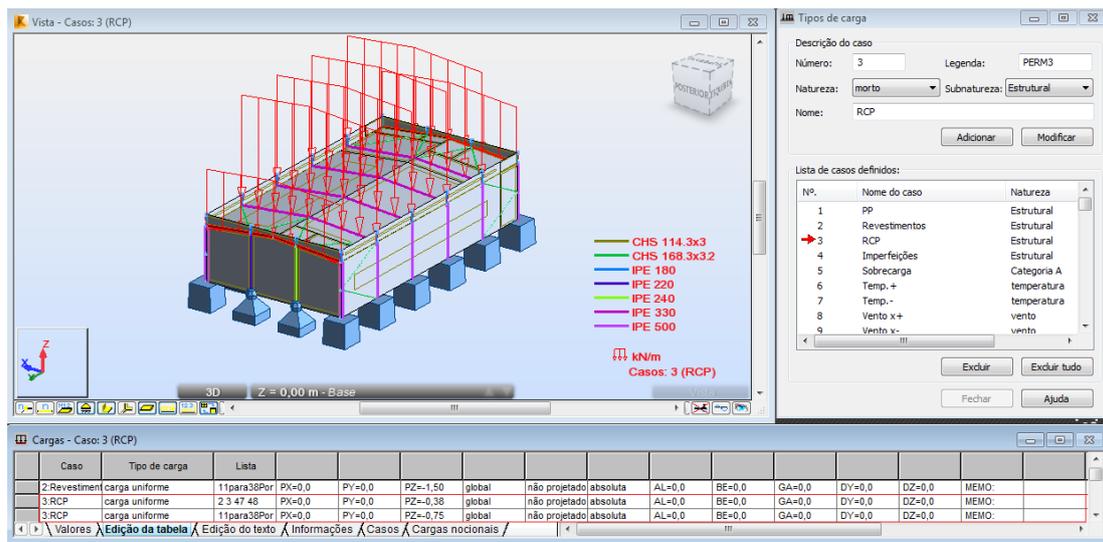


Figura 48: Representação da aplicação das restantes cargas permanentes na estrutura

Os valores das restantes cargas permanentes aplicados nas travessas dos edifícios em estudo foram os seguintes (ver tabela 18).

Tabela 18: Valores das restantes cargas permanentes aplicados nos modelos em estudo

| | Afast. Pórticos - 5m | Afast. Pórticos - 6m | Afast. Pórticos - 7,5m |
|----------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Pórticos exteriores | 0,25 kN/m | 0,3 kN/m | 0,375 kN/m |
| Pórticos interiores | 0,5 kN/m | 0,6 kN/m | 0,75 kN/m |

- **Imperfeições-** O valor das imperfeições é transmitido para a estrutura através de uma força horizontal aplicada em apenas um dos nós, que liga os pilares às travessas, de cada pórtico, tal como se pode verificar na figura 49.

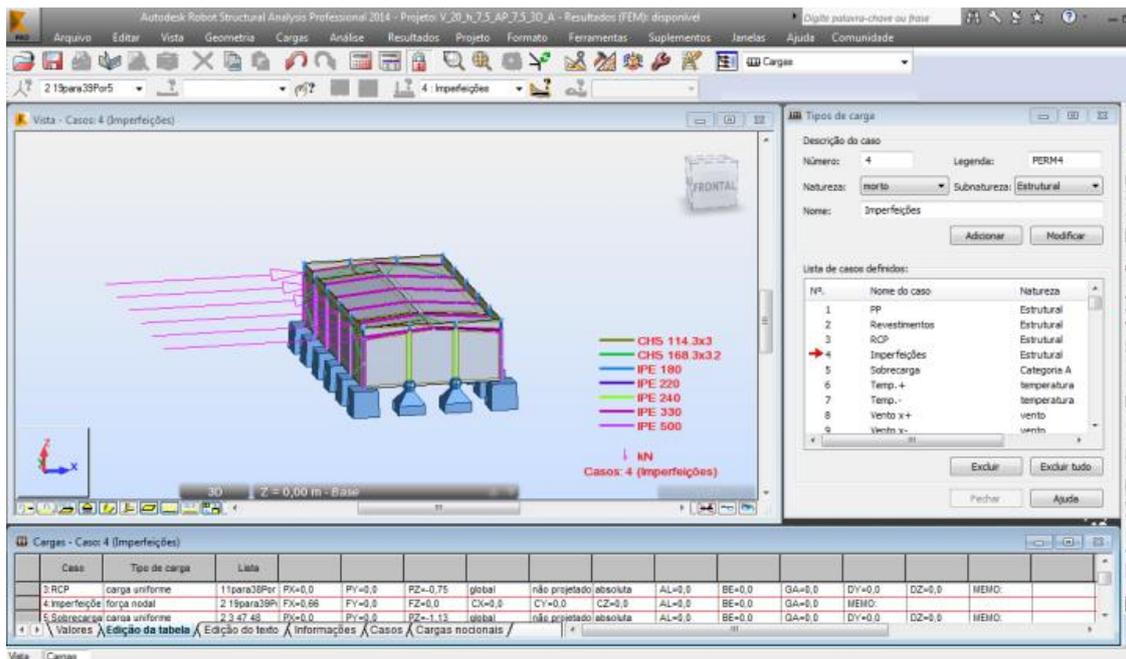


Figura 49: Representação da aplicação das imperfeições na estrutura

O valor das imperfeições variam com a altura do edifício, bem como com o afastamento entre pórticos e todos os seus valores podem ser consultados no anexo A.

- **Sobrecarga-** As sobrecargas fazem parte das acções variáveis e é aplicada na cobertura. Tal como acontece com os revestimentos e com as restantes cargas permanentes, na tabela de cargas existem dois valores diferentes de sobrecarga, um para aplicar nos pórticos exteriores e outros para aplicar nos pórticos interiores da estrutura (ver fig.50). O valor da sobrecarga a adoptar segundo a NP EN 1991-1-1, para coberturas da categoria H, é de $0,4\text{kN/m}^2$, contudo, segundo a experiência que a empresa tem neste tipo de construção, o valor normalizado é demasiado conservativo, sendo este valor alterado para $0,3\text{kN/m}^2$.

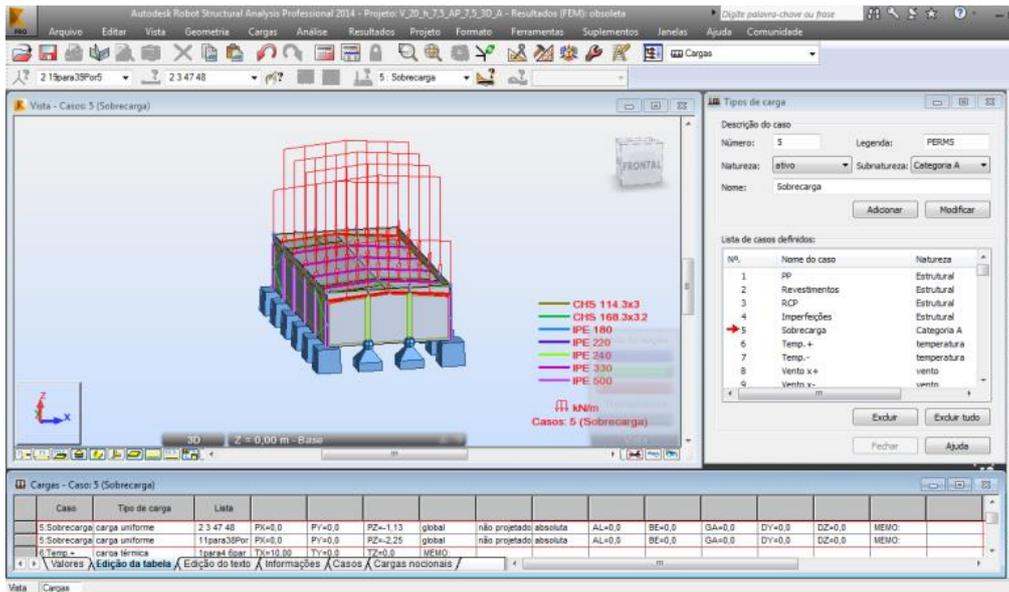


Figura 50: Representação da aplicação da sobrecarga na estrutura

- Efeito da temperatura-** O efeito da temperatura corresponde às variações dimensionais dos elementos estruturais, que ao contrair e dilatar vão introduzir tensões na estrutura. Como se pode constatar na figura 51, na tabela de cargas existem o elemento “Temp.+” que corresponde ao efeito de dilatação do material e o elemento “Temp.-“ que por sua vez representa a contracção deste. Segundo o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, os valores característicos das variações uniformes de temperatura é de $\pm 10^{\circ}\text{C}$, sendo os valores utilizados em todas as análises.

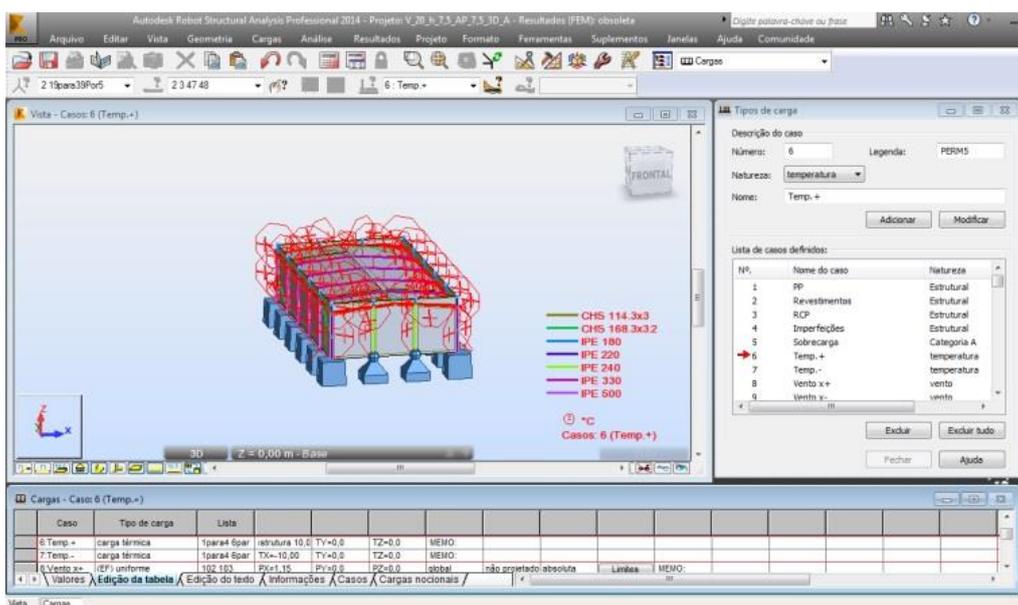


Figura 51: Representação da aplicação do efeito da temperatura na estrutura

- Acção do vento-** Quando é realizado o projecto de um edifício tem que ser estudada a acção do vento em todas as direcções, pois este elemento é imprevisível. Contudo, como os edifícios estudados são todos simétricos, basta apenas estudar a acção deste elemento em duas direcções, pois o comportamento da estrutura vai ser o mesmo para o vento numa determinada direcção e na direcção contrária. Assim nos modelos em estudo apenas foram introduzidas as acções do vento actuando na direcção x+ e y+, segundo o sistema de eixos representado no software. A introdução da acção do vento na tabela de cargas foi dividida em quatro fases, o vento na direcção x+ em todo o edifício excluindo a platibanda, o vento na direcção y+ em todo o edifício excepto na platibanda, o vento na direcção x+ actuante na platibanda e por último o vento na direcção y+ actuante na platibanda.

Como primeira fase vem a introdução da acção do vento na direcção x+, excepto na platibanda, onde são introduzidos 10 valores de pressão, que correspondem nomeadamente às pressões de vento da zona D, E, A nas duas direcções, B nas duas direcções, F, G, H e I, tal como se pode verificar na figura 52.

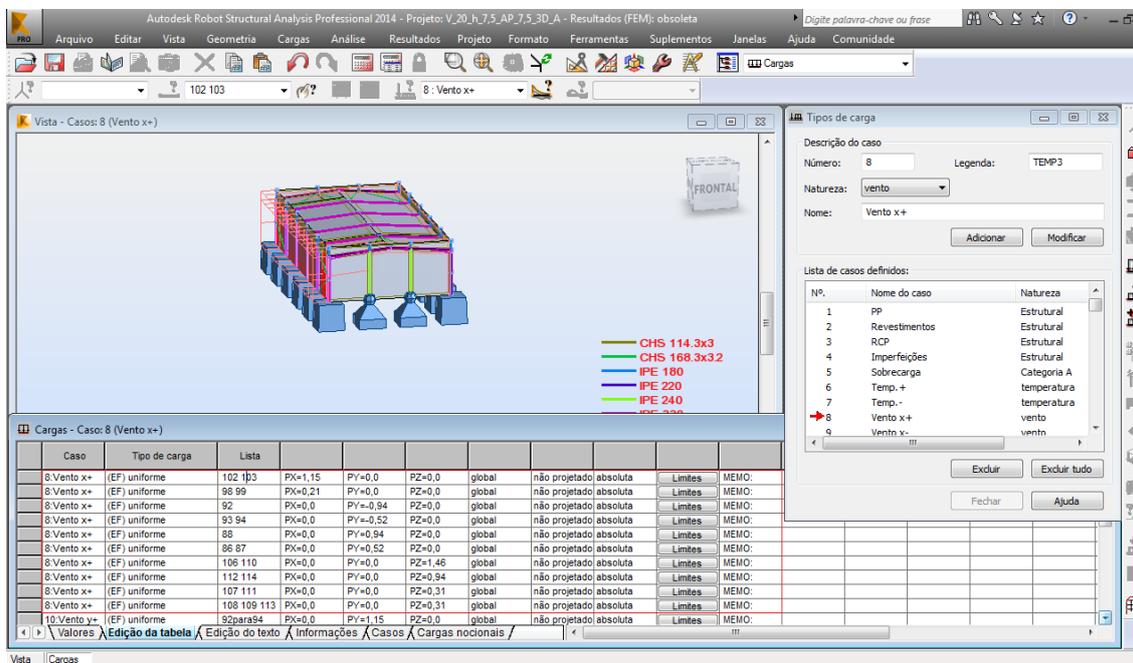


Figura 52: Introdução da acção do vento na direcção x+

De seguida vem a introdução da acção do vento na direcção y+, excepto na platibanda, onde também são introduzidos 10 valores de pressão do vento,

correspondendo às zonas D, E, A nas duas direcções, B nas duas direcções, F, G, H e I, respectivamente (ver fig.53).

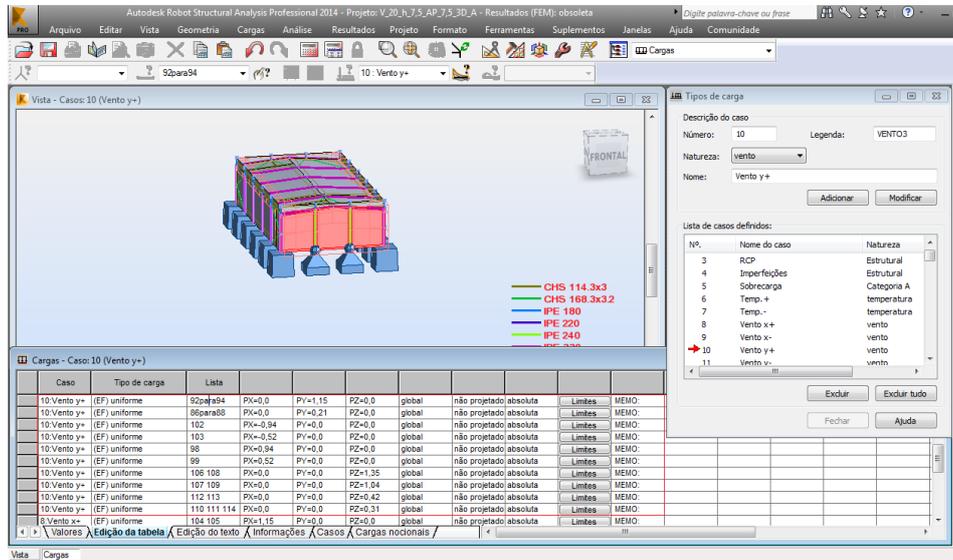


Figura 53: Introdução da acção do vento na direcção y+

Segue-se a introdução da acção do vento na direcção x+, mas apenas aplicado à platibanda. Para esta acção são introduzidos na tabela de cargas 6 pressões de vento, que correspondem à zona D, E, A nas duas direcções e B nas duas direcções, como se verifica na figura 54.

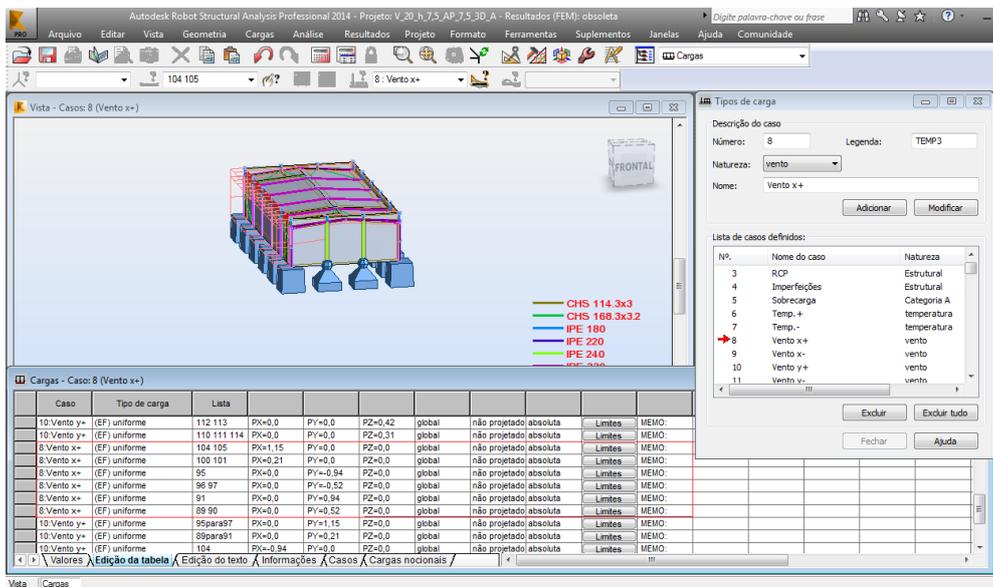


Figura 54: Introdução da acção do vento na direcção x+ para a platibanda

Por fim introduz-se a acção do vento na direcção y+, que tal como na fase anterior também é aplicada apenas à platibanda e tem 6 pressões de vento, para as zonas D, E, A nas duas direcções e B nas duas direcções (ver fig.55).

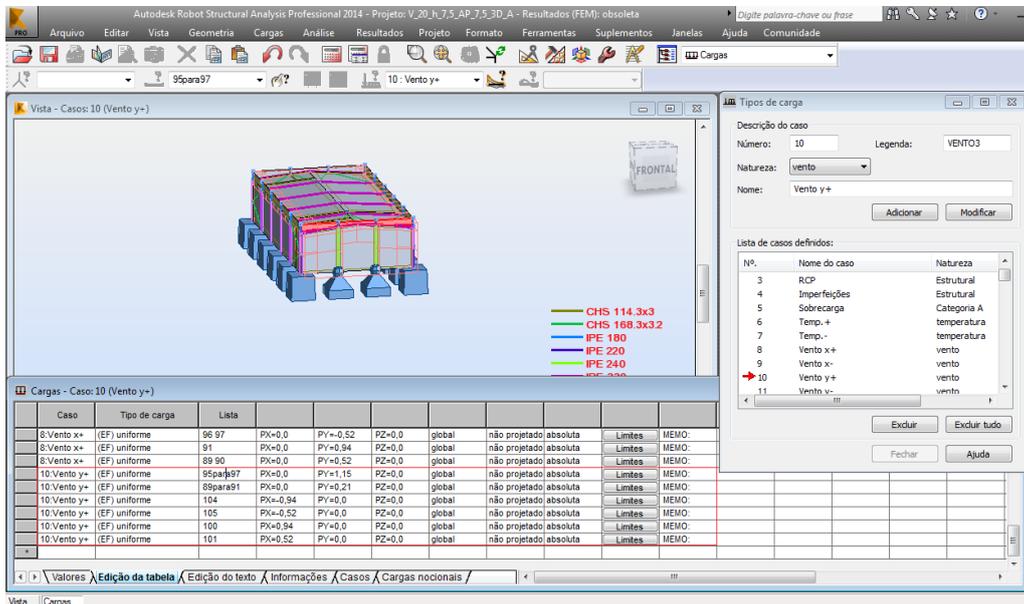


Figura 55: Introdução da acção do vento na direcção y+ para a platibanda

Todos os valores de acção do vento utilizados nas análises foram determinados segundo a norma NP EN 1991-1-4 e os seus valores podem ser consultados no anexo E.

5.4. Estudo estrutural dos edifícios

Antes de se iniciar o estudo estrutural propriamente dito, é necessário definir qual o tipo de membro e grupo de cada elemento estrutural, bem como caracterizar os grupos.

5.4.1. Caracterização dos grupos

Antes do início do estudo têm que ser definidos os grupos de elementos estruturais existentes nos modelos em estudo. Em todos eles foram criados 6 grupos diferentes, nomeadamente os pilares, as travessas, os coroamentos, os contraventamentos, as empenas e os pilaretes. Em todos os grupos são definidos o número do grupo, a lista de elementos estruturais que o constitui, o nome do grupo e o material constituinte de todos os seus elementos, tal como ilustra a figura 56.

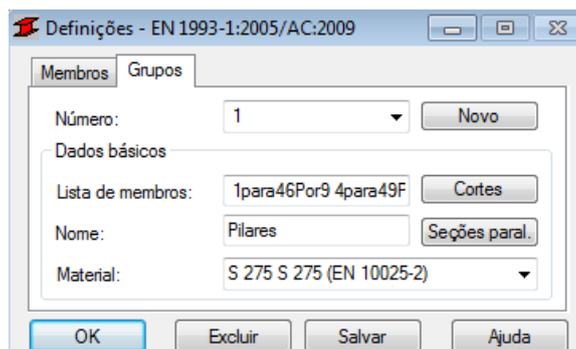


Figura 56:Quadro para definição das características dos grupos

5.4.2. Definição do tipo de membro e grupo de cada elemento estrutural

Depois de identificados e caracterizados todos os grupos, é necessário dar nome, definir que tipo de membro é e a que grupo pertence cada elemento estrutural (ver fig.57).

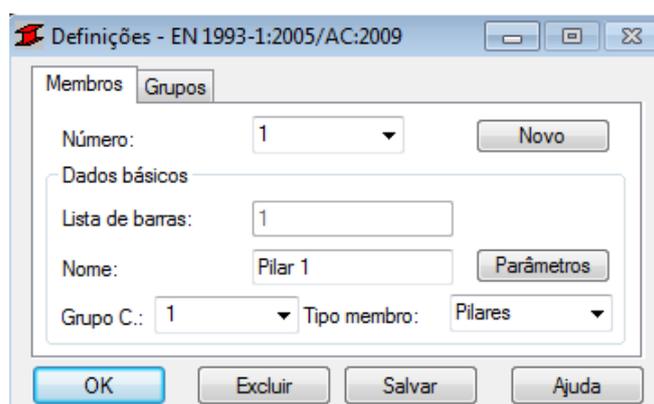


Figura 57:Quadro de caracterização de cada elemento estrutural

5.4.3.Verificação de todos os elementos estruturais

O estudo estrutural dos edifícios é efectuado no comando “Projecto em aço/alumínio” do menu “Projecto de aço” (ver fig.58).

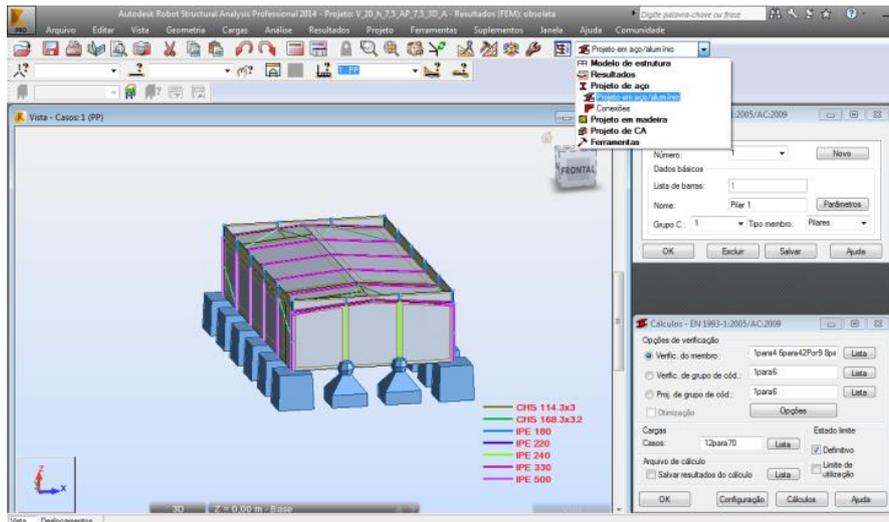


Figura 58: Ilustração do comando "Projecto em aço/alumínio" do menu "Projecto de aço"

Aqui, para além de ser possível definir qual o tipo de membro e grupo de cada elemento estrutural e caracterizar os grupos, também é possível submeter o modelo a todas as acções e combinações de acções a que este estará sujeito, tornando possível verificar se o perfil de cada elemento estrutural resiste ou não à combinação de acções mais crítica. Para tal é necessário seleccionar a opção “Verif. do membro” do quadro da figura 59, definir todos os membros que serão sujeitos a verificação, definir apenas as combinações correspondentes aos estados limites últimos, neste caso são todas as combinações entre a 12 e a 70, incluindo estas duas, e por fim clicar na na opção “Cálculos”.

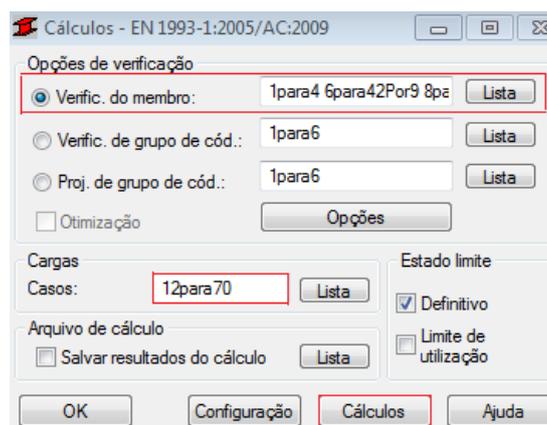


Figura 59: Ilustração dos elementos definidos para a realização da verificação de todos os membros

Como resultado desta análise obtém-se um quadro em que estão presentes as verificações de todos os elementos estruturais do modelo, como se pode verificar na figura 60. Através desta análise é possível saber qual a combinação mais crítica para cada elemento estrutural, bem como o rácio entre a carga actuante e carga resistente máxima de cada elemento.

| Membro | Seção | Material | Lay | Laz | Relação | Caso |
|-----------------|----------------|----------|--------|--------|---------|-------------------|
| 1 Pilar 1 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.38 | 50 Vento(x+)+Temp |
| 2 Travessa 2 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.22 | 50 Vento(x+)+Temp |
| 3 Travessa 3 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.22 | 49 Vento(x+)+Temp |
| 4 Pilar 4 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.30 | 49 Vento(x+)+Temp |
| 6 Coroamento 6 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.37 | 62 Vento(y+)+Temp |
| 8 Coroamento 8 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.37 | 62 Vento(y+)+Temp |
| 10 Pilar 10 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.56 | 50 Vento(x+)+Temp |
| 11 Travessa 11 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.78 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 12 Travessa 12 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.78 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 13 Pilar 13 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.51 | 14 Sc+Temp.(-) |
| 15 Coroamento 1 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.58 | 61 Vento(y+)+Temp |
| 17 Coroamento 1 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.55 | 61 Vento(y+)+Temp |
| 19 Pilar 19 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.80 | 50 Vento(x+)+Temp |
| 20 Travessa 20 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.77 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 21 Travessa 21 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.77 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 22 Pilar 22 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.50 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 24 Coroamento 2 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.57 | 61 Vento(y+)+Temp |
| 26 Coroamento 2 | OK CHS 114.3x3 | S 275 | 190.53 | 190.53 | 0.55 | 61 Vento(y+)+Temp |
| 28 Pilar 28 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.73 | 50 Vento(x+)+Temp |
| 29 Travessa 29 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.77 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 30 Travessa 30 | OK IPE 330 | S 275 | 129.61 | 49.19 | 0.77 | 13 Sc+Temp.(+) |
| 31 Pilar 31 | OK IPE 500 | S 275 | 25.70 | 34.84 | 0.50 | 13 Sc+Temp.(+) |

Figura 60:Quadro com as verificações de todos os elementos estruturais do modelo

O estudo dos elementos estruturais através da sua verificação é um processo iterativo, que torna a análise um pouco morosa. Como alternativa é possível realizar uma análise que permite obter, dentro do tipo de perfis pré-definidos, o perfil ideal para cada elemento, isto é, o perfil com a menor dimensão e o mais barato possível.

Para realizar esta análise selecciona-se a opção “Proj. de grupo de cód.”, define-se os grupos que se pretende analisar, bem como o critério de optimização. O critério utilizado em todas as análises foi o peso, pois o principal objectivo é obter a solução mais barata possível, ou seja, a solução mais leve possível (ver fig.61).

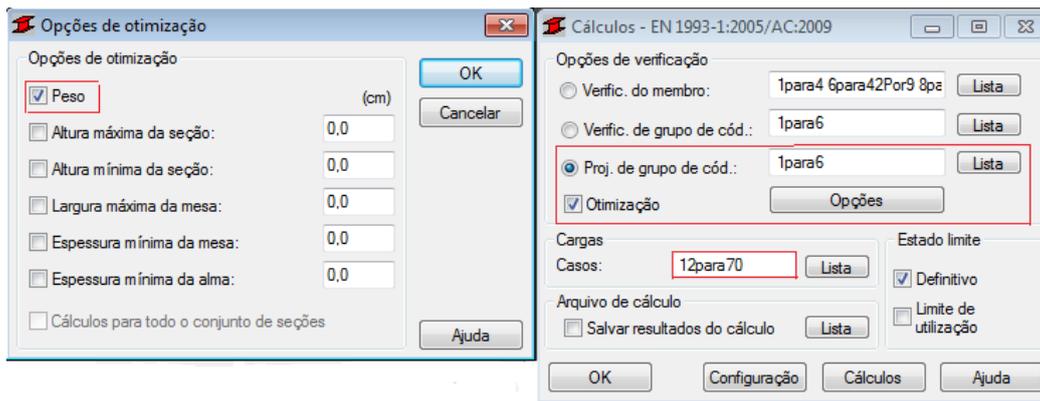


Figura 61: Ilustração dos elementos definidos para a otimização de perfis

Como resultado desta análise obtém-se um quadro que identifica o perfil mais adequado e a combinação mais crítica de cada grupo. Aqui também é possível visualizar o rácio entre a carga actuante e carga resistente máxima de cada elemento, sendo que o valor apresentado diz respeito ao elemento estrutural mais solicitado de cada grupo (ver fig.62).

| Membro | Seção | Material | Lay | Laz | Relação | Caso |
|--|--------------|----------|--------|--------|---------|--------------------------|
| Grupo de código : 1 Pilares | | | | | | |
| 19 Pilar 19 | IPE 450 | S 275 | 28.41 | 36.42 | 1.06 | 50 Vento(x+)+Temp.(-) |
| | IPE 500 | | 25.70 | 34.84 | 0.80 | |
| | IPE 550 | | 23.49 | 33.67 | 0.61 | |
| Grupo de código : 2 Travessas | | | | | | |
| 12 Travessa 12 | IPE 300 | S 275 | 142.51 | 52.13 | 1.87 | 13 Sc+Temp.(+) |
| | IPE 330 | | 129.61 | 49.19 | 0.78 | |
| | IPE 360 | | 118.77 | 46.09 | 1.00 | |
| Grupo de código : 3 Coroamentos | | | | | | |
| 15 Coroamento 15 | CHS 88.9x3.6 | S 275 | 248.47 | 248.47 | 1.04 | 61 Vento(y+)+Temp.(+) |
| | CHS 114.3x3 | | 190.53 | 190.53 | 0.58 | |
| | CHS 88.9x4 | | 250.00 | 250.00 | 0.95 | |
| Grupo de código : 4 Contraventamentos | | | | | | |
| 64 Contraventamento 64 | CHS 88.9x6.3 | S 275 | 343.28 | 343.28 | 2.89 | 61 Vento(y+)+Temp.(+) |
| | CHS 168.3x3. | | 172.21 | 172.21 | 0.76 | |
| | CHS 139.7x4 | | 209.47 | 209.47 | 1.07 | |
| Grupo de código : 5 Empenas | | | | | | |
| 50 Empena 50 | IPE 220 | S 275 | 88.73 | 60.54 | 1.34 | 62 Vento(y+)+Temp.(-) |
| | IPE 240 | | 81.08 | 55.70 | 0.92 | |
| | IPE 270 | | 72.04 | 49.62 | 0.68 | |
| Grupo de código : 6 Pilaretes | | | | | | |
| 75 Pilarete 75 | IPE 160 | S 275 | 45.61 | 81.35 | 1.02 | 62 Vento(y+)+Temp.(-) |
| | IPE 180 | | 40.45 | 73.09 | 0.77 | |
| | IPE 200 | | 36.32 | 67.09 | 0.59 | |

Figura 62: Quadro que identifica o perfil mais adequado e a combinação mais crítica de cada grupo

5.4.3.1. Análise estrutural para diferentes travamentos

Os travamentos dos elementos estruturais dos edifícios é uma temática muito importante e complexa. Estes elementos quando usados correctamente permitem poupar muito material e conseqüentemente tornar a obra mais barata, contudo quando aplicados em excesso aumentam a complexidade da montagem do edifício, sendo necessário o aumento de horas-homem trabalhadas quer na fábrica, a fabricar os travamentos, quer em obra, a montá-los um a um.

Sendo assim é necessário encontrar um equilíbrio e ter a perfeita noção do benefício que certo travamento traz ao edifício, não correndo o risco de estes serem colocados desnecessariamente.

Os edifícios em estudo têm apenas dois tipos de travamentos que apenas têm a função de reforçar os elementos estruturais. O primeiro tipo de travamentos são os reforços das travessas, que se encontram ligados aos pilares e às travessas, tal como demonstra a figura 63, e que têm como função reforçar as travessas, permitindo que estas tenham um perfil mais ligeiro do que teriam caso este travamento não existisse.

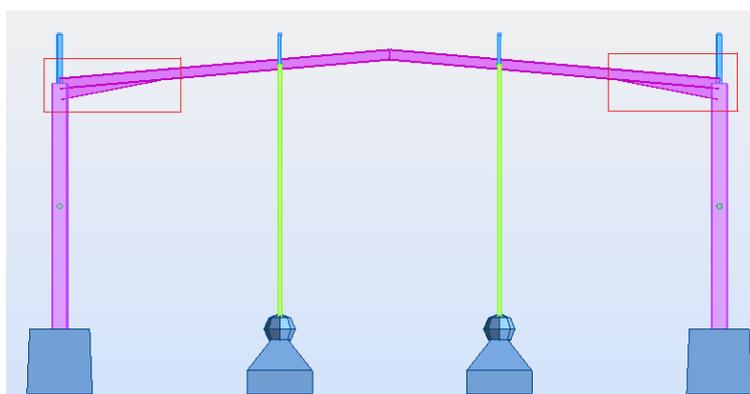


Figura 63: Travamento de reforço das travessas

O segundo tipo são os travamentos designados de “mãos- de- amigo” que têm como função prevenir a encurvadura lateral das travessas e dos pilares (ver fig. 64). Estes consistem em duas barras ligadas às madres e ao banzo inferior dos perfis, impedindo o deslocamento lateral deste último.

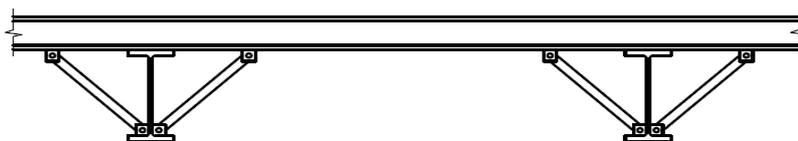


Figura 64: Travamento do banço inferior das travessas e pilares [11]

Os reforços das travessas estão em todos os edifícios, sendo a sua presença benéfica em todos os edifícios.

Quanto aos reforços do banço inferior, a sua presença nem sempre é benéfica para a estrutura, logo terá que ser utilizada com muito critério.

Para saber quais os travamentos estritamente necessários para cada estrutura, foi feita uma análise dos edifícios com seis formas de travamento diferentes, nomeadamente:

- ✓ **0**-Pilares travados em todas as madres/travessas travadas em todas as madres
- ✓ **1**-Pilares travados numa madre/ travessas travadas em todas as madres
- ✓ **2**-Pilares travados em todas as madres/ travessas travadas madre sim-madre não
- ✓ **3**- Pilares travados numa madre/ travessas travadas madre sim-madre não
- ✓ **4**- Pilares não travados/ travessas travadas madre sim-madre não
- ✓ **5**-sem travamentos

O principal objectivo desta análise seria obter o tipo de travamento que tornaria a estrutura menos dispendiosa, contudo tal não é possível, pois existem despesas muito difíceis de quantificar, tal como o preço do fabrico dos travamentos, o custo adicional de mão-de-obra necessária para sua montagem e o custo dos próprios processos de montagem. Devido a estas dificuldades, definiu-se que a solução a adoptar seria aquela que tivesse os perfis mais ligeiros para as travessas e pilares, com o menor número de travamentos possível, visto que em princípio esta será uma das soluções mais económicas.

Como exemplo, na tabela 19, pode-se verificar os resultados obtidos na análise do edifício com um vão de 10m, uma altura de pilar de 5m e um afastamento entre pórticos de 5m. Aqui pode-se observar os perfis de cada elemento estrutural, seguido da solicitação do perfil mais crítico de cada um deles. Em baixo pode observar-se a verificação dos deslocamentos verticais (U_z) e horizontais (U_x) máximos, com vista a garantir que estes valores não ultrapassem os deslocamentos limite permitidos pelas normas em vigor, limites esses evidenciados entre parênteses. Destes resultados é

importante retirar que para manter os perfis mais ligeiros nas travessas e pilares não é necessário existirem travamentos em todas as madres dos pilares, basta colocar um travamento na madre central dos pilares.

Do mesmo modo podemos concluir que tal como o modo de travamento 0, os modos de travamento 2 e 4 também contêm travamentos desnecessários. Assim, se um dia este edifício for construído, sabe-se quais os modos de travamento a evitar.

Tabela 19: Resultados obtidos na análise de um dos edifícios

| Resultados finais com diferentes travamentos | |
|--|--|
| 0 Pilares: IPE 240-0,87 Travessas: IPE 180-0,91 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1,4\text{cm}$ (máx=4cm) | 3 Pilares: IPE 240-0,93 Travessas: IPE 200-0,66 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1,4\text{cm}$ (máx=4cm) |
| 1 Pilares: IPE 240-0,97 Travessas: IPE 180-0,91 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1,4\text{cm}$ (máx=4cm) | 4 Pilares: IPE 270-0,80 Travessas: IPE 200-0,69 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,4\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1\text{cm}$ (máx=4cm) |
| 2 Pilares: IPE 240-0,84 Travessas: IPE 200-0,66 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1,2\text{cm}$ (máx=4cm) | 5 Pilares: IPE 270-0,80 Travessas: IPE 200-0,89 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86 $U_x=0,4\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_z=1\text{cm}$ (máx=4cm) |

6. Estudo das ligações das estruturas

Uma ligação consiste num local, também designado por nó, em que dois ou mais elementos convergem e a sua resistência deverá ser determinada com base na resistência individual das suas componentes básicas.

Todas as ligações devem ter uma resistência de cálculo tal que a estrutura seja capaz de satisfazer todos os requisitos das normas referentes ao projecto de estruturas de aço, nomeadamente a norma NP EN 1993-1-8 (projecto de ligações) e NP EN 1993-1-1 (Regras gerais e regras para edifícios).

6.1. Tipos de ligações

Nas estruturas metálicas as ligações são normalmente realizadas de duas maneiras diferentes, através de ligações aparafusadas e soldadas.

6.1.1. Ligações de parafusos, rebites ou cavilhas

O projecto de ligações aparafusadas, aplicado a estruturas metálicas, deverá ser realizado segundo a norma NP EN 1993-1-8, sendo que esta só é válida para as classes de parafusos 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8 e 10.9 [15].

6.1.1.1. Categorias de ligações aparafusadas

Segundo a norma NP EN 1993-1-8 existem 5 categorias de ligações aparafusadas, sendo que as categorias A, B e C pertencem ao conjunto de ligações solicitadas ao corte e as categorias D e E pertencem ao conjunto de ligações solicitadas à tracção [15].

- **Ligações ao corte**

Categoria A: Ligação resistente ao esmagamento

Categoria B: Ligação resistente ao escorregamento no estado limite de utilização

Categoria C: Ligação resistente ao escorregamento no estado limite último

- **Ligações traccionadas**

Categoria D: Ligações não pré-esforçadas

Categoria E: Ligações pré-esforçadas

6.1.1.2. Disposição dos furos de parafusos e de rebite

Quando é efectuada uma ligação aparafusada tem que se ter em atenção as distâncias entre eixos de furos e as distâncias à extremidade e ao bordo lateral. Se estas distâncias

forem demasiado elevadas podem conduzir à encurvadura local em elementos comprimidos, se forem demasiado pequenas podem originar a ruptura do material de base do furo, pois poderá ter uma secção de material demasiado pequena para resistir às cargas a que estará sujeito. Assim, com vista a prevenir estas duas situações, a norma NP EN 1993-1-8 apresenta um quadro onde se pode verificar as distâncias mínimas e máximas entre eixos, distâncias às extremidades e aos bordos (ver tabela 20).

Tabela 20: Distâncias mínimas e máximas entre eixos, distâncias às extremidades e aos bordos [15]

| Distâncias e entreeixos, ver a Figura 3.1 | Mínimo | Máximo | | |
|---|---------------|---|--|--|
| | | Estruturas feitas de aços respeitando a EN 10025 com excepção dos aços respeitando a EN 10025-5 | | Estruturas feitas de aços conformes à EN 10025-5 |
| | | Aço exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas | Aço não exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas | Aço utilizado sem protecção |
| Distância à extremidade e_1 | $1,2d_0$ | $4t + 40$ mm | | O maior dos valores $8t$ ou 125 mm |
| Distância ao bordo lateral e_2 | $1,2d_0$ | $4t + 40$ mm | | O maior dos valores $8t$ ou 125 mm |
| Distância e_3 para furos ovalizados | $1,5d_0^{4)}$ | | | |
| Distância e_4 para furos ovalizados | $1,5d_0^{4)}$ | | | |
| Distância entre eixos p_1 | $2,2d_0$ | O menor dos valores $14t$ ou 200 mm | O menor dos valores $14t$ ou 200 mm | O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm |
| Distância entre eixos $p_{1,0}$ | | O menor dos valores $14t$ ou 200 mm | | |
| Distância entre eixos $p_{1,i}$ | | O menor dos valores $28t$ ou 400 mm | | |
| Distância entre eixos $p_2^{5)}$ | $2,4d_0$ | O menor dos valores $14t$ ou 200 mm | O menor dos valores $14t$ ou 200 mm | O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm |

Analisando o quadro anterior, verifica-se que para uma ligação aparafusada vulgar, os parâmetros a ter em conta serão a distância à extremidade (e_1), a distância ao bordo lateral (e_2), a distância entre eixos (p_1) e a distância entre eixos (p_2), tal como demonstra a figura 65.

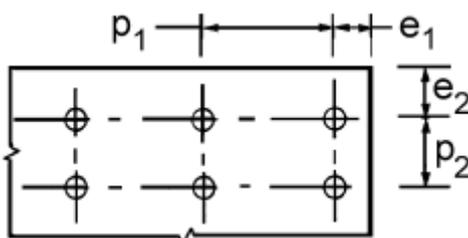


Figura 65: Símbolos para as distâncias entre eixos dos furos de peças de ligação [15]

Assim, analisando a tabela 20, verifica-se que as distâncias máximas e mínimas à extremidade, aos bordos e entre eixos serão as que se podem observar na tabela 21.

Tabela 21: Distâncias máximas e mínimas mais relevantes

| | Mínima | Máxima |
|---|----------------|--|
| Distância à extremidade ($e1$) | $1,2 \cdot d0$ | $4 \cdot t + 40\text{mm}$ |
| Distância ao bordo lateral ($e2$) | $1,2 \cdot d0$ | $4 \cdot t + 40\text{mm}$ |
| Distância entre eixos ($p1$) | $2,2 \cdot d0$ | O menor valor de: $14 \cdot t$ ou 200mm |
| Distância entre eixos ($p2$) | $2,4 \cdot d0$ | O menor valor de: $14 \cdot t$ ou 200mm |

6.1.2. Ligações soldadas

As ligações soldadas têm que ser realizadas segundo a norma NP EN 1993-1-8. Esta é aplicável apenas a aços de construção soldáveis que respeitem a norma NP EN 1993-1-1 e a espessuras de material iguais ou superiores a 4mm, no caso de soldaduras num material de menor espessura deverá recorrer-se à norma NP EN 1993-1-3 [15].

6.1.2.1. Tipos de soldadura

Quanto aos tipos de soldadura, a norma NP EN 1993-1-8 abrange o dimensionamento de soldaduras de ângulo, de soldaduras de ângulo em contornos de orifícios, de soldaduras de topo, de soldaduras de bujão, e de soldaduras em bordos arredondados.

- **Soldaduras de ângulo**

As soldaduras de ângulo são utilizadas para ligar peças quando as superfícies de fusão formam entre si um ângulo compreendido entre 60 e 120 graus (ver fig.66).

Também é possível realizar este tipo de soldadura para ângulos inferiores a 60 graus, no entanto esta deverá considerar-se uma soldadura de topo com penetração parcial. Para ângulos superiores a 120 graus a resistência das soldaduras deverá ser determinada por meio de ensaios de acordo com a norma NP EN 1990 [15].



Figura 66: Soldadura de ângulo contínua [16]

Dentro das soldaduras de ângulo tem-se as soldaduras contínuas e descontínuas, nas primeiras a soldadura é realizada em todo o comprimento da ligação, já nas segundas esta é descontínua, tal como demonstra a figura 67.

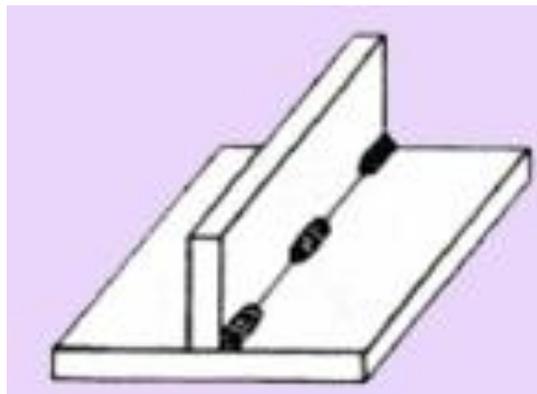
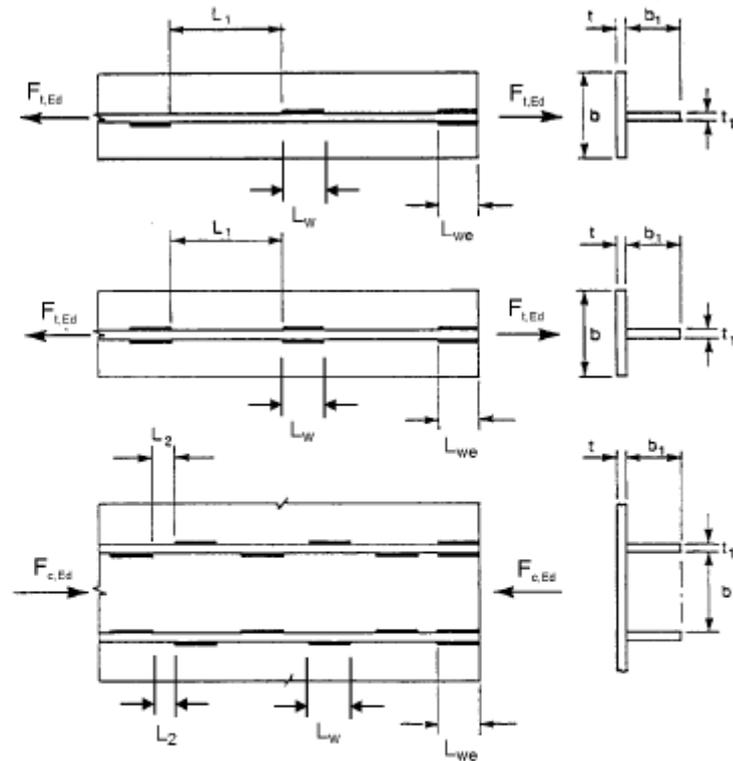


Figura 67: Soldadura de ângulo descontínua [17]

As soldaduras de ângulo descontínuas não deverão ser utilizadas em ambientes corrosivos. Os afastamentos ($L1$ ou $L2$) entre as extremidades de cada cordão, deverão satisfazer as condições presentes na figura 68.



$$L_{we} \geq \text{menor dos valores } (0,75 b ; 0,75 b_1)$$

Para elementos compostos traccionados:

$$L_1 \leq \text{menor dos valores } (16 t ; 16 t_1 ; 200 \text{ mm})$$

Para elementos compostos comprimidos ou solicitados ao corte:

$$L_2 \leq \text{menor dos valores } (12 t ; 12 t_1 ; 0,25 b ; 200 \text{ mm})$$

Figura 68:Características das soldaduras de ângulo descontínuas [15]

- **Soldaduras de ângulo em todo o contorno de orifícios**

Segundo a norma NP EN 1993-1-8, as soldaduras de ângulo em contornos de orifícios constituídas por cordões de ângulos depositados na periferia de furos circulares (ver fig.69), só poderão ser utilizadas para transmitir esforço de corte ou para impedir o enfundamento ou a separação das peças sobrepostas. O diâmetro de um furo circular ou largura de um furo alongado não deverá ser inferior a quatro vezes a espessura da peça furada, neste tipo de soldadura [15].



Figura 69: Soldadura de ângulo em todo o contorno de orifícios [18]

- **Soldaduras de topo**

As soldaduras de topo dividem-se em dois tipos, as que tem penetração total e as que tem penetração parcial.

Uma soldadura de topo com penetração total é definida como sendo uma soldadura na qual se verifica uma penetração e uma fusão completas do metal de adição e do metal base na totalidade da espessura da junta (ver fig.70) [15].

Numa soldadura de topo com penetração parcial é definida como sendo uma soldadura na qual a penetração na junta é inferior à totalidade da espessura do metal base [15].

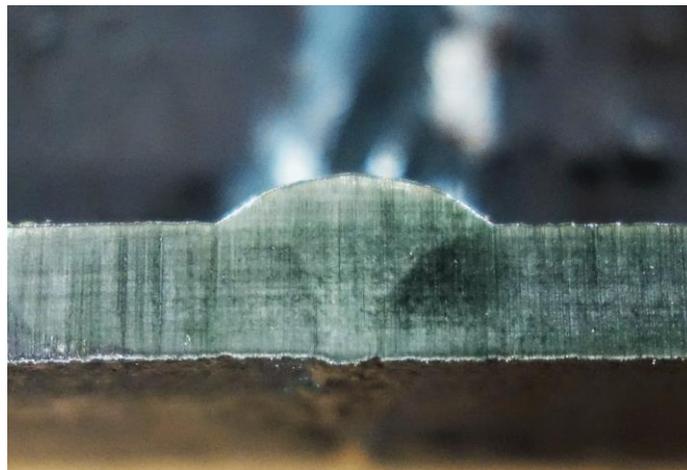


Figura 70: Soldadura de topo com penetração total [19]

- **Soldaduras de bujão**

As soldaduras de bujão poderão ser utilizadas para transmitir um esforço de corte, impedir o enfunamento ou a separação de peças sobrepostas e ligar entre si os componentes de elementos compostos, contudo não deverão ser utilizadas para resistir a um esforço exterior de tracção [15].

Neste tipo de soldadura, o diâmetro de um furo circular ou a largura de um furo alongado deverá ter pelo menos mais 8mm do que a espessura da peça furada [15].

A espessura da soldadura, aplicada numa peça de espessura inferior ou igual a 16mm, deverá ser igual à espessura dessa peça. Em peças com espessura superior a 16mm, a espessura da soldadura deverá ser igual ou superior a metade da espessura do material base, mas não inferior a 16mm [15].

- **Soldaduras em contornos arredondados**

As soldaduras em contornos arredondados são utilizados para ligar varões ou perfis tubulares rectangulares com canto arredondado, sendo que a espessura efectiva do cordão neste tipo de soldadura está definida na figura 71 [15].

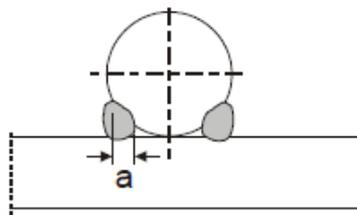


Figura 71:Espessura efectiva de um cordão de soldadura de um contorno de um varão [15]

6.2.Ligações aplicadas nas estruturas estudadas

Em todas as estruturas estudadas apenas foram aplicadas dois tipos de ligações, nomeadamente ligações aparafusadas e ligações soldadas. Dentro de todas as ligações que estas estruturas vão ter, apenas as três ligações mais importantes serão estudadas, nomeadamente as ligações entre a fundação e o pilar, as ligações entre o pilar e a travessa e as ligações entre as travessas.

6.2.1.Ligações aparafusadas

As ligações aparafusadas são as mais utilizadas, em toda a estrutura dos edifícios. Como exemplo vêm as ligações mais importantes da estrutura, em que todas elas são efectuadas recorrendo a parafusos.

Nas ligações entre a fundação e o pilar, o parafuso atravessa a chapa de base e a fundação, ligando o pilar à fundação (ver fig.72).

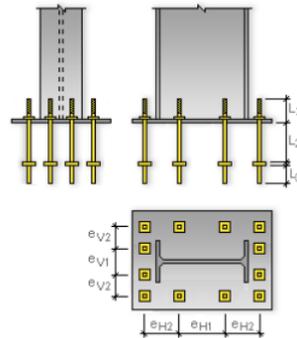


Figura 72: Ilustração da ligação fundação-pilar

Nas ligações entre o pilar e a travessa, os parafusos atravessam a chapa, que se encontra ligada à travessa, e o banzo do pilar. (ver fig.73).

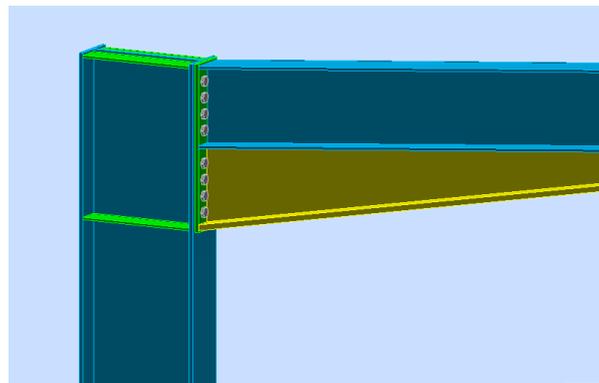


Figura 73: Ilustração da ligação entre o pilar e a travessa

Nas ligações entre as travessas, os parafusos atravessam as duas chapas, em que cada uma delas se encontra ligada a uma travessa (ver fig.74).

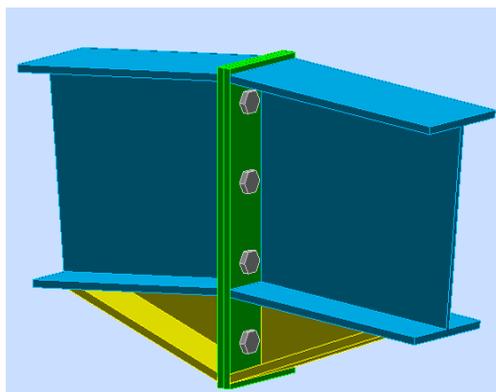


Figura 74: Ilustração da ligação entre duas travessas

6.2.2. Ligações soldadas

Embora nas três principais ligações os componentes mais importantes estejam ligados através de parafusos, pode verificar-se também que alguns componentes dessas ligações são fixos através de ligações soldadas.

Nas ligações entre a fundação e o pilar, a soldadura é utilizada para unir a placa de base ao perfil do pilar, e assim permitir que posteriormente seja efectuada a ligação aparafusada (ver fig.75).

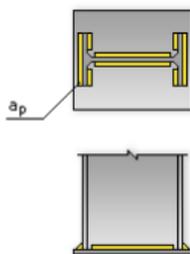


Figura 75: Ligação soldada entre o pilar e a placa de base

Na ligação entre o pilar e a travessa, a soldadura é também utilizada, para unir a travessa à chapa de base, o reforço da travessa à chapa de base, o reforço da travessa à travessa e os reforços do pilar ao pilar (ver fig.76).

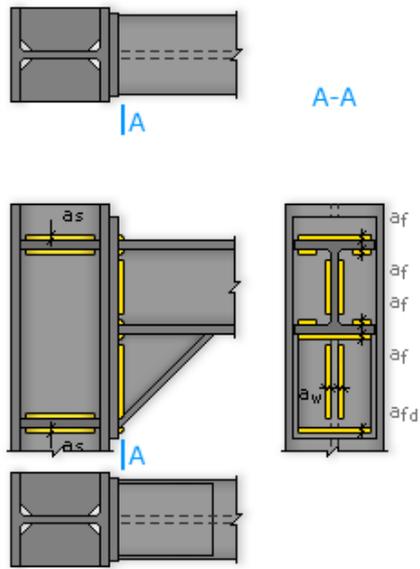


Figura 76: Soldaduras presentes na ligação entre o pilar e a travessa

Nas ligações entre as travessas as soldaduras aparecem para unir a travessa à chapa de base, o reforço da travessa à chapa de base e o reforço da travessa à travessa (ver fig.77).

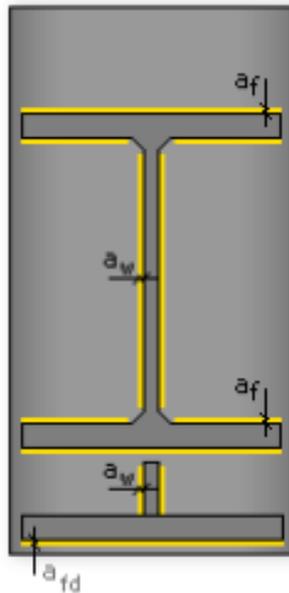


Figura 77: Ligações soldadas presentes na ligação entre duas travessas

6.3. Dimensionamento das ligações

Para montar este tipo de estruturas é necessário realizar inúmeras ligações entre os componentes da mesma, contudo apenas foram dimensionadas três das ligações mais importantes da estrutura.

Como já foi visto anteriormente, a resistência de uma ligação depende das propriedades dos seus componentes básicos, sendo estes os que estão identificados na figura 78, para juntas de perfis em H ou em I.

| Componente | | Componente | | Componente | | |
|------------|--|------------|----|---|----|---|
| 1 | Prisei de alma de coluna solicitado ao corte | | 7 | Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão | | |
| 2 | Alma de coluna em compressão transversal | | 8 | Alma de viga a tracção | | |
| 3 | Alma de coluna em tracção transversal | | 9 | Chapa a tracção ou compressão | | |
| 4 | Banzo de coluna em flexão | | 10 | Parafusos a tracção | | |
| 5 | Chapa de extremidade em flexão | | 11 | Parafusos ao corte | | |
| 6 | Cantoneira de banzo em flexão | | 12 | Parafusos em esmagamento (no banzo da viga, no banzo da coluna, na chapa de extremidade ou na cantoneira) | | |
| | | | | | 13 | Betão a compressão incluindo a argamassa de selagem |
| | | | | | 14 | Chapa de base de coluna em flexão sob a acção de compressão |
| | | | | | 15 | Chapa de base de coluna em flexão sob a acção de tracção |
| | | | | | 16 | Chumbadores a tracção |
| | | | | | 17 | Chumbadores ao corte |
| | | | | | 18 | Chumbadores ao esmagamento |
| | | | | | 19 | Soldaduras |
| | | | | | 20 | Esquadro de reforço de viga |

Figura 78: Componentes básicos das juntas estruturais de perfis em H e I [15]

As regras de aplicação que deverão ser utilizadas para a avaliação destes componentes estão especificadas ao longo da secção 6 da norma NP EN 1993-1-8, permitindo que este cálculo seja efectuado analiticamente. Contudo este cálculo é muito complexo e moroso, pois para cada ligação é necessário identificar quais os seus componentes básicos e avaliá-los através das regras especificadas nesta norma, sendo normalmente um processo muito complexo.

Por tudo o que foi enunciado anteriormente, tornou-se impossível fazer uma avaliação analítica de todas as ligações, utilizando-se para este efeito um software que permita realizar esta análise.

Assim, para o dimensionamento das ligações em estudo, tal como para o dimensionamento dos perfis, foi utilizado o software Autodesk Robot Structural Analysis.

6.3.1. Dimensionamento das ligações através do software Autodesk Robot Structural Analysis

No software Autodesk Robot Structural Analysis as ligações são estudadas no comando “Conexões” do menu “Projeto de aço”, tal como ilustra a figura 79.

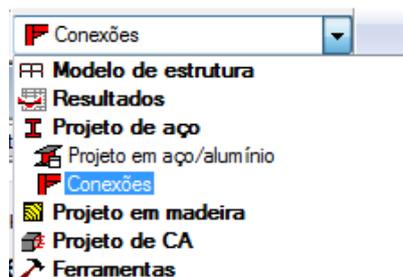


Figura 79: Comando "Conexões" do menu "Projeto de aço"

Todos os dimensionamentos foram realizados com vista a obter a solução mais vantajosa, isto é, a solução com a menor complexidade e menos quantidade de material possível.

Em todos os casos houve o cuidado de garantir que o ponto fraco da ligação seria um componente dúctil, para permitir que antes da rotura existissem deformações. Um exemplo desses componentes serão as chapas de base presentes nas ligações.

6.3.1.1. Ligações fundação-pilar

Para efectuar uma ligação fundação-pilar é necessário seleccionar, na estrutura, o pilar e a fundação que irão ser ligadas (ver fig.80). De seguida selecciona-se o comando “Nova ligação para as barras seleccionadas”, presente na barra de ferramentas ilustrada na figura 81.

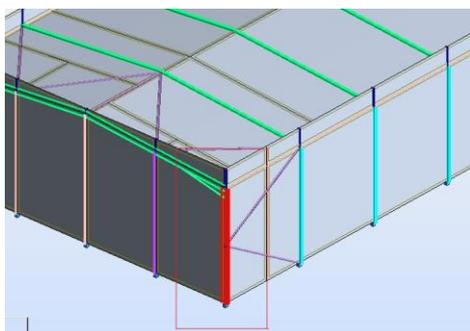


Figura 80: Pilar e fundação a ligar seleccionados



Figura 81: Barra de ferramentas com o comando "Nova ligação para as barras seleccionadas"

Depois de seleccionada a opção referida anteriormente, surge uma janela que permite verificar e atribuir todas as características da ligação (ver fig.82). Dentro desta janela encontram-se 7 subjanelas, com as características do pilar, da placa de base, dos parafusos de ancoragem, da cunha, das soldas, da fundação e dos parâmetros de cálculo.

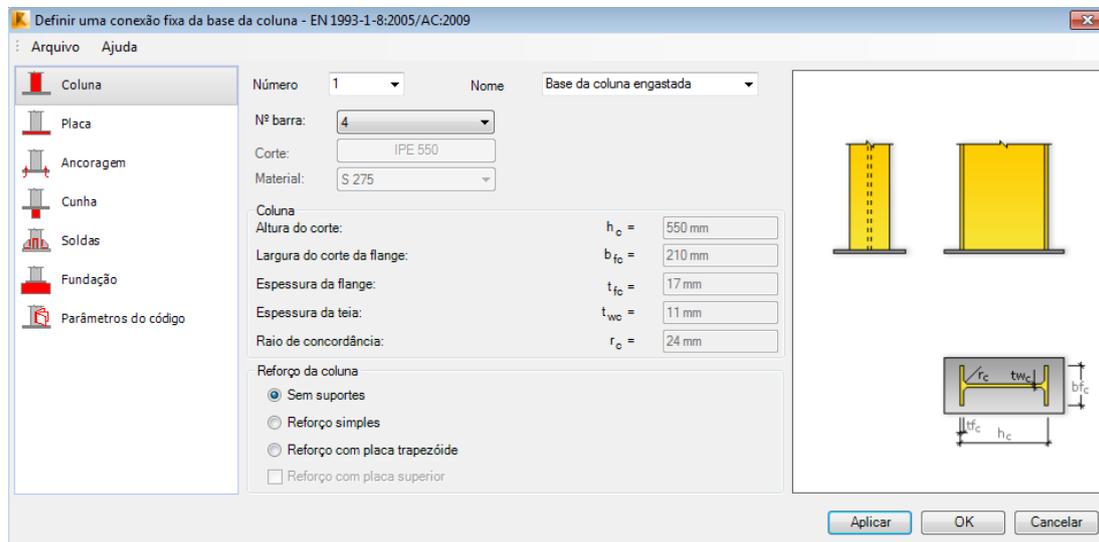


Figura 82: Janela de atribuição das características da ligação fundação-pilar

Como se pode verificar na figura 82, na subjanela referente às características do pilar, é possível definir as características geométricas do pilar.

De seguida vem a subjanela referente às características da placa de base. Aqui é possível atribuir as características geométricas da placa de base e o material deste, como se pode verificar na figura 83.

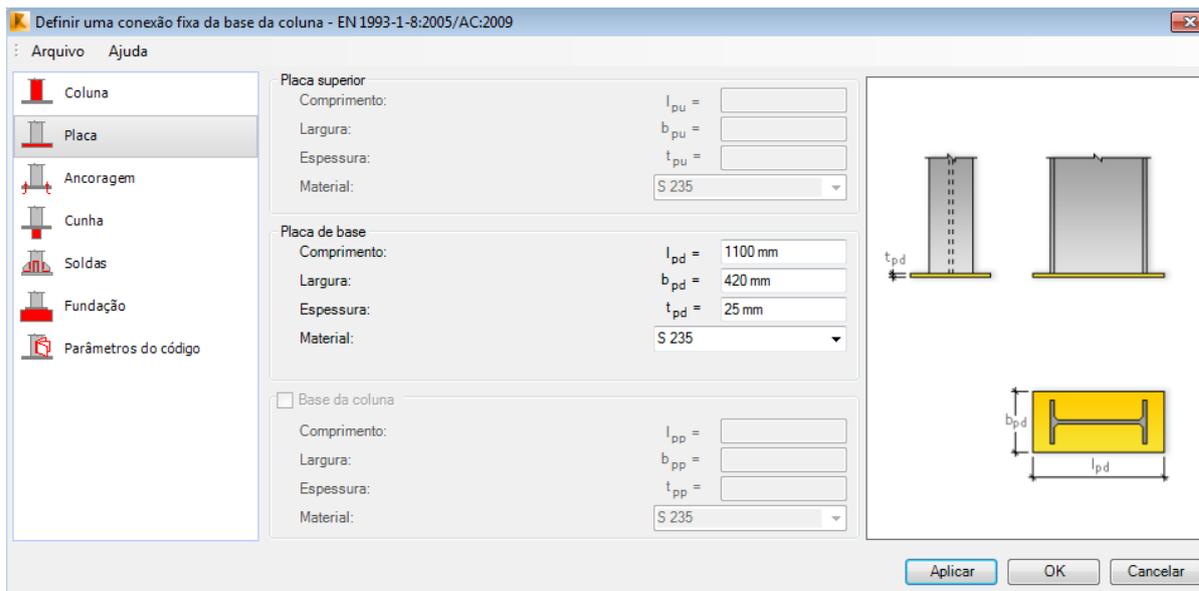


Figura 83:Subjanela referente às características da placa de base

A próxima subjanela é referente aos parafusos de ancoragem, onde se pode definir o número de parafusos de ancoragem a utilizar, a sua disposição, as características e parâmetros geométricos dos parafusos (ver fig.84).

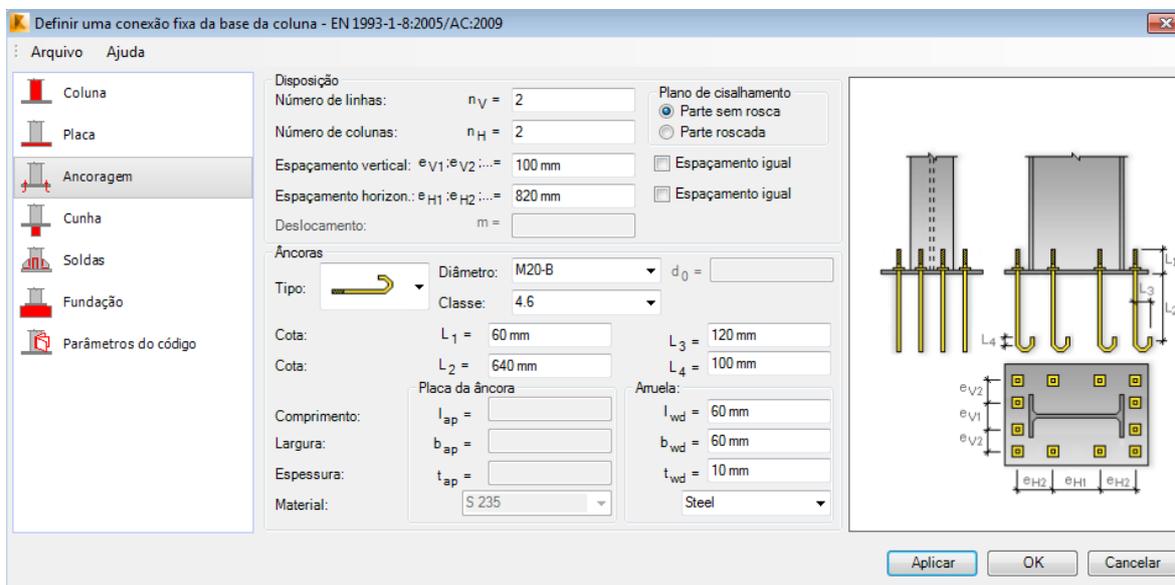


Figura 84:Subjanela referente às características dos parafusos de ancoragem

A próxima subjanela refere-se à cunha da ligação. Nenhum dos edifícios estudados utilizou este componente na ligação, contudo, é possível definir a presença ou não deste componente, bem como definir as suas características geométricas (ver fig.85).

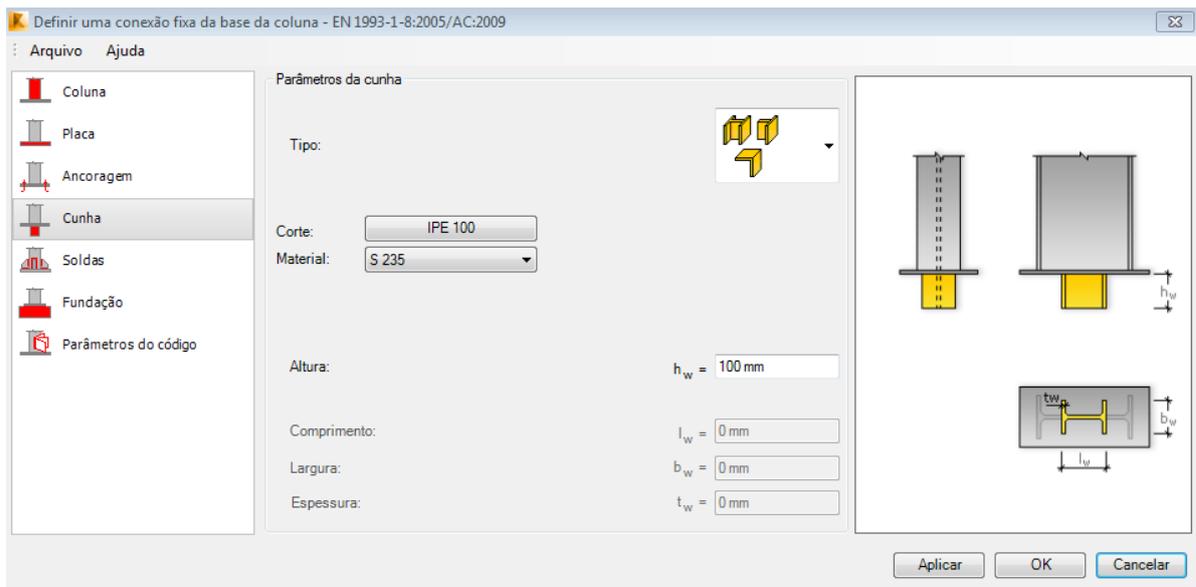


Figura 85:Subjanela referente às características da cunha

Seguidamente aparece a janela referente às características das soldas, onde se pode definir as espessuras dos cordões de soldadura (ver fig.86).

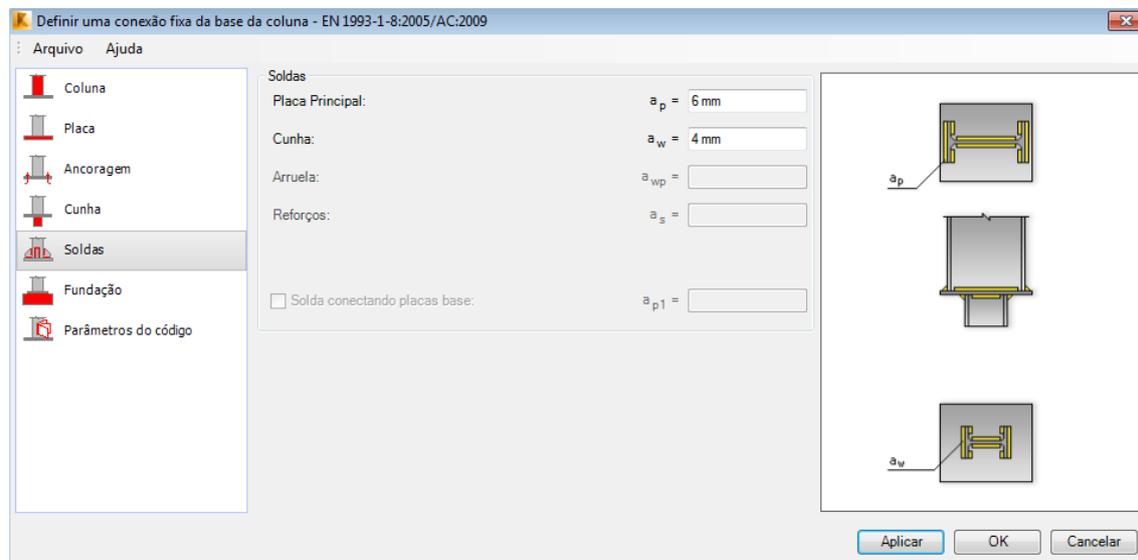


Figura 86:Subjanela referente às características das soldas

Continuando a análise vem a subjanela referente às características da fundação, onde é possível determinar as suas dimensões, o tipo de betão a utilizar e a espessura da camada de grout (ver fig.87).

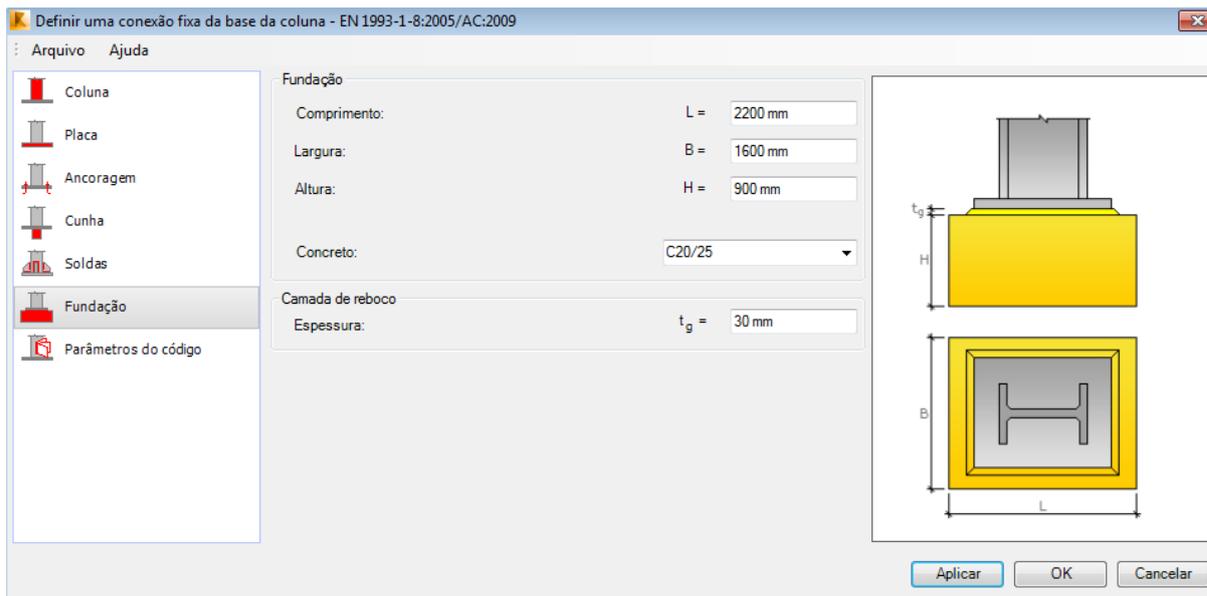


Figura 87:Subjanela referente às características das soldas

Por último surge a subjanela que aborda os parâmetros de cálculo da ligação. Aqui é definido se é considerada uma estrutura com ou sem oscilações, o factor de redução da resistência dos parafusos de ancoragem, se o betão é considerado com ou sem rachaduras e por último a força característica e o coeficiente de atrito da camada de grout, como se pode verificar na figura 88.

Em todas as análises efectuadas foram consideradas estruturas com oscilações, com um factor de redução da resistência dos parafusos de ancoragem de 0.85, com betão com rachaduras e com grout com uma força característica e coeficiente de atrito de 12.00 MN/m^2 e 0.30, respectivamente.

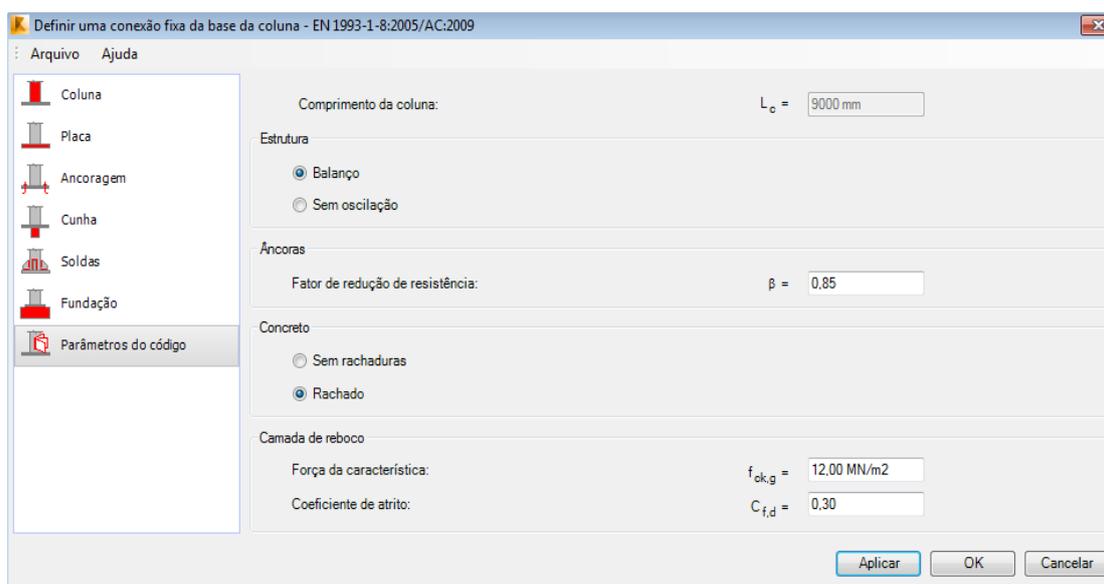


Figura 88:Subjanela referente aos parâmetros de cálculo da ligação

Depois de determinadas todas as características da ligação, é necessário proceder ao seu cálculo para verificar se esta é ou não válida.

Para efectuar o cálculo da ligação é necessário seleccionar o comando “Projecto de ligação metálica”, presente na barra de ferramentas evidenciada na figura 89.

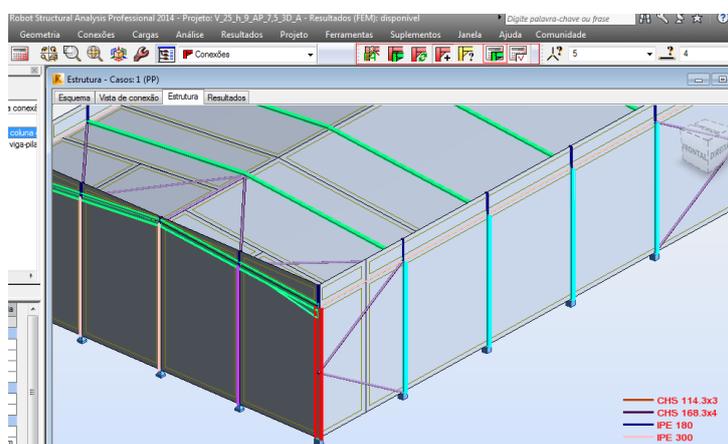


Figura 89: Comando para a realização do cálculo da ligação

Como resultado do cálculo da ligação surge um documento com toda a informação acerca da análise efectuada à ligação (ver fig.90). Neste documento vem a geometria de toda a ligação, todas as cargas actuantes e resistentes, a capacidade da ligação que está a ser utilizada, o componente mais fraco da ligação e a verificação se a ligação está em conformidade com as normas em vigor.

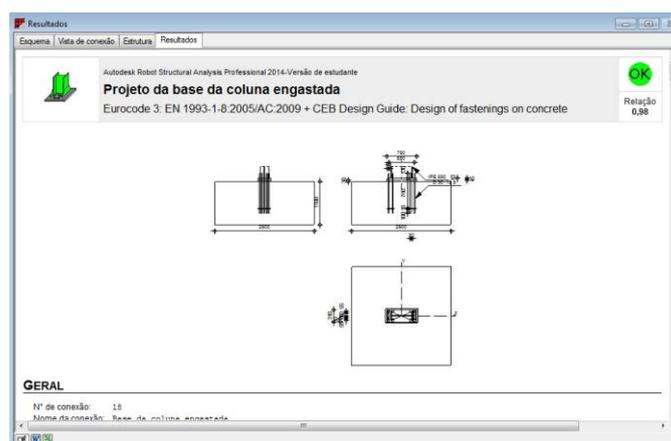


Figura 90: Documento com toda a informação acerca da análise da ligação

Como exemplo vem a ligação do edifício com um vão de 25 metros, uma altura de pilar de 9 metros e um afastamento entre pórticos de 7,5 metros. Observando a parte

final do documento resultante da análise de uma ligação fundação-pilar, verifica-se que o componente mais fraco da ligação é a chapa de base à flexão, que a ligação está em conformidade com as normas e que 98% da capacidade da ligação está a ser utilizada (ver fig.91).

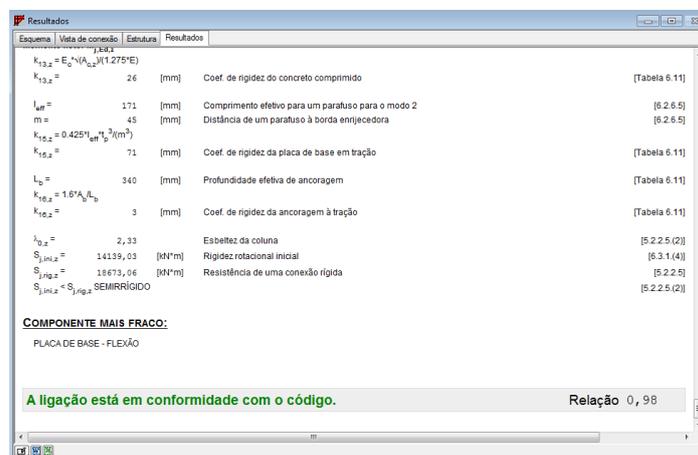


Figura 91: Parte final do documento com os dados acerca de uma ligação do edifício com 25 metros de vão, 9 metros de altura de pilar e 7,5 metros de afastamento entre pórticos

Depois de correctamente dimensionada uma ligação é necessário analisar também todas as restantes e para facilitar este processo é possível copiar todas as características de uma ligação para outras semelhantes. Esta operação é possível recorrendo ao comando “Cópia de ligação”, presente na barra de ferramentas da figura 92.



Figura 92: Barra de ferramentas com o comando "Cópia de ligação"

Para tal, posteriormente ao dimensionamento da primeira ligação, procede-se à selecção de todas as barras para as quais é pretendido copiar a ligação. Depois deste passo, selecciona-se então o comando “cópia de ligação”, e a ligação é então copiada para todas as barras seleccionadas.

Depois de todas as ligações definidas, verifica-se qual a mais solicitada, analisando-a e tornando-a a ligação mais otimizada possível. Depois de analisada, sabe-se que se tais características são válidas para a solução mais critica, então também serão válidas

para os restantes casos, procedendo-se então à cópia das características da ligação mais solicitada para as restantes.

6.3.1.2.Ligações pilar-travessa

Tal como na ligação fundação-pilar, para se efectuar uma ligação pilar-travessa é necessário seleccionar, na estrutura, um pilar e uma travessa do mesmo pórtico (ver fig.93) e posteriormente selecciona-se o comando “Nova ligação para as barras seleccionadas”, presente na barra de ferramentas ilustrada na figura 81.

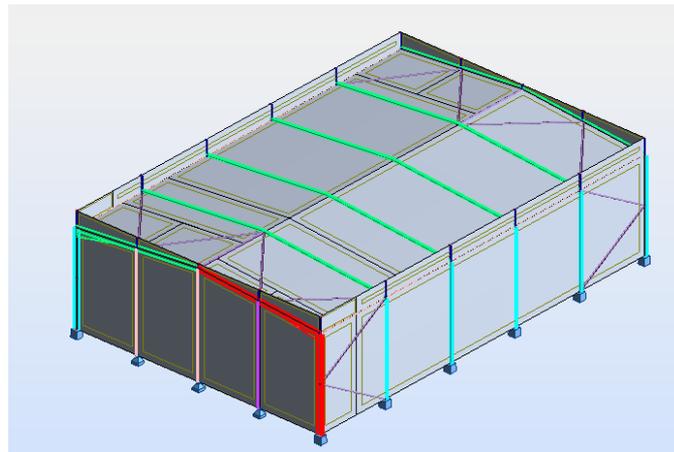


Figura 93:Pilar e travessa do mesmo pórtico seleccionados

Depois de seleccionada a opção referida anteriormente, tal como na ligação anterior, surge uma janela que permite verificar e atribuir todas as características da ligação (ver fig.94). Dentro desta janela, encontram-se novamente 7 subjanelas, com as características da geometria da ligação, da placa de base, dos suportes da travessa, dos parafusos, dos reforços do pilar e travessa, das soldas e dos parâmetros de cálculo.

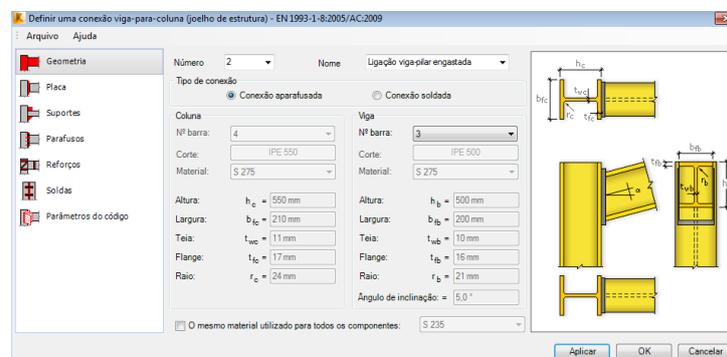


Figura 94:Janela de atribuição das características da ligação pilar-travessa

Como se pode verificar na figura 94, na subjanela referente às características da geometria da ligação, é possível visualizar as características geométricas do pilar e da travessa, o material que os constituem, bem como a inclinação das travessas, que é, em todos os edifícios estudados, de 5°.

De seguida vem a subjanela referente às características da placa de base. Aqui é possível atribuir as características geométricas da placa de base e o material que a constitui, como se pode verificar na figura 95.

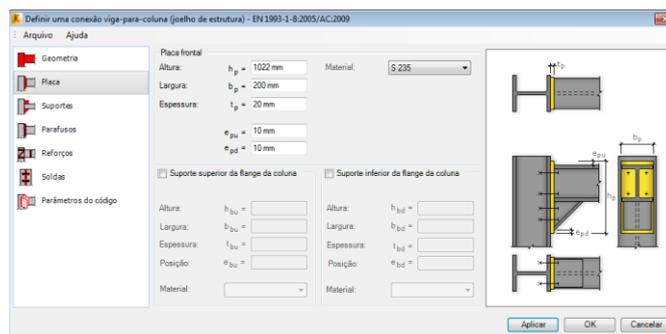


Figura 95:Subjanela referente às características geométricas da placa de base

Seguidamente surge a subjanela referente aos suportes da travessa, onde se pode definir o tipo de suportes a utilizar, as características geométricas destes e o seu material (ver fig.96).

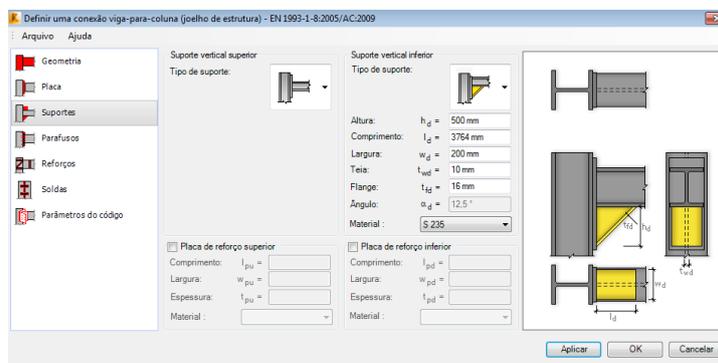


Figura 96:Subjanela referente aos suportes da travessa

A próxima subjanela refere-se aos parafusos da ligação. Aqui pode-se definir o tipo, o número e a disposição dos parafusos a utilizar (ver fig.97).

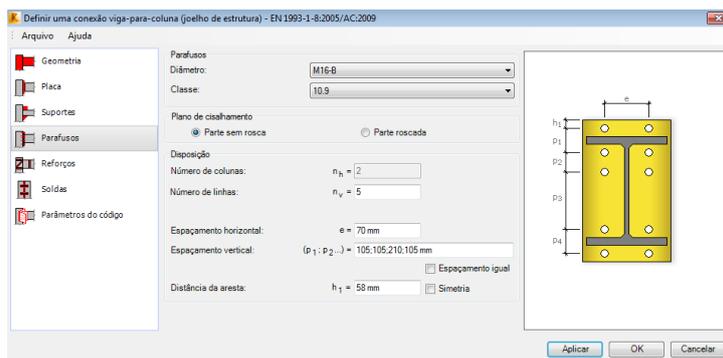


Figura 97:Subjanela referente às características dos parafusos

Seguidamente vem a subjanela referente aos reforços dos pilares e das travessas, onde se pode definir o tipo de reforços pretendidos, as suas dimensões e o material que os constituem (ver fig.98).

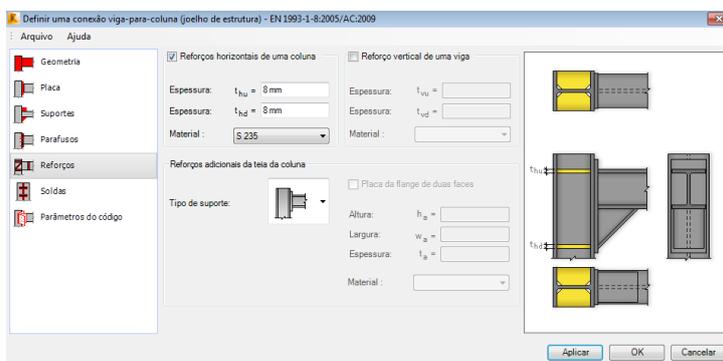


Figura 98:Subjanela referente aos reforços dos pilares e das travessas

Continuando a análise vem a subjanela referente às características das soldas, onde é possível determinar as espessuras efectivas de todos os cordões de soldadura utilizados na ligação (ver fig.99).

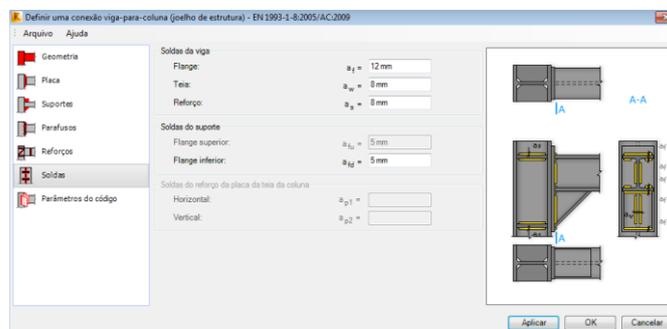


Figura 99:Subjanela referente às características das soldas

Por último surge a subjanela que aborda os parâmetros de cálculo da ligação. Aqui são definidos os tipos de análise global da estrutura e os parâmetros de cálculo da rigidez da ligação, como se pode verificar na figura 100.

Em todos os estudos foram efectuadas análises elásticas da estrutura e, para efeitos de cálculo da rigidez da ligação, todas as estruturas são do tipo com contraventamento.

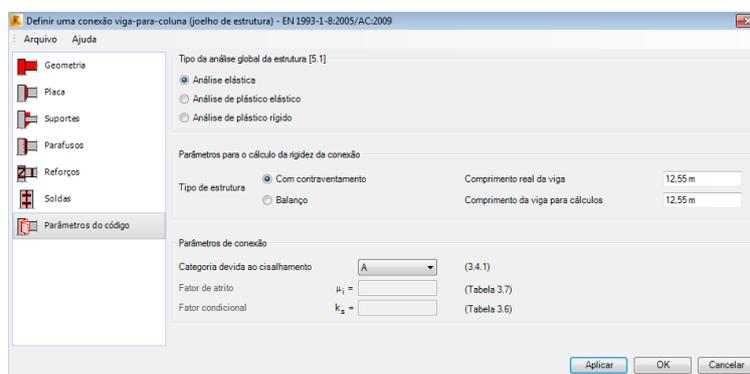


Figura 100:Subjanela que permite definir os parâmetros de cálculo da ligação

Tal como na ligação fundação-pilar, depois de determinadas todas as características da ligação, é necessário proceder ao seu cálculo para verificar se esta é ou não válida.

Para efectuar o cálculo da ligação é necessário seleccionar o comando “Projecto de ligação metálica”, presente na barra de ferramentas evidenciada na figura 89.

O restante processo de determinação das características finais da ligação será igual ao utilizado na ligação fundação-pilar. Assim, como resultado do cálculo da ligação surge um documento com a informação da geometria da ligação, das cargas actuantes e resistentes, do componente mais fraco da ligação, da capacidade da ligação que está a ser utilizada e da verificação se a ligação está em conformidade com as normas em vigor.

De seguida a ligação é copiada para todas as outras ligações semelhantes e verifica-se qual delas é a mais solicitada. Esta é analisada e otimizada através de um processo iterativo, modificando as suas características até se conseguir uma ligação económica e de fácil execução. Depois de ser obtida uma solução para a ligação mais solicitada, esta é copiada para todas as outras ligações.

6.3.1.3. Ligações travessa-travessa

Nas ligações travessa-travessa, para se definir uma ligação, não é seguido o mesmo processo que nas duas ligações anteriores. Isto acontece porque o software apresenta um erro que não permite realizar a análise directamente a partir do modelo, sendo necessário realizar uma análise manual.

Nesta análise, como é manual, implica que os valores das acções actuantes na ligação sejam atribuídos manualmente e para tal é necessário descobrir qual a ligação mais solicitada do tipo travessa-travessa.

Para este tipo de ligações sabe-se que a acção condicionante é o momento flector nela presente, logo considera-se a ligação mais solicitada aquela que apresenta um maior momento flector.

Com vista a descobrir qual a ligação mais solicitada foi realizada uma análise detalhada de todas as barras constituintes deste tipo de ligações, recorrendo ao comando “Análise detalhada” do menu “Resultados” (ver fig.101).

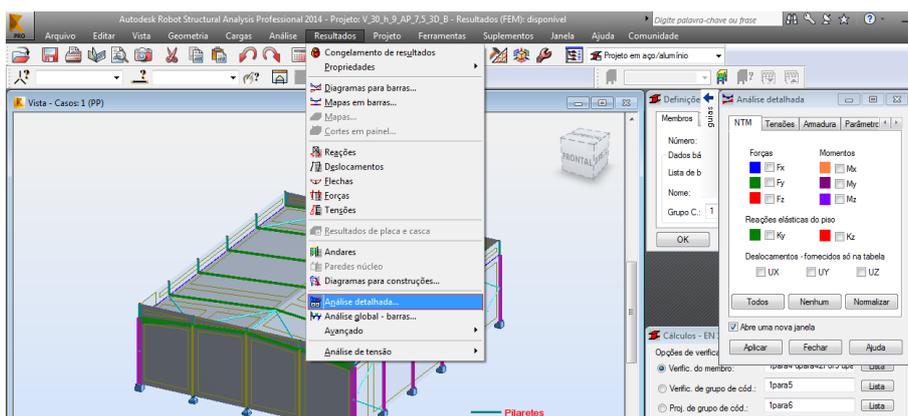


Figura 101: Comando "Análise detalhada" do menu "Resultados"

Depois de seleccionada a opção “Análise detalhada”, surge uma janela para seleccionar a acção que irá ser analisada, sendo neste caso o momento flector no eixo de maior inércia, isto é, o M_y , como se pode verificar na figura 102. Depois de escolhida a acção a analisar, surge uma representação gráfica da barra, um diagrama de momentos flectores e um quadro com os valores destes mesmos momentos ao longo das barras. No entanto, os valores relevantes para a análise são os dos momentos flectores nos nós de ligação de cada barra.

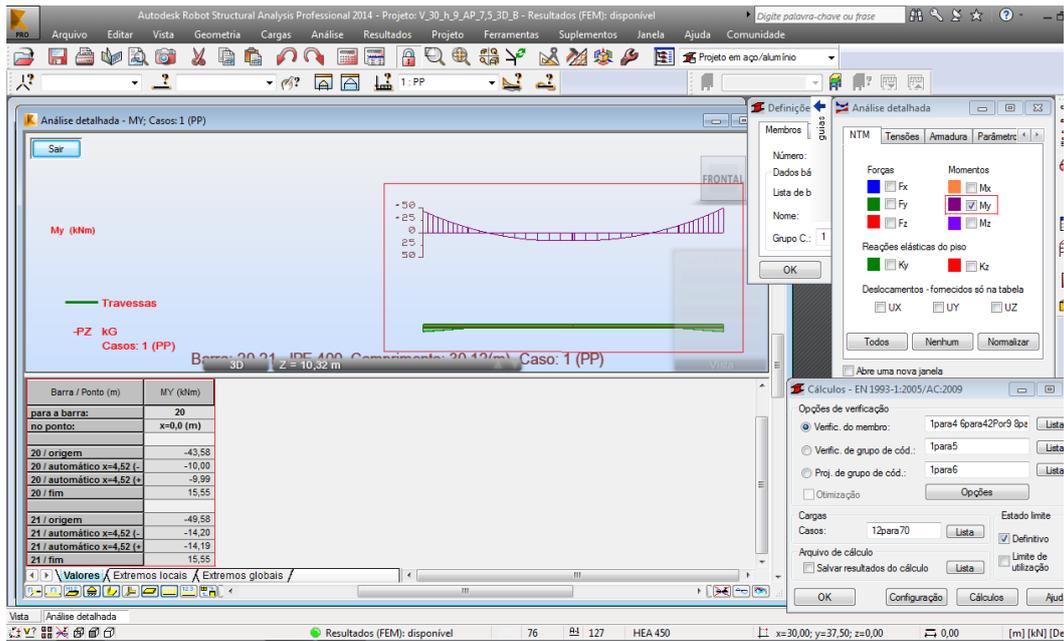


Figura 102: Análise detalhada de duas travessas

Depois de realizada esta análise para todas as ligações verifica-se qual delas é a mais solicitada, sendo depois essa a ligação dimensionada.

Para dimensionar esta ligação, como primeiro passo, vem a definição das características desta, recorrendo ao comando “Define uma ligação viga-viga” da barra de ferramentas ilustrada na figura 103.



Figura 103: Comando "Define uma ligação viga-viga"

Depois da selecção do comando anterior, surge uma janela, com 6 subjanelas, que permitem definir as características da ligação (ver fig.104).

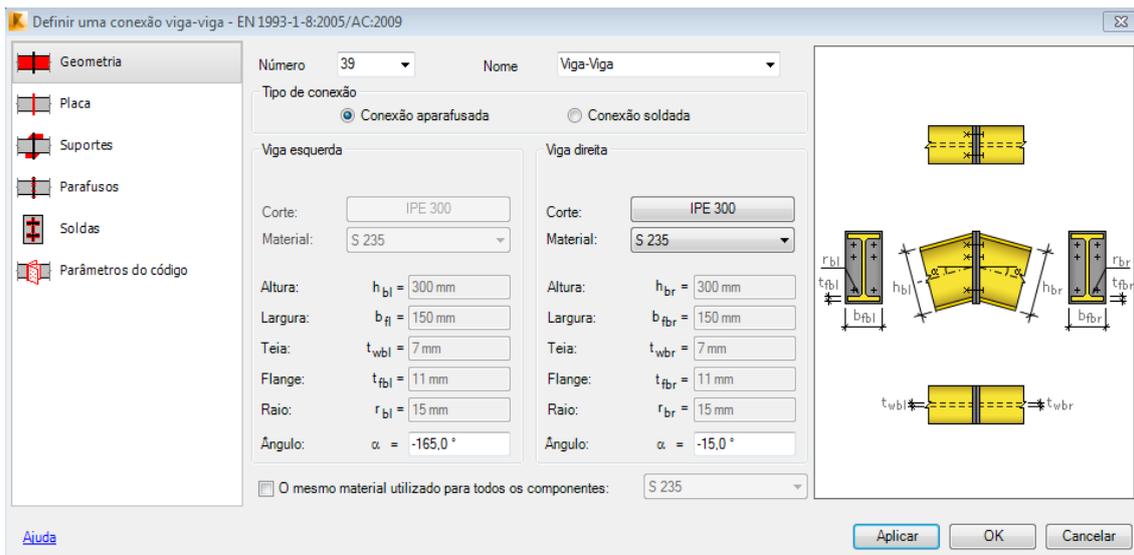


Figura 104: Janela de definição das características da ligação

Como primeira subjanela vem aquela que permite definir as características geométricas da ligação, nomeadamente, os perfis das travessas, a sua inclinação e o seu material, tal como demonstra a figura 104.

A próxima subjanela permite definir as características geométricas das placas e o material que as constituem (ver fig.105).

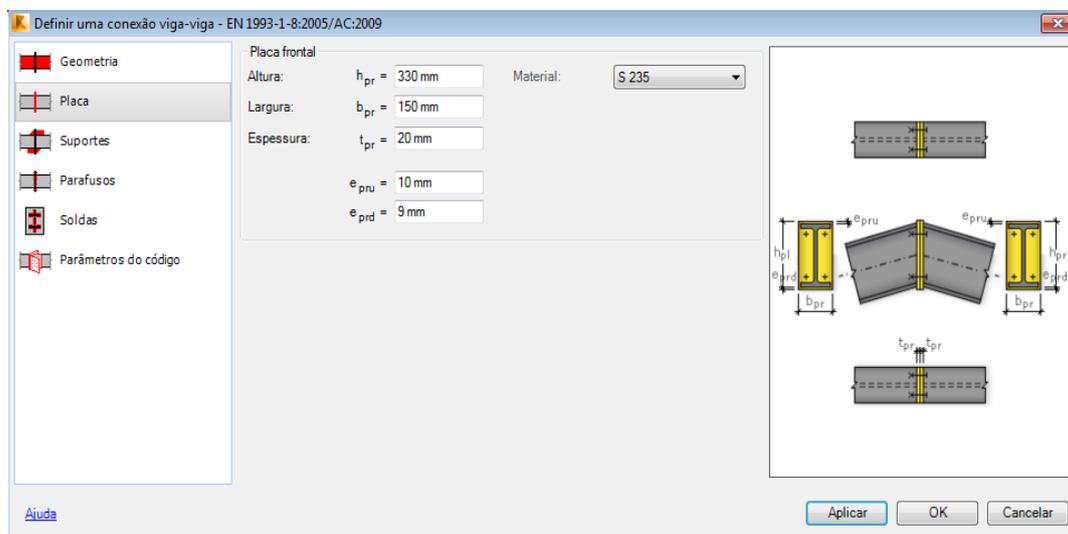


Figura 105: Subjanela referente às características da placa

Seguidamente surge a subjanela que permite definir os suportes que as travessas irão ter e as características geométricas dos mesmos (ver fig.106).

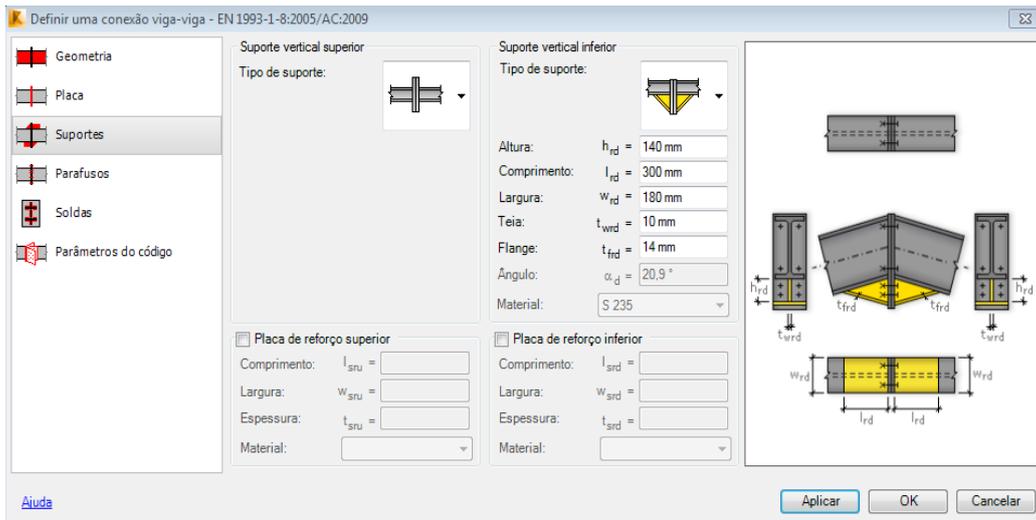


Figura 106:Subjanela referente às características dos suportes das travessas

A próxima subjanela refere-se aos parafusos, sendo aqui definidos o diâmetro dos parafusos, a sua classe e o número e disposição dos mesmos (ver fig.107).

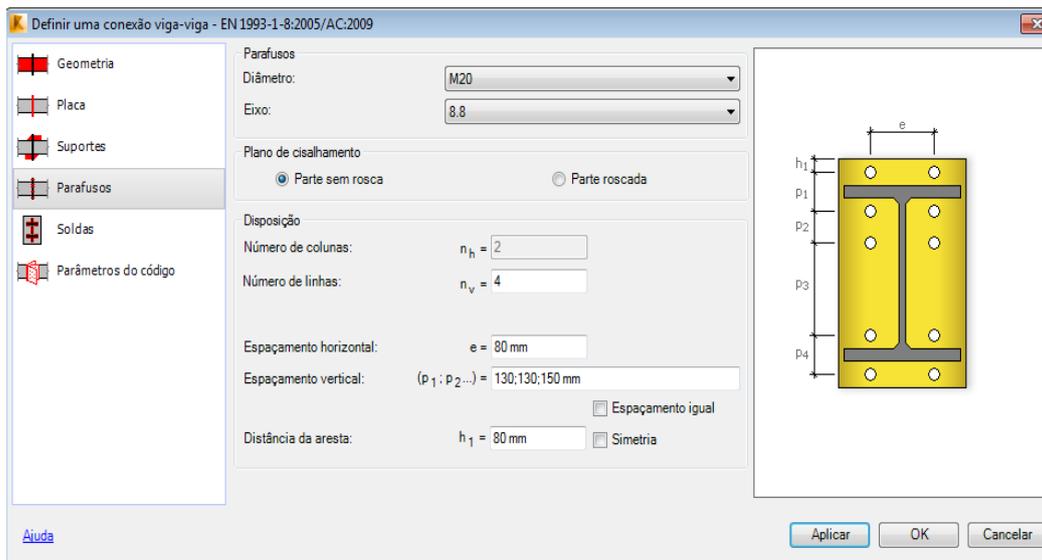


Figura 107:Subjanela referente aos parafusos

Como próximo passo vem a definição das espessuras efectivas de todos os cordões de soldadura presentes nesta ligação, tal como se verifica na figura 108.

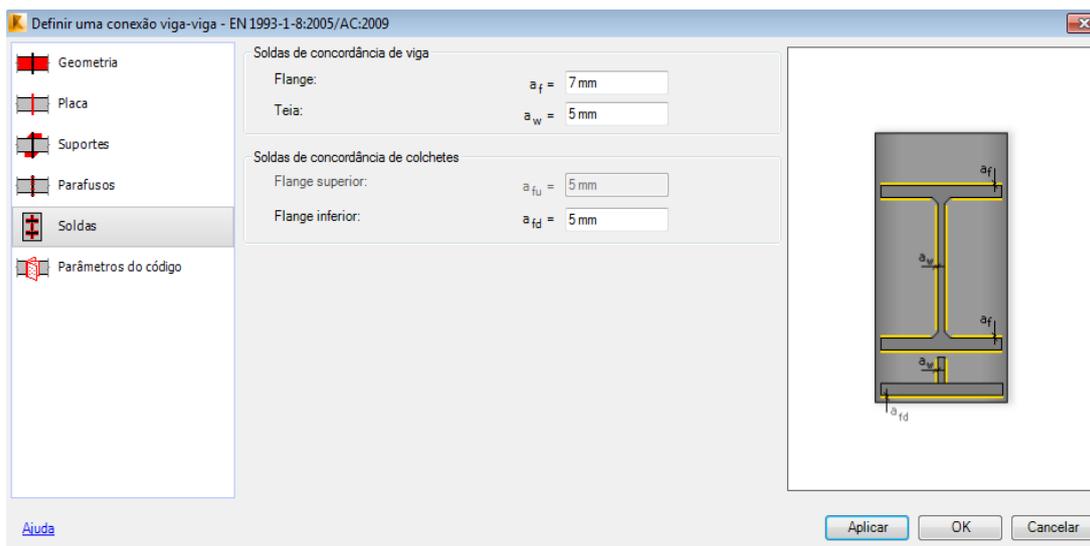


Figura 108: Definição das espessuras efectivas dos cordões de soldadura

Por último surge a sub janela referente aos parâmetros de cálculo utilizados nesta análise, nomeadamente, o tipo de análise global da estrutura e os parâmetros para o cálculo da rigidez da ligação (ver figura 109).

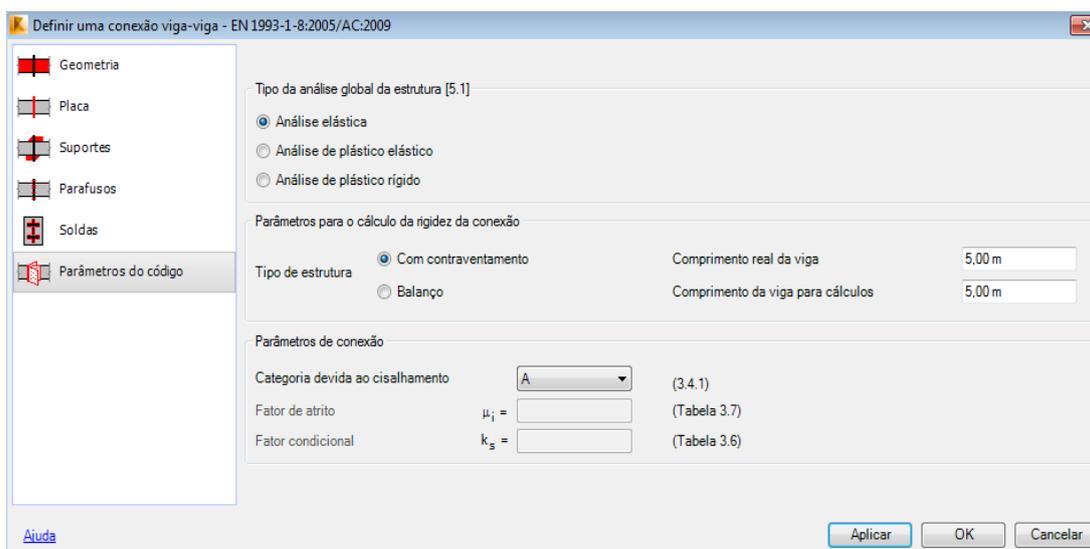


Figura 109: Subjanela referente aos parâmetros de cálculo

Em todos os casos, o tipo de análise global da estrutura utilizada foi a análise elástica e para os parâmetros de cálculo da rigidez das ligações foi considerado que as estruturas em análise eram do tipo com contraventamento.

Depois de definida toda a ligação, terá que ser realizada uma análise manual, recorrendo ao comando “Verificação manual da ligação”, presente na barra de ferramentas ilustrada na figura 110.



Figura 110: Comando "Verificação Manual da ligação"

Posteriormente à selecção deste comando surge uma janela que permite introduzir os valores das cargas actuantes na ligação (ver fig.111), nomeadamente, o momento flector, a força de corte e a força axial. Estes valores são todos obtidos a partir da análise detalhada das barras constituintes das ligações.

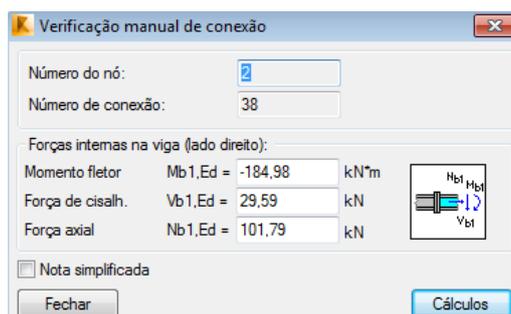


Figura 111: Introdução das cargas actuantes na ligação

De seguida procede-se ao cálculo da ligação, e tal como nas ligações anteriores, obtém-se também um documento com a informação da geometria da ligação, das cargas actuantes e resistentes, do componente mais fraco da ligação, da capacidade da ligação que está a ser utilizada e da verificação da conformidade da ligação em relação às normas em vigor.

Depois de analisada e optimizada a ligação, esta é copiada para todas as outras ligações semelhantes.

7.Resultados

Como resultado final deste projecto resulta um estudo de 57 edifícios diferentes para as zonas A e B de vento e uma análise das três principais ligações para os edifícios de maior dimensão dentro de cada vão, isto para a zona B de vento.

7.1.Resultados da Análise estrutural dos edifícios

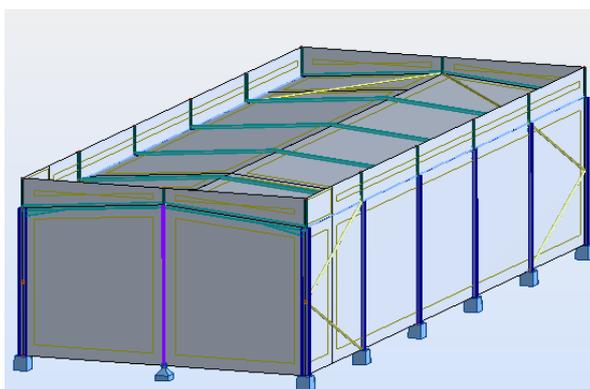
Como resultado da análise estrutural dos edifícios foram criados dois documentos distintos, um com a análise estrutural de todos os edifícios, para as zonas A e B de vento, para 6 diferentes tipos de travamento e outro com uma compilação das soluções mais económicas de todos os edifícios estudados.

✓ Análise estrutural de todos os edifícios

O documento com a análise estrutural de todos os edifícios é constituído por uma memória descritiva do estudo, todos os dados e resultados finais do projecto e pelos anexos. A memória descritiva é constituída por informação acerca da classe de execução dos edifícios, do tempo de vida útil, do esquema estrutural dos edifícios, da análise estrutural realizada, das acções que actuam nas estruturas e por último, dos regulamentos utilizados na análise.

De seguida vem todos os dados iniciais e resultados finais das análises realizadas a todos os edifícios.

A análise de cada edifício começa sempre com uma imagem ilustrativa do mesmo, seguido de um quadro com todas as características geométricas relevantes de cada edifício, tal como demonstra a figura 112.



| Parâmetros geométricos do modelo | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|----------------|------------|-----------------|------------|
| Vão[m] | Af. Pórticos[m] | Af. Empenas[m] | h pilar[m] | h platibanda[m] | h total[m] |
| 10 | 5 | 5 | 5 | 1 | 6 |

Figura 112:Imagem ilustrativa do edifício e suas características

Depois de toda a informação acerca do edifício que irá ser estudado surgem todas as acções actuantes na estrutura, como podemos verificar no exemplo de um edifício ilustrado na figura 113.

| | Acções nos pórticos exteriores[kN/m] | Acções nos pórticos interiores[kN/m] |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Peso próprio | 1 | 2 |
| Revestimentos | 0,5 | 1 |
| RCP | 0,25 | 0,5 |
| Sobrecarga | 0,75 | 1,5 |

-Imperfeições:0,27kN

| Acção do vento | | |
|----------------|---|---|
| | Vento na direcção x+ [kN/m ²] | Vento na direcção y+ [kN/m ²] |
| W _D | 1,02 | 1,02 |
| W _E | -0,19 | -0,19 |
| W _A | -0,84 | -0,84 |
| W _B | -0,46 | -0,46 |
| W _F | -1,3 | -1,21 |
| W _G | -0,84 | -0,93 |
| W _H | -0,28 | -0,38 |
| W _J | -0,28 | - |
| W _I | -0,28 | -0,28 |

Figura 113:Acções actuantes na estrutura

Depois de toda a informação acerca dos edifícios e das forças actuantes nestes vêm os resultados finais.

Como resultado final surge uma tabela com informação acerca dos perfis de cada elemento estrutural e dos deslocamentos máximos verificados em cada estrutura, isto para cada um dos seis tipos de travamentos estudados, ver tabela 22.

Tabela 22:Exemplo dos resultados finais de um edifício

| Resultados finais com diferentes travamentos | |
|--|--|
| <p>0</p> <p>Pilares: IPE 240-0,87 Travessas: IPE 180-0,91 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1,4\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(8 travamentos por pórtico)</p> | <p>3</p> <p>Pilares: IPE 240-0,93 Travessas: IPE 200-0,66 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1,4\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(4 travamentos por pórtico)</p> |
| <p>1</p> <p>Pilares: IPE 240-0,97 Travessas: IPE 180-0,91 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1,4\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(6 travamentos por pórtico)</p> | <p>4</p> <p>Pilares: IPE 270-0,80 Travessas: IPE 200-0,69 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,4\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(2 travamentos por pórtico)</p> |
| <p>2</p> <p>Pilares: IPE 240-0,84 Travessas: IPE 200-0,66 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,6\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1,2\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(6 travamentos por pórtico)</p> | <p>5</p> <p>Pilares: IPE 270-0,80 Travessas: IPE 200-0,89 Cor: CHS 76,1X2,5-0,48 Contrav : CHS 114,3X3-0,39 Empenas: IPE 160-0,87 Pilaretes: IPE 100-0,86</p> <p>$U_x=0,4\text{cm}$ (máx=3,3cm) $U_y=1\text{cm}$ (máx=4cm)</p> <p>(sem travamentos)</p> |

Através dos resultados finais de cada edifício pode-se verificar que perfis são necessários para cada um dos diferentes travamentos, a solicitação de cada grupo estrutural para a sua situação mais crítica, a deformação nodal máxima nas direcções x e y e por último o número de travamentos efectuados em cada tipo de travamento.

Através da evolução dos perfis ao longo dos diferentes tipos de travamento é possível verificar qual a situação em que é possível ter os perfis mais ligeiros e o menor número de travamentos, sendo esta considerada a situação mais benéfica para todos os edifícios e evidenciada com um fundo verde em todos os estudos, tal como se verifica no exemplo da tabela 22.

A verificação dos deslocamentos verticais e horizontais máximos de cada estrutura foi efectuada com vista a garantir que estes valores não ultrapassavam os deslocamentos limite permitidos pelas normas em vigor.

Estes limites podem ser consultados na norma NP EN 1993-1-1, onde se verifica que o limite do deslocamento vertical é $L/250$, em que L representa o comprimento da viga, e que o limite do deslocamento horizontal é de $h/150$, em que h representa a altura da coluna [11].

Assim em todos os estudos é possível verificar os valores limite e os valores de deslocamento vertical e horizontal que se verificam em cada edifício e em cada tipo de travamento diferente, como se verifica na tabela 22.

Por último, nos resultados finais, também é possível verificar o número de travamentos do banzo inferior, das secções dos pilares e travessas, necessários em cada tipologia de travamento e em cada edifício. Esta informação é muito importante pois quanto maior o número de travamentos, maior é a complexidade de execução da obra, isto porque temos um maior número de soldaduras em obra.

✓ **Compilação das soluções mais vantajosas em todos os edifícios**

Como um dos objectivos finais deste projecto consistia em criar um documento de fácil leitura dos resultados finais, para ser usado pelo departamento de orçamentação da empresa, surge a necessidade de compilar toda a informação relevante deste estudo em duas tabelas, uma para o estudo dos edifícios na zona A de vento e outra para o estudo na zona B.

Nestas tabelas apenas se pode verificar as situações mais benéficas para cada edifício, pois à partida esta será a solução a adoptar. Para cada edifício é possível verificar as suas características geométricas, os perfis dos diferentes elementos estruturais, o tipo de travamento, o número de travamentos por pórtico e uma imagem de cada edifício, tal como demonstra a figura 114.

| Vãos | m | Pórticos | Empensas | h pilar(m) | platabanda(m) | total(m) | Pilares | | | | Travessas | | Ornamento | Contrav. | Pilaretes | Madres | | Tipo de contravento | * trav./pórtico | representação gráfica |
|------|------|-----------|----------|------------|---------------|----------|---------|----------|-----------------|----------|---------------------|-----------------|-----------|-------------|-------------|--------|----|---------------------|-----------------|-----------------------|
| | | | | | | | Pórtico | Empensas | Travessa (s=8%) | Reforços | Cobertura (s=1,75m) | Fachada (s=15m) | | | | | | | | |
| 10 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 6,00 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 200 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 5 | 0 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 300 | IFE 200 | IFE 200 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 2 | 8 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 6,00 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 200 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 8 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 330 | IFE 200 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| 12 | 5,00 | 6,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 300 | IFE 220 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 360 | IFE 270 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 140 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 5,00 | 1,00 | 6,00 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 2 | 8 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 330 | IFE 220 | IFE 240 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 360 | IFE 270 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 9,00 | 1,00 | 10,00 | 10,00 | IFE 400 | IFE 270 | IFE 240 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 140 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| 15 | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 300 | IFE 180 | IFE 240 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 240 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 6 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 6,00 | 6,00 | IFE 300 | IFE 180 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 1 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 1,00 | 7,00 | 7,00 | IFE 330 | IFE 200 | IFE 270 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 1,00 | 8,50 | 8,50 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 270 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 120 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 6 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 9,00 | 1,00 | 10,00 | 10,00 | IFE 450 | IFE 270 | IFE 240 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 140 | 2240x65x2,5 | 2250x70x2,5 | 3 | 6 | | | |
| 20 | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 330 | IFE 220 | IFE 270 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 160 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 0 | 16 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 270 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 160 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 12 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 330 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 4 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 5,00 | 1,50 | 6,50 | 6,50 | IFE 360 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 160 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 2 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 160 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 2 | 12 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 6 | | | |
| 24 | 7,50 | 6,88x6,67 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 400 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 12 | | | |
| | 7,50 | 6,88x6,67 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 500 | IFE 270 | IFE 330 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |
| | 7,50 | 6,88x6,67 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 550 | IFE 300 | IFE 330 | 0,30 | CHS 114.3x3 | CHS 168.3x4 | IFE 200 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 6 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 360 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 76.1x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 14 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 400 | IFE 270 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 0 | 20 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 360 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |
| 24 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 400 | IFE 220 | IFE 330 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 450 | IFE 270 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 14 | | | |
| | 6,00 | 6,00 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 330 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 220 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |
| | 7,50 | 6,00 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 450 | IFE 220 | IFE 330 | 0,30 | CHS 114.3x3 | CHS 168.3x4 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 14 | | | |
| | 7,50 | 6,00 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 500 | IFE 270 | IFE 360 | 0,30 | CHS 114.3x3 | CHS 168.3x4 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 2 | 14 | | | |
| | 7,50 | 6,00 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 550 | IFE 300 | IFE 360 | 0,30 | CHS 114.3x3 | CHS 168.3x4 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |
| 24 | 5,00 | 6,25 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 350 | IFE 240 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 16 | | | |
| | 5,00 | 6,25 | 6,00 | 1,50 | 7,50 | 7,50 | IFE 350 | IFE 240 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 1 | 16 | | | |
| | 5,00 | 6,25 | 7,50 | 1,50 | 9,00 | 9,00 | IFE 400 | IFE 270 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 0 | 22 | | | |
| | 5,00 | 6,25 | 9,00 | 1,50 | 10,50 | 10,50 | IFE 500 | IFE 330 | IFE 400 | 0,30 | CHS 88.9x2,5 | CHS 114.3x3 | IFE 180 | 2270x75x2,5 | 2300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |

Figura 114:Parte da tabela dos resultados finais para a zona B de vento

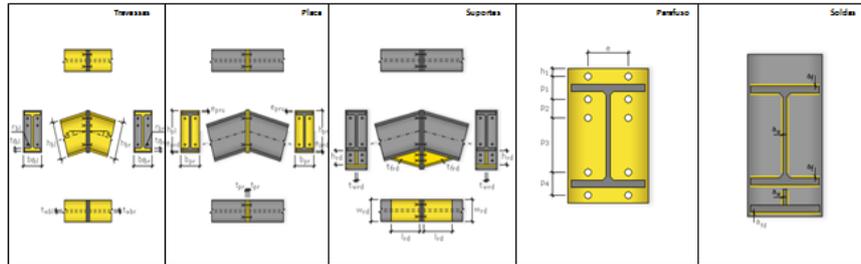
Estas duas tabelas encontram-se para consulta no anexo E.

7.2.Resultados do Estudo das Ligações

Como resultado do estudo das ligações surge um documento com toda a informação acerca de todas elas. Este documento foi dividido em três tabelas, uma para cada tipo de ligação estudada. A tabela referente à ligação Fundação-Pilar contém informação acerca das características geométricas do pilar e da placa de base, do tipo de parafusos de ancoragem e sua disposição, da espessura efectiva de todas as soldas, das características geométricas e técnicas das fundações e por último contém uma pequena ilustração de cada ligação (ver fig.115).

travessas presentes na ligação, o tipo de parafusos e a sua disposição, a espessura efectiva dos cordões de soldadura e por último a ilustração de cada ligação (ver fig.117).

Ligação Travessa-Travessa



| Edifício | Travessas | | | | Placa | | | | Suportes | | | | Parafusos | | | | Soldas | | | apresentação da ligação | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------|-----|----|-----|-------|-----|-----|----|----------|----|-----|-----|-----------|-----|------|----------|--------|----|--------|-------------------------|-------------|----|--------|--------|---|------------|----|----|----|-----|--|--|--|--|--|
| | hbr | hfb | wb | tfb | hbr | hfb | tp | pr | pr | pr | krd | lrd | wrd | trd | tfre | Diametro | Classe | de | linhas | | horizont | de | linhas | vertic | e | (p1;p2...) | h1 | af | aw | afd | | | | | |
| V_10_h_7.5_AP_ | ## | 110 | 6 | 3 | 12 | ## | 110 | 10 | 10 | 3 | | | | | | M16 | 8.8 | 2 | 2 | 60 | 120 | 60 | 7 | 5 | | | | | | | | | | | |
| V_12_h_7.5_AP_ | ## | 120 | 6 | 10 | 15 | ## | 120 | 15 | 10 | 3 | | | | | | M16 | 8.8 | 2 | 2 | 70 | 140 | 60 | 7 | 5 | | | | | | | | | | | |
| V_15_h_7.5_AP_ | 270 | 135 | 7 | 10 | 15 | 431 | 135 | 10 | 10 | 10 | 140 | ## | 135 | 7 | 12 | M20 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 85;85;130 | 60 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |
| V_20_h_9_AP_ | ## | 160 | 8 | 12 | 18 | ## | 160 | 12 | 10 | 12 | 140 | ## | 160 | 8 | 12 | M20 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 115;115;130 | 60 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |
| V_24_h_9_AP_ | ## | 170 | 8 | 13 | 18 | 521 | 170 | 12 | 10 | 10 | 140 | ## | 170 | 8 | 14 | M20 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 130;130;130 | 60 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |
| V_25_h_9_AP_ | ## | 170 | 8 | 13 | 18 | 521 | 170 | 12 | 10 | 10 | 140 | ## | 170 | 8 | 14 | M20 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 130;130;130 | 60 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |
| V_30_h_9_AP_ | ## | 180 | 3 | 14 | 21 | 562 | 180 | 12 | 10 | 10 | 140 | ## | 180 | 10 | 14 | M20 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 130;130;150 | 80 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |
| V_35_h_9_AP_ | 450 | 190 | 3 | 15 | 21 | 612 | 190 | 15 | 10 | 10 | 140 | ## | 190 | 10 | 16 | M24 | 8.8 | 2 | 4 | 80 | 150;150;155 | 85 | 7 | 5 | 5 | | | | | | | | | | |

Figura 117:Tabela referente às ligações Travessa-Travessa

Através destes três quadros é possível saber todas as características das ligações estudadas, sabendo assim que tipo de ligação terá cada edifício. Embora só estejam representadas as ligações dos maiores edifícios de cada vão, a partir destas podemos ter uma pequena noção das características dos edifícios mais pequenos em cada vão, facilitando assim a execução de orçamentos.

Para um projecto mais completo teriam de ser estudadas as ligações de todos os edifícios, mas tal não foi possível porque esta era uma tarefa que levaria muito tempo a concluir, sendo muito difícil de terminar antes da data de final do projecto.

Estas três tabelas podem ser consultadas, de forma legível, no anexo F deste documento.

8. Discussão dos resultados

Como já foi referido anteriormente, este projecto teria como principal objectivo conseguir obter a solução mais económica para cada edifício, contudo este objectivo tornou-se impossível de concretizar, pois existem despesas muito difíceis de quantificar, tal como o preço do fabrico dos travamentos, o custo adicional de mão-de-obra necessária para sua montagem e o custo dos próprios processos de montagem. Para a quantificação dos custos referidos anteriormente seria necessário um outro projecto, pois estão envolvidos muitos parâmetros e de difícil quantificação de custo. Devido a estas dificuldades, definiu-se que a solução a adoptar seria aquela que tivesse os perfis mais ligeiros para as travessas e pilares, com o menor número de travamentos possível, visto que em princípio esta será uma das soluções mais económicas.

Através da análise dos perfis para os diferentes tipos de travamento verifica-se que quando o número de travamentos é aumentado nem sempre se diminui a dimensão dos perfis, ou seja, é possível identificar quando uma mudança de travamento é benéfica ou prejudicial para o projecto.

Na figura 118 pode verificar-se que alterando o tipo de travamento de 1 para 0, o número de travamentos por pórtico aumenta de 10 para 16, não havendo nenhuma alteração na dimensão dos perfis dos elementos estruturais, ou seja, esta alteração seria prejudicial para o projecto, pois o peso e complexidade da estrutura são aumentados.

| Resultados finais com diferentes travamentos | |
|--|---|
| <p>0</p> <p>Pilares: IPE 360-0,85 Travessas: IPE 240-0,80 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,8\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,8\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(16 travamentos por pórtico)</p> | <p>3</p> <p>Pilares: IPE 360-0,97 Travessas: IPE 240-0,97 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,8\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,8\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(6 travamentos por pórtico)</p> |
| <p>1</p> <p>Pilares: IPE 360-0,97 Travessas: IPE 240-0,80 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,8\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,8\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(10 travamentos por pórtico)</p> | <p>4</p> <p>Pilares: IPE 400-0,88 Travessas: IPE 240-0,99 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,7\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,5\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(4 travamentos por pórtico)</p> |
| <p>2</p> <p>Pilares: IPE 360-0,85 Travessas: IPE 240-0,80 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,8\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,8\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(10 travamentos por pórtico)</p> | <p>5</p> <p>Pilares: IPE 400-0,82 Travessas: IPE 240-0,71 Cor: CHS 88,9X2,5-0,62 Contrav : CHS 114,3X3,6-0,99 Empenas: IPE 220-0,88 Pilaretes: IPE 120-0,67</p> <p>$U_x=0,7\text{cm}$ (máx=5cm) $U_y=2,5\text{cm}$ (máx=6cm)</p> <p>(4 travamentos por pórtico)</p> |

Figura 118: Exemplo de uma alteração do tipo de travamento

Assim, são evidenciados com fundo verde todos os últimos casos antes da necessidade de alterar os perfis, sendo esta a solução considerada ótima para todos os edifícios (ver fig.118).

Através da análise dos resultados verifica-se que quando é aumentada a altura do edifício, na maior parte das vezes, o perfil do pilar também aumenta, e isto acontece porque à medida que aumenta a altura, aumentam também as pressões do vento e os comprimentos de encurvadura dos pilares. Com o aumento da altura dos pilares, os perfis das travessas aumentam, mas de uma forma menos evidente, pois estas apenas sofrem com o aumento dos valores das pressões do vento (ver fig.119).

Quando o vão dos edifícios é aumentado, normalmente o perfil das travessas também aumenta, isto porque também são aumentados os seus comprimentos de encurvadura e a área de influência cada uma delas. O aumento do comprimento do vão também influencia directamente os pilares, pois a área da cobertura aumenta, o que faz com que estes tenham que suportar mais carga (ver fig.119).

| Vãos[m] | jast | Pórtico[m] | jast | Empenas | h pilar[m] | platabanda[m] | total[m] | Pilares | | | | Travessas | | oroamento | Contrav. | Pilares | Madrões | | Tipo de contravento | trav.fpórtico | representação grã |
|---------|------|------------|------|---------|------------|---------------|----------|---------|---------|-----------------|----------|-----------------|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------------|-----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| | | | | | | | | Pórtico | Empenas | Travessa (a=82) | Reforços | Travessa (a=82) | Reforços | | | | Cobertura (a=175m) | Fachada (a=15m) | | | |
| 10 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 200 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 5 | 0 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 300 | IFE 200 | IFE 200 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 2 | 8 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 200 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 8 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 330 | IFE 200 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| 12 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 300 | IFE 220 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 360 | IFE 270 | IFE 220 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 2 | 8 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 330 | IFE 270 | IFE 240 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 400 | IFE 270 | IFE 240 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 4 | | | |
| 15 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 270 | IFE 180 | IFE 240 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 4 | 4 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 300 | IFE 200 | IFE 240 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 360 | IFE 240 | IFE 240 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 6 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 6,00 | 100 | 6,00 | IFE 300 | IFE 180 | IFE 220 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 1 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 100 | 7,00 | 100 | 7,00 | IFE 330 | IFE 200 | IFE 270 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 2 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 100 | 8,50 | 100 | 8,50 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 270 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 120 | Z240x65x2,5 | Z250x70x2,5 | 3 | 6 | | | |
| 20 | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 150 | 7,50 | 150 | 7,50 | IFE 330 | IFE 220 | IFE 270 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 0 | 16 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 7,50 | 150 | 9,00 | 150 | 9,00 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 270 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 1 | 12 | | | |
| | 5,00 | 5,00 | 9,00 | 150 | 10,50 | 150 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 330 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 4 | 4 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 6,00 | 150 | 7,50 | 150 | 7,50 | IFE 360 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 2 | 10 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 7,50 | 150 | 9,00 | 150 | 9,00 | IFE 400 | IFE 240 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 2 | 12 | | | |
| | 6,00 | 5,00 | 9,00 | 150 | 10,50 | 150 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 3 | 6 | | | |
| 24 | 7,50 | 6,62x6,67 | 6,00 | 150 | 7,50 | 150 | 7,50 | IFE 400 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 114,3x3 | CHS 168,3x3 | IFE 180 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 1 | 12 | | | |
| | 7,50 | 6,62x6,67 | 7,50 | 150 | 9,00 | 150 | 9,00 | IFE 500 | IFE 270 | IFE 330 | 0,30 | CHS 114,3x3 | CHS 168,3x3 | IFE 180 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 3 | 6 | | | |
| | 7,50 | 6,62x6,67 | 9,00 | 150 | 10,50 | 150 | 10,50 | IFE 550 | IFE 300 | IFE 330 | 0,30 | CHS 114,3x3 | CHS 168,3x3 | IFE 200 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 3 | 6 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 6,00 | 150 | 7,50 | 150 | 7,50 | IFE 360 | IFE 220 | IFE 300 | 0,30 | CHS 76,1x2,3 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 1 | 14 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 7,50 | 150 | 9,00 | 150 | 9,00 | IFE 400 | IFE 270 | IFE 300 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 0 | 20 | | | |
| | 5,00 | 6,00 | 9,00 | 150 | 10,50 | 150 | 10,50 | IFE 500 | IFE 300 | IFE 360 | 0,30 | CHS 88,3x2,5 | CHS 114,3x3 | IFE 150 | Z270x75x2,5 | Z300x80x3,0 | 3 | 8 | | | |

Figura 119:Parte da tabela de resultados finais

Quanto às ligações foram estudadas as do tipo Fundação-Pilar, Pilar-Travessa e Travessa-Travessa. Nas ligações Fundação-Pilar verifica-se que apenas a partir do edifício de vão 20m são necessárias 4 filas de parafusos na horizontal, até ai apenas eram necessárias 2 filas. Quanto ao número de parafusos na vertical, apenas são necessários 5 a partir do edifício de vão 24m, anteriormente eram necessários apenas 4.

Os parafusos utilizados são todos de classe 10.9 e são usados com diâmetro M24, M30 e M33. Os parafusos de diâmetro M24 são utilizados nos edifícios de vão 10 até ao

vão 15, os M30 são usados nos edifícios de vão 20m até 25m e os M33 nos edifícios de vão 30m e 35m.

Nas ligações do tipo Pilar-Travessa estudadas, existem apenas duas linhas parafusos na horizontal. O número de linhas de parafuso na vertical é 6 até ao edifício de vão 20m e de 8 a partir deste.

Os parafusos utilizados são de classe 6.8 e 8.8, os primeiros nos edifícios de vão 10m e 12m e os segundos nos restantes. Nos edifícios de vão 10m, 12m e 15m são usados parafusos de diâmetro M16, os parafusos de diâmetro M24 estão presentes nos edifícios de vãos 20m, 24m e 25m, e os de diâmetro M27 nos edifícios de vãos de 30m e 35m.

Por último, nas ligações Travessa-Travessa, em todos os edifícios existem apenas 2 linhas de parafusos na horizontal. Quanto ao número de linhas de parafusos na vertical, são utilizadas apenas duas linhas nos edifícios com um vão de 10m e 12m, nos restantes são utilizadas 4 linhas de parafusos.

Nesta tipologia de ligações apenas foram utilizados parafusos de classe 8.8 e com diâmetros M16, M20 e M24. Os parafusos com diâmetro M16 vem nos edifícios com vão de 10m e 12m, os M20 nos que têm um vão de 15m, 20m, 24m, 25m e 30m, e por último os M24 apenas foram utilizados no edifício com um vão de 35m.

Em algumas destas ligações foi necessário inserir uns reforços nas travessas, nomeadamente nos edifícios com vão superior a 12m.

A realização deste projecto permitiu perceber a importância dos travamentos e reforços neste tipo de edifícios, permitindo poupar muito material. Entre os mais importantes destes componentes estão os travamentos do banzo inferior das secções do pilar e da travessa e os reforços das travessas.

Os travamentos do banzo inferior dos pilares e travessas permitem diminuir o comprimento de encurvadura lateral destes elementos estruturais e com isto diminuir a dimensão dos perfis utilizados, como se pode verificar nos estudos realizados para os diferentes tipos de travamento.

O reforço das travessas, presentes em todos os pórticos de todos os edifícios, permitem reforçar a secção das travessas numa zona crítica do pórtico, com elevados momentos flectores, que é a zona de ligação entre o pilar e a travessa. Sem este pequeno reforço, seria necessário um perfil para as travessas com muito maiores dimensões do que os que se verificam nos estudos realizados.

Em todos os edifícios, os perfis utilizados para os pilares e travessas foram do tipo IPE, excepto nos três últimos com um vão de 35m. Nestes, quando o perfil IPE 600 não

era suficiente, foram usados perfis do tipo HEA. A diferença entre estas duas tipologias de perfis é que os HEA têm um momento de inércia elevado em relação aos dois eixos de rotação, enquanto os perfis IPE têm um momento de inércia elevado em relação a apenas um eixo de rotação.

Quanto aos deslocamentos nodais, depois da realização de todos estes estudos, verifica-se que o deslocamento nodal horizontal máximo ocorre no topo dos pilares e que o deslocamento nodal vertical máximo ocorre nas ligações entre as duas travessas. Os valores destes deslocamentos apenas ultrapassaram os valores estipulados nas normas em vigor, no edifício com um vão de 35m, uma altura de pilar de 9m e um afastamento entre pórticos de 7,5m, e quando não existe qualquer travamento do banzo inferior quer dos pilares, quer das travessas. Neste caso apenas o valor dos deslocamentos verticais foram ultrapassados, sendo necessário aumentar o perfil das travessas para diminuir o seu valor.

9. Conclusões

Com este projecto pode-se verificar todo o processo percorrido ao longo de todo este estudo, nomeadamente, toda a normalização consultada, acções que actuam na estrutura, os seus respectivos valores, todas as fases do estudo no Autodesk Robot Structural Analysis, todo o estudo das ligações, os resultados obtidos e a sua respectiva análise.

Uma das tarefas mais importantes e trabalhosas foi o estudo de toda a normalização afecta a este tipo de estruturas, pois nenhuma unidade curricular ligada à concepção de estruturas aprofunda esta temática.

O estudo estrutural de todos estes edifícios revelou-se uma tarefa muito morosa, pois para todos eles era necessário definir todas as acções que sobre ele actuavam, desenhá-los no software Autodesk Robot Structural Analysis, definir e caracterizar todos os elementos estruturais no software, e por último realizar as análises para os seis tipos de travamentos diferentes.

De todos os estudos efectuados verifica-se que os resultados obedecem a uma sequência lógica, isto é, quanto maior o edifício e menor número de travamentos, maiores serão os perfis dos elementos estruturais. Assim, quando a altura dos edifícios era aumentada, normalmente aumentavam os perfis dos pilares, devido ao aumento do comprimento de encurvadura destes e ao aumento das pressões do vento, que por vezes levava também ao aumento do perfil das travessas. Por sua vez, quando o vão dos edifícios aumenta, normalmente os elementos estruturais mais afectados são as travessas, pois o seu comprimento de encurvadura e área de influência aumentam, levando ao conseqüente aumento de perfil. Contudo não são apenas as travessas que são afectadas pelo aumento do comprimento do vão, porque o facto de a área de incidência do vento ser maior, leva a que a carga actuante na cobertura também aumente, e como consequência os pilares terão que suportar uma carga maior.

Neste documento fica também evidente todas as potencialidades do software utilizado para o cálculo estrutural deste tipo de estruturas. Neste têm que ser introduzidos todos os dados dos estudos, logo é necessário ter muita atenção porque qualquer erro nesta fase compromete todo o estudo posterior.

Com este estudo conclui-se que a realização deste tipo de projectos de estruturas requer conhecimento e muita atenção, pois é necessário saber quais as acções que nelas actuam, quantificá-las correctamente, saber onde aplicá-las, fazer a correcta definição de todos os elementos que influenciam o cálculo estrutural e por último saber analisar as

estruturas e fazer a correcta interpretação dos resultados obtidos, pois qualquer erro, por mais pequeno que seja, torna o estudo inválido, podendo levar a consequências desastrosas a nível financeiro, ao nível de perdas de vidas humanas e ao nível do tempo.

O facto deste projecto se incluir no âmbito de um estágio curricular torna-o mais enriquecedor, pois foi realizado em ambiente laboral, com o objectivo de criar algo útil e que acrescentasse valor á empresa, sendo que esta utilidade é muito importante pois traz uma maior motivação e responsabilidade à sua execução.

Incluído no projecto iria estar também o desenho de um edifício tipo, com todos os pormenores de construção, contudo não foi possível terminá-lo pois na empresa não tinha disponíveis licenças suficientes do programa de desenho, sendo possível trabalhar apenas quando algum colaborador se ausentava para férias, o que acabou por se revelar tempo insuficiente.

Todo o projecto decorreu dentro das datas previstas e todos os objectivos definidos no início deste foram alcançados.

10.Propostas de trabalhos futuros

Como propostas a trabalhos futuros pode vir um estudo mais aprofundado de todas as ligações, em todos os edifícios, isto é, não só o estudo das três ligações abordadas neste projecto, mas também de todas as outras presentes em todos os edifícios, com vista a ter toda a informação pormenorizada que permita a realização projectos e orçamentos de uma forma muito rápida e segura.

Outro trabalho que poderá vir no seguimento deste é acabar o desenho do edifício tipo já iniciado durante este projecto, com todos os pormenores de ligação, desenhos técnicos para fabrico, desenhos de montagem e mapa de quantidades.

Por último, fica como proposta, um estudo do custo dos edifícios, que permite posteriormente fazer uma comparação de preços entre os edifícios e entre os diferentes travamentos do mesmo edifício, com o objectivo de chegar à solução óptima de cada edifício.

11.Referências

1. **Silva, José M.** *Seminário Portugal Steel-Contributo Socioeconómico da Indústria Metalomecânica Portuguesa.*Silva, 2013.
2. www.sitesgoogle.com/site/acoufmg/home/histórico. [Online]
3. www.en.wikipedia.org/wiki/Maria_Pia_Bridge. [Online]
4. www.portugalsteel.com/?p=1259. [Online]
5. www.portugalsteel.com/?p=1253. [Online]
6. www.portugalsteel.com/?page_id=8. [Online]
7. **Ministério da Habitação, Obras Públicas e Transportes.** *Regulamento de segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*,1983.
8. **Instituto Português da Qualidade.** *EN 1090-2-Execution of steel structures and aluminium structures-Part 2.Technical requirements for steel structures .s.1.:* Instituto Português da Qualidade , 2008.
9. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 0-Bases para o projecto.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2009.
10. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 1-Acções em estruturas-Parte 1-1: Acções gerais-Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2009.
11. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 3-Projecto de estruturas de aço-Parte 1-1:Regras gerais e regras para edifícios.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2010.
12. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 1-Acções em estruturas-Parte 1-4:Acções gerais-Acções do vento.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2010.
13. **Agroserrana.** www.agroserrana.com.br/site/produtos/estruturas-metálicas/pavilhões-industriais.
14. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 1-Acções em estruturas-Parte 1-3:Acções gerais-Acções da neve.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2009.
15. **Instituto Português da Qualidade.** *Eurocódigo 3-Projecto de estruturas de aço-Parte 1-8:Projecto de ligações.s.1.:* Instituto Português da Qualidade, 2010.
16. www.weldingtipsandtricks.com/tig-welding-stick-mig-arc.html. [Online]
17. www.moldesinjecaoplasticos.com.br/terminologia.asp. [Online]
18. **Firefly Bicycles.** www.fireflybicycles.com/1112. [Online]

19. **Midwest Metal Products**. www.anglerings.com/value-added/weld-technology.aspx.
[Online]

Anexo A

- Forças horizontais equivalentes utilizadas

| Vãos[m] | Afast. Pórticos[m] | h pilar[m] | ϕ [rad] | NED[kN] | $\phi \times \text{NED}$ [kN] |
|---------|--------------------|------------|--------------|---------|-------------------------------|
| 10 | 5 | 5 | 0,00387 | 70 | 0,27 |
| | 5 | 6 | 0,00354 | 70 | 0,25 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 70 | 0,22 |
| | 6 | 5 | 0,00387 | 84 | 0,33 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 84 | 0,3 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 84 | 0,27 |
| 12 | 5 | 5 | 0,00387 | 84,04 | 0,33 |
| | 5 | 6 | 0,00354 | 84,04 | 0,3 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 84,04 | 0,27 |
| | 6 | 5 | 0,00387 | 100,8 | 0,39 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 100,8 | 0,36 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 100,8 | 0,32 |
| 15 | 5 | 5 | 0,00387 | 105,1 | 0,41 |
| | 5 | 6 | 0,00354 | 105,1 | 0,37 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 105,1 | 0,33 |
| | 6 | 5 | 0,00387 | 126,1 | 0,49 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 126,1 | 0,45 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 126,1 | 0,4 |
| 20 | 5 | 6 | 0,00354 | 140,1 | 0,5 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 140,1 | 0,44 |
| | 5 | 9 | 0,0029 | 140,1 | 0,41 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 168,1 | 0,6 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 168,1 | 0,53 |
| | 6 | 9 | 0,0029 | 168,1 | 0,48 |
| | 7,5 | 6 | 0,00354 | 210,1 | 0,74 |
| | 7,5 | 7,5 | 0,00316 | 210,1 | 0,66 |
| 24 | 5 | 6 | 0,00354 | 168,04 | 0,59 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 168,04 | 0,53 |
| | 5 | 9 | 0,0029 | 168,04 | 0,49 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 201,64 | 0,71 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 201,64 | 0,64 |
| | 6 | 9 | 0,0029 | 201,64 | 0,58 |
| | 7,5 | 6 | 0,00354 | 252,1 | 0,89 |
| | 7,5 | 7,5 | 0,00316 | 252,1 | 0,8 |
| | 7,5 | 9 | 0,0029 | 252,1 | 0,73 |
| 25 | 5 | 6 | 0,00354 | 175,06 | 0,62 |
| | 5 | 7,5 | 0,00316 | 175,06 | 0,55 |
| | 5 | 9 | 0,0029 | 175,06 | 0,51 |
| | 6 | 6 | 0,00354 | 210,1 | 0,74 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 210,1 | 0,66 |
| | 6 | 9 | 0,0029 | 210,1 | 0,61 |

| | | | | | |
|-----------|-----|-----|---------|--------|------|
| | 7,5 | 6 | 0,00354 | 262,5 | 0,93 |
| | 7,5 | 7,5 | 0,00316 | 262,5 | 0,83 |
| | 7,5 | 9 | 0,0029 | 262,5 | 0,76 |
| 30 | 6 | 6 | 0,00354 | 252,15 | 0,89 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 252,15 | 0,8 |
| | 6 | 9 | 0,0029 | 252,15 | 0,73 |
| | 7,5 | 6 | 0,00354 | 315,1 | 1,11 |
| | 7,5 | 7,5 | 0,00316 | 315,1 | 1 |
| | 7,5 | 9 | 0,0029 | 315,1 | 0,91 |
| 35 | 6 | 6 | 0,00354 | 294,13 | 1,04 |
| | 6 | 7,5 | 0,00316 | 294,13 | 0,93 |
| | 6 | 9 | 0,0029 | 294,13 | 0,85 |
| | 7,5 | 6 | 0,00354 | 367,6 | 1,3 |
| | 7,5 | 7,5 | 0,00316 | 367,6 | 1,16 |
| | 7,5 | 9 | 0,0029 | 367,6 | 1,06 |

Anexo B

• Pressões dinâmicas de pico para a zona A de vento

| Vãos[m] | Afast. Pórticos[m] | h pilar[m] | h platibanda[m] | htotal | $q_p(z)$ |
|---------|--------------------|------------|-----------------|--------|----------|
| 10 | 5 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| 12 | 5 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| 15 | 5 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 928,2 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 970,6 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1025,2 |
| 20 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| 24 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| 25 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 989,9 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1041,5 |
| | 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1085,9 |
| 30 | 6 | 6 | 2 | 8 | 1008,0 |
| | 6 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1057,0 |
| | 6 | 9 | 2 | 11 | 1099,5 |
| | 7,5 | 6 | 2 | 8 | 1008,0 |
| | 7,5 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1057,0 |
| | 7,5 | 9 | 2 | 11 | 1099,5 |
| 35 | 6 | 6 | 2 | 8 | 1008,0 |
| | 6 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1057,0 |
| | 6 | 9 | 2 | 11 | 1099,5 |
| | 7,5 | 6 | 2 | 8 | 1008,0 |
| | 7,5 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1057,0 |
| | 7,5 | 9 | 2 | 11 | 1099,5 |

• Pressões dinâmicas de pico na zona B de vento

| Vãos[m] | Afast. Pórticos[m] | h pilar[m] | h platibanda[m] | htotal | $q_p(z) [N / m^2]$ |
|---------|--------------------|------------|-----------------|--------|--------------------|
| 10 | 5 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| 12 | 5 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| 15 | 5 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 5 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 5 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| | 6 | 5 | 1 | 6 | 1145,9 |
| | 6 | 6 | 1 | 7 | 1198,3 |
| | 6 | 7,5 | 1 | 8,5 | 1265,6 |
| 20 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| 24 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| 25 | 5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 6 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 6 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| | 6 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 |
| | 7,5 | 6 | 1,5 | 7,5 | 1222,0 |
| | 7,5 | 7,5 | 1,5 | 9 | 1285,7 |
| 7,5 | 9 | 1,5 | 10,5 | 1340,6 | |
| 30 | 6 | 6 | 2 | 8 | 1244,4 |
| | 6 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1304,9 |
| | 6 | 9 | 2 | 11 | 1357,4 |
| | 7,5 | 6 | 2 | 8 | 1244,4 |
| | 7,5 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1304,9 |
| | 7,5 | 9 | 2 | 11 | 1357,4 |
| 35 | 6 | 6 | 2 | 8 | 1244,4 |
| | 6 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1304,9 |
| | 6 | 9 | 2 | 11 | 1357,4 |
| | 7,5 | 6 | 2 | 8 | 1244,4 |
| | 7,5 | 7,5 | 2 | 9,5 | 1304,9 |
| | 7,5 | 9 | 2 | 11 | 1357,4 |

Anexo C

Anexo D

Combinações fundamentais definidas para as verificações de segurança em estados limites últimos.

| Ação base | Nome | Ação | Coef. |
|-----------|-----------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Sc | Sc | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | | | | |
| Sc | Sc+Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 6 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 7 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 8 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Vento(x-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 9 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Vento(y+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 10 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Vento(y-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 11 | 0,9 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 8 | 0,9 | 6 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 8 | 0,9 | 7 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 9 | 0,9 | 6 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 9 | 0,9 | 7 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 10 | 0,9 | 6 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 10 | 0,9 | 7 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 11 | 0,9 | 6 | 0,9 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 5 | 1,5 | 11 | 0,9 | 7 | 0,9 |
| Temp.(+) | Temp.(+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | | | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 8 | 0,9 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 9 | 0,9 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 10 | 0,9 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 11 | 0,9 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 5 | 0 | 8 | 0,9 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 5 | 0 | 9 | 0,9 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 5 | 0 | 10 | 0,9 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 6 | 1,5 | 5 | 0 | 11 | 0,9 |
| Temp.(-) | Temp.(-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | | | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 8 | 0,9 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 9 | 0,9 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 10 | 0,9 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 11 | 0,9 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 5 | 0 | 8 | 0,9 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 5 | 0 | 9 | 0,9 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 5 | 0 | 10 | 0,9 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,35 | 2 | 1,35 | 3 | 1,35 | 4 | 1,00 | 7 | 1,5 | 5 | 0 | 11 | 0,9 |
| Vento(x+) | Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | | | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | 6 | 0,9 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | 7 | 0,9 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | 5 | 0 | 6 | 0,9 |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 8 | 1,5 | 5 | 0 | 7 | 0,9 |
| Vento(x-) | Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | | | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | 6 | 0,9 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | 7 | 0,9 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | 5 | 0 | 6 | 0,9 |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 9 | 1,5 | 5 | 0 | 7 | 0,9 |
| Vento(y+) | Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | | | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | 6 | 0,9 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | 7 | 0,9 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | 5 | 0 | 6 | 0,9 |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 10 | 1,5 | 5 | 0 | 7 | 0,9 |
| Vento(y-) | Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | | | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | 5 | 0 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | 6 | 0,9 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | 7 | 0,9 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | 5 | 0 | 6 | 0,9 |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | | 4 | 1,00 | 11 | 1,5 | 5 | 0 | 7 | 0,9 |

- **Combinações características definidas para as verificações de segurança em estados limites de utilização**

| Acção base | Nome | Acção | Coef. |
|------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sc | Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | | | | |
| Sc | Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 6 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 7 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 8 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 9 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 10 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 11 | 0,6 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 8 | 0,6 | 6 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 8 | 0,6 | 7 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 9 | 0,6 | 6 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 9 | 0,6 | 7 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 10 | 0,6 | 6 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 10 | 0,6 | 7 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 11 | 0,6 | 6 | 0,6 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 1,00 | 11 | 0,6 | 7 | 0,6 |
| Temp.(+) | Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | | | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 8 | 0,6 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 9 | 0,6 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 10 | 0,6 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 11 | 0,6 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 5 | 0 | 8 | 0,6 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 5 | 0 | 9 | 0,6 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 5 | 0 | 10 | 0,6 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 1,00 | 5 | 0 | 11 | 0,6 |
| Temp.(-) | Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | | | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 8 | 0,6 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 9 | 0,6 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 10 | 0,6 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 11 | 0,6 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 5 | 0 | 8 | 0,6 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 5 | 0 | 9 | 0,6 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 5 | 0 | 10 | 0,6 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 1,00 | 5 | 0 | 11 | 0,6 |
| Vento(x+) | Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | | | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | 6 | 0,6 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | 7 | 0,6 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | 5 | 0 | 6 | 0,6 |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 1,00 | 5 | 0 | 7 | 0,6 |
| Vento(x-) | Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | | | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | 6 | 0,6 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | 7 | 0,6 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | 5 | 0 | 6 | 0,6 |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 1,00 | 5 | 0 | 7 | 0,6 |
| Vento(y+) | Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | | | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | 6 | 0,6 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | 7 | 0,6 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | 5 | 0 | 6 | 0,6 |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 1,00 | 5 | 0 | 7 | 0,6 |
| Vento(y-) | Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | | | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | 5 | 0 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | 6 | 0,6 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | 7 | 0,6 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | 5 | 0 | 6 | 0,6 |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 1,00 | 5 | 0 | 7 | 0,6 |

- **Combinações frequentes definidas para as verificações de segurança em estados limites de utilização**

| Acção base | Nome | Acção | Coef. |
|------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sc | Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | | | | |
| Sc | Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 6 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 7 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 8 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 9 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 10 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 11 | 0,00 | | |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 8 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 8 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 9 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 9 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 10 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 10 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 11 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Sc | Sc+Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 5 | 0,00 | 11 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Temp.(+) | Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | | | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 5 | 0,00 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 8 | 0,00 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 9 | 0,00 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 10 | 0,00 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 11 | 0,00 | | |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 5 | 0,00 | 8 | 0,00 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 5 | 0,00 | 9 | 0,00 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 5 | 0,00 | 10 | 0,00 |
| Temp.(+) | Temp.(+)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 6 | 0,50 | 5 | 0,00 | 11 | 0,00 |
| Temp.(-) | Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | | | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 5 | 0,00 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 8 | 0,00 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 9 | 0,00 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 10 | 0,00 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 11 | 0,00 | | |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 5 | 0,00 | 8 | 0,00 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 5 | 0,00 | 9 | 0,00 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 5 | 0,00 | 10 | 0,00 |
| Temp.(-) | Temp.(-)+Sc+Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | 3 | 1,00 | 4 | 1,00 | 7 | 0,50 | 5 | 0,00 | 11 | 0,00 |
| Vento(x+) | Vento(x+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | | | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | 5 | 0,00 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | 6 | 0,00 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | 7 | 0,00 | | |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | 5 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Vento(x+) | Vento(x+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 8 | 0,20 | 5 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Vento(x-) | Vento(x-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | | | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | 5 | 0,00 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | 6 | 0,00 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | 7 | 0,00 | | |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | 5 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Vento(x-) | Vento(x-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 9 | 0,20 | 5 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Vento(y+) | Vento(y+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | | | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | 5 | 0,00 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | 6 | 0,00 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | 7 | 0,00 | | |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | 5 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Vento(y+) | Vento(y+)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 10 | 0,20 | 5 | 0,00 | 7 | 0,00 |
| Vento(y-) | Vento(y-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | | | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | 5 | 0,00 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | 6 | 0,00 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | 7 | 0,00 | | |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(+) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | 5 | 0,00 | 6 | 0,00 |
| Vento(y-) | Vento(y-)+Sc+Temp.(-) | 1 | 1,00 | 2 | 1,00 | | | 4 | 1,00 | 11 | 0,20 | 5 | 0,00 | 7 | 0,00 |

Anexo E

Anexo F

