

ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS PRÉ-FABRICADOS DE BETÃO ARMADO: A INFLUÊNCIA DAS OPÇÕES DE MODELAÇÃO

DANIELA FILIPA GONÇALVES PALHARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum

Coorientador: Engenheiro Eugénio Paulo da Cruz Maia

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao Américo da Rocha Moreira

"Our greatest glory is not in never failing, but in rising up every time we fail"

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Varum, pela orientação e paciência ao longo deste percurso. O seu apoio e sabedoria foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço também a toda equipa Struconcept, Lda, por toda a disponibilidade e partilha de conhecimentos. Em particular, à Engenheira Inês Maia, ao Engenheiro António Carreira e ao Modelador Henrique Batalha, por quem tenho uma grande estima.

Aos sócios da Struconcept, Lda, Engenheiro Alberto Teixeira, Engenheiro Miguel Guimarães e Engenheiro Eugénio Maia, pela oportunidade e por oferecerem todas as condições necessárias para a realização deste estudo. Gostaria de destacar um agradecimento especial ao Engenheiro Eugénio Maia pelo seu acompanhamento e encorajamento contínuo.

Aos meus amigos, que me acompanharam durante estes cinco anos, e aos que já faziam parte da minha vida antes disso, por me incentivarem sempre e terem tornado este percurso mais leve.

A toda a minha família, em especial à minha avó e ao meu primo por todo o carinho e ajuda prestada ao longo de toda a minha vida. E aos meus pais, pelos valores que me transmitiram, pelo amor e apoio incondicional e por me mostrarem sempre que o céu é o limite.

A todos, o meu mais sincero e profundo obrigado.

RESUMO

Dada a grande utilização de estruturas pré-fabricadas atualmente, as ligações entre os elementos estruturais pré-fabricados são cada vez mais importantes. Logo, este estudo foca-se na modelação de pórticos de edifícios industriais pré-fabricados de betão armado.

O objetivo principal da presente dissertação é realizar uma análise comparativa entre modelos 2D simplificados de barras e os correspondentes modelos com elementos finitos, utilizando o programa de cálculo automático Robot Structural Analysis.

Nos diferentes modelos simplificados, a geometria da viga e a modelação das ligações entre os pilares e as vigas pré-fabricadas variam. Este estudo procura identificar o modelo simplificado que melhor simula o comportamento real da estrutura, comparando os resultados obtidos em zonas importantes, tais como o meio vão das vigas, as bases dos pilares e na ligação entre os dois elementos.

A análise de cada modelo foi fundamental para compreender a influência das ligações na resposta global da estrutura, especialmente sob ações gravíticas (em estado limite último e estado limite de serviço) e sob a ação sísmica. Foram identificados quais os modelos que apresentavam esforços e deslocamentos mais próximos dos obtidos através dos modelos com elementos finitos.

Posteriormente, compararam-se também as frequências naturais e modos de vibração da estrutura, permitindo entender quais as ligações que oferecem uma maior rigidez ou flexibilidade da mesma, e o seu comportamento na ocorrência de um sismo.

Os resultados obtidos indicam que, dos cinco tipos de ligações modeladas, existem dois que proporcionam uma análise correta da estrutura. Estes dois tipos são capazes de representar com precisão o comportamento estrutural observado nos modelos com elementos finitos, e assim assegurar a segurança da estrutura.

Durante a realização da dissertação, identificou-se uma particularidade associada ao modelo de elementos finitos com a viga de secção variável. Esta evidencia uma característica relacionada com a forma dos diagramas das tensões na secção a meio vão, mais especificamente no seu vértice, onde ocorre uma mudança repentina de inclinação. Como tal, procedeu-se a uma análise para verificar e confirmar que isso não compromete o comportamento real da estrutura.

Assim, este estudo destaca a importância de uma modelação adequada de edifícios industriais pré-fabricados, em particular da relevância e influencia das ligações entre os elementos estruturais. A escolha adequada das ligações é importante para garantir que a estrutura se comporta da forma correta sob diferentes condições de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Pré-fabricação, Edifícios Industriais, Ligações, Modelação Estrutural, Ações Sísmicas.

ABSTRACT

Nowadays, given the widespread use of precast structures, the connections between precast structural elements are becoming increasingly important. This study therefore focuses on the modelling of precast reinforced concrete industrial frame buildings.

The main objective of this dissertation is to carry out a comparative analysis between simplified 2D models and the corresponding finite element models, using the automatic calculation program Robot Structural Analysis.

In the different simplified models, the geometry of the beam and the modelling of the connections between the columns and the precast beam varies. This study seeks to identify the simplified model that best simulates the real behavior of the structure, comparing the results obtained in important areas, such as the mid-span of the beams, the bases of the columns and the connections between the two elements.

The analysis of each model was fundamental to understand the influence of the connections on the overall response of the structure, especially under gravitational actions (in ultimate limit state and service limit state) and under seismic action. The models that exhibited the closest forces and displacements to those obtained from the finite element models, were identified.

Subsequently, the natural frequencies and vibration modes of the structure were also compared, making it possible to understand which connections offer greater rigidity or flexibility, and their behaviour in the event of an earthquake.

The results obtained indicate that out of the five types of modeled connections, there are two that provide a correct analysis of the structure. These two types are able to accurately represent the structural behavior observed in the finite element models, and ensuring the safety of the structure.

During the course of the dissertation, a particular feature associated with the finite elements model with the variable section beam was identified. This feature is related to the shape of the stress diagrams in the mid-span section, specifically at its vertex, where there is a sudden change in inclination. As such, an analysis was carried out to verify and confirm that this does not compromise the actual behavior of the structure.

Therefore, this study highlights the importance of appropriate modeling of precast industrial buildings, in particular the relevance and influence of connections between structural elements. The proper choice of connections is important to ensure that the structure behaves correctly under different load conditions.

KEYWORDS: Precast, Industrial Buildings, Connections, Structural Modeling, Seismic Actions.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XV
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. A PRÉ-FABRICAÇÃO EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS DE BETÃO ARMADO	3
2.1. GENERALIDADES.....	3
2.2. EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS PRÉ-FABRICADOS EM PORTUGAL.....	3
2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PRÉ-FABRICAÇÃO	4
2.4. PRINCIPAIS ELEMENTOS NA CONCEÇÃO DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS	5
2.4.1. PILARES	5
2.4.2. VIGAS	6
2.4.3. LAJES	7
2.4.4. PAREDES	8
2.4.5. FUNDAÇÕES	9
2.5. LIGAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS.....	10
2.5.1. LIGAÇÃO VIGA-PILAR	10
2.6. SISTEMAS CONSTRUTIVOS	15
2.6.1. SISTEMAS PORTICADOS COM VIGAS DE SECÇÃO VARIÁVEL.....	16
2.6.2. SISTEMAS PORTICADOS COM VIGAS DE SECÇÃO CONSTANTE	17
2.7. MODELOS DE ANÁLISE DE ESTRUTURAS	17
2.7.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	18
3. A VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS PRÉ- FABRICADOS DE BETÃO	19
3.1. INTRODUÇÃO.....	19

3.2. PRINCIPAIS DANOS NAS VIGAS E NOS PILARES PRÉ-FABRICADOS.....	19
3.3. NORMAS SÍSMICAS	21
3.4. EUROCÓDIGO 8 -2010	21
3.4.1. CONDIÇÕES DO TERRENO	22
3.4.2. ZONAS SÍSMICAS	24
3.4.3. CLASSES DE IMPORTÂNCIA E COEFICIENTES DE IMPORTÂNCIA.....	25
3.4.4. ESPETRO DE RESPOSTA ELÁSTICA VS ESPETRO DE RESPOSTA DE CÁLCULO	25
3.4.5. COEFICIENTES DE COMPORTAMENTO	29
3.4.6. COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	30
3.4.7. COMBINAÇÕES DOS EFEITOS DAS COMPONENTES DA AÇÃO SÍSMICA.....	31
 4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS 2D SIMPLIFICADOS DE BARRAS E MODELOS COM ELEMENTOS FINITOS.....	 33
4.1. INTRODUÇÃO	33
4.2. MODELAÇÃO	34
4.2.1. GEOMETRIA.....	34
4.2.2. AÇÕES	42
4.2.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	43
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	44
4.3.1. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO ULS_SOB3	46
4.3.2. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO ELS	52
4.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO SÍSMICA	53
4.3.4. ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO	59
4.4. PONTO SINGULAR NAS VIGAS DELTA.....	64
4.4.1. DESCRIÇÃO DA PARTICULARIDADE DA VIGA DE SECÇÃO VARIÁVEL	64
4.4.2. ESTRATÉGIAS PARA SUAVIZAR OS DIAGRAMAS.....	65
 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 69
5.1. CONCLUSÕES	69
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXOS	75
QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO	77
FOLHAS DE CÁLCULO COM AS COMBINAÇÕES DE AÇÕES	81
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA O PP.....	85

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A RCP1.....	89
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A RCP2.....	93
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB1.....	97
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB2.....	101
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB3.....	105
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO1+	109
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO2+	113
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO1-	117
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO2-	121
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1	125
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V1+.....	129
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V2+.....	133
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V1-.....	137
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V2-.....	141
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2	145
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V1+.....	149
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V2+.....	153
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V1-.....	157
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V2-.....	161
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3	165
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V1+.....	169
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V2+.....	173
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V1-.....	177
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V2-.....	181
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V1+	185
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V2+	189
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V1-	193
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V2-	197
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DAS COMBINAÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA TIPO1..	201
FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DAS COMBINAÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA TIPO2..	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Exemplos de pórticos com secção transversal variável e constante [3].....	4
Fig. 2.2 - Transporte de um elemento pré-fabricado [4]	5
Fig. 2.3 - Geometria de pilares pré-fabricados [7]	6
Fig. 2.4 - Geometria de vigas pré-fabricadas [9]	7
Fig. 2.5 – Secção transversal de lajes alveolares pré-fabricadas [4].....	7
Fig. 2.6 - Exemplo de uma laje pré-fabricada com secção transversal "TT" [11]	8
Fig. 2.7 - Exemplo de uma pré-laje maciça [10]	8
Fig. 2.8 - Exemplo de uma parede pré-fabricada e respetiva ligação [6]	9
Fig. 2.9 - Ligações entre fundações e pilares pré-fabricados [9].....	9
Fig. 2.10 - Tipologias de ligações viga-pilar [12]	11
Fig. 2.11 - Requisitos a cumprir pelos aparelhos de apoio [12].....	12
Fig. 2.12 - Exemplo de aparelhos de apoio e definições [15]	12
Fig. 2.13 - Pormenorização das armaduras de consolas curtas [15].....	14
Fig. 2.14 - Modelo de escoras e tirantes para uma consola curta [16]	15
Fig. 2.15 - Sistema porticado pré-fabricado [9].....	15
Fig. 2.16 - Exemplos de sistemas estruturais em parede [12].....	16
Fig. 2.17 - Exemplo de pórticos com vigas de secção variável [17]	16
Fig. 2.18 - Exemplo de pórticos constituídos por dois elementos simétricos que representam uma viga de secção variável [17].....	17
Fig. 2.19 - Exemplo de pórticos com vigas de secção constante [17]	17
Fig. 2.20 - Exemplo de uma malha de elementos finitos	18
 Fig. 3.1 - Danos em pilares pré-fabricados após a ocorrência de um sismo [20]	20
Fig. 3.2 - Resposta de uma estrutura com ligações monolíticas a um ensaio cíclico [23]	20
Fig. 3.3 - Resposta de uma estrutura com ligações articuladas a um ensaio cíclico [23].....	20
Fig. 3.4 - Resposta de uma estrutura com ligações híbridas a um ensaio cíclico [23]	21
Fig. 3.5 - Zonamento sísmico em Portugal Continental [24].....	24
 Fig. 4.1 – Direção das tensões principais e isolinhas no cachorro (Robot)	35
Fig. 4.2 - Espectro de resposta utilizado	43

Fig. 4.3 - Diagrama de tensões lineares representativo	45
Fig. 4.4 - Envolvente de momentos fletores nas vigas de secção constante "I"	46
Fig. 4.5 - Envolvente de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante "I"	47
Fig. 4.6 - Envolvente de momentos fletores nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal	48
Fig. 4.7 - Envolvente de momentos fletores nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado	49
Fig. 4.8 - Envolvente de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo horizontal	49
Fig. 4.9 - Envolvente de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo inclinado	50
Fig. 4.10 - Direção das tensões principais (Robot).....	50
Fig. 4.11 - Deformadas nas vigas de secção constante "I"	52
Fig. 4.12 - Deformadas nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal.....	52
Fig. 4.13 - Deformadas nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado	53
Fig. 4.14 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante "I"	55
Fig. 4.15 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante "I"	55
Fig. 4.16 - Deslocamento na zona 2 dos pilares do Tipo 3.....	56
Fig. 4.17 - Deslocamento na zona 2 dos pilares do Tipo 4.....	56
Fig. 4.18 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal.....	57
Fig. 4.19 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado	57
Fig. 4.20 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal	58
Fig. 4.21 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado.....	58
Fig. 4.22 – Diagrama irregular de tensões no meio vão da viga de secção variável para a ação RCP1.	64
Fig. 4.23 - Diagrama de tensões para a secção do meio vão e para uma secção adjacente (RCP1) ..	65
Fig. 4.24 - "Crosses" no vértice da viga delta (Robot)	66
Fig. 4.25 - Malha de elementos finitos no vértice, antes e depois de ser refinada	66
Fig. 4.26 - Parâmetros para definição do comando "fillet" (Robot)	66

Fig. 4.27 - Pontos de transição entre secções com diagramas lineares e secções com diagramas não lineares.....	67
Fig. 4.28 - Diagrama de tensões no banzo superior da secção a meio vão da viga (sem arredondamento do vértice).....	67
Fig. 4.29 - Diagrama de tensões no banzo superior da secção a meio vão da viga com arredondamento do vértice).....	68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valor mínimo a_1 de em mm [15].....	13
Quadro 2.2 - Distância a_2 (mm) considerada como ineficaz a partir da face do elemento de apoio Nos casos (-) deverá utilizar-se um enchimento de betão [15].....	13
Quadro 2.3 - Distância a_3 (mm) considerada como ineficaz a partir da face do elemento de apoio [15]	13
Quadro 2.4 - Tolerância Δa_2 para a distância livre entre as faces dos elementos do apoio $l =$ comprimento do vão [15].....	13
Quadro 3.1 - Tipos de terreno [24]	23
Quadro 3.2 - Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s ²) nas várias zonas sísmicas [24]	24
Quadro 3.3 - Classes de importância para os edifícios [24]	25
Quadro 3.4 - Coeficientes de importância, γ_I	25
Quadro 3.5 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espetros de resposta elástica de tipo 1 [24]	26
Quadro 3.6 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espetros de resposta elástica de tipo 2 [24]	27
Quadro 3.7 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espetros de resposta elástica verticais [24]	27
Quadro 3.8 - Valores dos parâmetros definidores do espetro de resposta elástico para a Ação Sísmica Tipo 1 [24]	28
Quadro 3.9 - Valores dos parâmetros definidores do espetro de resposta elástico para a Ação Sísmica Tipo 2 [24]	29
Quadro 3.10 - Valor básico do coeficiente de comportamento q_0 [24].....	30
Quadro 3.11 - Valores de φ para calcular $\psi E, I$ [24].....	31
Quadro 4.1 - Geometria dos pilares e das vigas	34
Quadro 4.2 - Pórticos modelados com a viga de secção constante "I"	36
Quadro 4.3 - Pórticos modelados com a viga de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal	38
Quadro 4.4 - Pórticos modelados com a viga de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado	40
Quadro 4.5 - Valores das ações consideradas.....	42
Quadro 4.6 - Parâmetros associados à Ação Sísmica	42

Quadro 4.7 - Coeficientes de Combinação.....	43
Quadro 4.8 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga I).....	48
Quadro 4.9 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga delta – eixo horizontal)	51
Quadro 4.10 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga delta – eixo inclinado)	51
Quadro 4.11 - Valor do deslocamento vertical (mm) na secção a meio vão das vigas e a respetiva variação percentual em relação ao MEF	53
Quadro 4.12 - Forças de corte (kN) na base dos pilares (zona 3).....	54
Quadro 4.13 - Deslocamento horizontal (mm) no topo dos pilares (zona 2)	54
Quadro 4.14 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas “I”	59
Quadro 4.15 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas “I”	60
Quadro 4.16 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas delta (eixo horizontal)	61
Quadro 4.17 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas delta (eixo inclinado)	61
Quadro 4.18 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas delta (eixo horizontal)	62
Quadro 4.19 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas delta (eixo inclinado).....	63

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a_g	Valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A
a_{gR}	Valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A
c_u	Resistência ao corte não drenado do solo
f	Frequência natural da estrutura
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
q	Coeficiente de comportamento
q_0	Valor básico do coeficiente de comportamento
q_p	Coeficiente de comportamento para estruturas pré-fabricadas
$E_{E,dx}$	Valor de cálculo dos efeitos devidos à componente horizontal x da ação sísmica
$E_{E,dy}$	Valor de cálculo dos efeitos devidos à componente horizontal y da ação sísmica
$E_{E,dz}$	Valor de cálculo dos efeitos devidos à componente vertical z da ação sísmica
$G_{k,j}$	Valor característico da ação permanente j
N_{SPT}	Número de pancadas do ensaio SPT
$Q_{k,j}$	Valor característico da ação variável j
S	Coeficiente do solo de cálculo
S_{max}	Coeficiente do solo máximo
T	Período de vibração
T_B	Limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante
T_C	Limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante
T_D	Valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante
v_i	Velocidade das ondas de corte na camada i
$v_{s,30}$	Velocidade média das ondas de corte
η	Coeficiente de correção do amortecimento
φ	Coeficiente de combinação associado à tipologia de ocupação do edifício
Ψ_{0i}	Coeficiente de combinação da ação variável Q_i
Ψ_{1i}	Coeficiente de combinação da ação variável Q_i
Ψ_{2i}	Coeficiente de combinação quase-permanente da ação variável Q_i
$\Psi_{E,i}$	Coeficiente de combinação para a ação variável i
AVB	Ação variável base
DCL	Classe de ductilidade baixa
DCH	Classe de ductilidade alta

DCM	Classe de ductilidade média
EC0	Eurocódigo 0
EC1	Eurocódigo 1
EC2	Eurocódigo 2
EC8	Eurocódigo 8
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RCP	Restantes cargas permanentes
RSA	Regulamento de Segurança e Ações
SOB	Sobrecarga
Fig.	Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A utilização da pré-fabricação em Portugal tem vindo a crescer de forma significativa, sendo reconhecida como uma solução construtiva eficiente, que contribui para a redução dos custos e prazos associados a todo o processo construtivo. Todavia, dadas as particularidades associadas a este método construtivo, nomeadamente os problemas relacionados com as ligações entre os elementos estruturais, é fundamental investigar e aprofundar este tema, com o propósito de tornar as construções cada vez mais seguras.

Os edifícios industriais de betão armado, formados essencialmente por sistemas porticados, enfrentam determinados desafios, sobretudo quando estão sujeitos a forças horizontais, como o vento e os sismos. Neste contexto, a modelação adequada desempenha um papel importante no projeto de estruturas, uma vez que permite simular e analisar o comportamento estrutural destes sistemas construtivos, em diferentes cenários.

Com a finalidade de dominar o funcionamento dos programas de cálculo automático, como o Robot Structural Analysis, podem ser feitos estudos através da comparação de modelos simples, cuja resolução analítica seja imediata. Esta perspetiva reforça a pertinência da escolha de um sistema porticado como objeto de estudo da presente dissertação.

Deste modo, os objetivos que se pretendem atingir são os seguintes:

- Realização de uma análise comparativa entre modelos 2D simplificados de um sistema porticado e os respetivos modelos com elementos finitos, com recurso ao programa de cálculo automático Robot Structural Analysis, para avaliar a precisão e representação de cada modelo na simulação do comportamento da estrutura;
- Comparação dos resultados obtidos em termos de esforços e deslocamentos em zonas críticas da estrutura, como o meio vão da viga, a base do pilar e a zona de ligação entre estes elementos, e analisar também os modos de vibração da estrutura, de modo a compreender as diferenças e semelhanças entre os vários modelos;
- Identificação das vantagens e limitações de cada abordagem de modelação, destacando quais são os modelos mais adequados. Esta análise contribuirá para o avanço do conhecimento desta área, fornecendo conclusões valiosas para a sua aplicação em estruturas pré-fabricadas do mesmo género ou mais complexas.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos com diferentes aspetos do tema abordado.

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução e contextualização do tema em estudo, e descrevem-se também os objetivos e os conteúdos dos capítulos da dissertação.

No segundo capítulo aborda-se o tema da pré-fabricação em edifícios industriais de betão armado em Portugal, as suas respetivas vantagens e desvantagens e a descrição de algumas tipologias construtivas. Além disso, apresentam-se ainda aspetos importantes relativamente à ligação viga-pilar, assim como um breve enquadramento do EC2 nesse contexto.

No terceiro capítulo mencionam-se os principais danos registados em vigas e pilares pré-fabricados após a ocorrência de um sismo, e expõe-se a metodologia preconizada no EC8 para a definição da ação sísmica. Para complementar, é feita uma breve descrição das normas sísmicas mais antigas.

O quarto capítulo é dedicado à explicação do processo de modelação 2D no programa de cálculo automático dos vários pórticos em estudo, bem como à análise e comparação dos resultados obtidos, em termos de esforços, deslocamentos e modos de vibração. Posteriormente, aborda-se uma singularidade associado à viga de secção e inércia variável, destacando a necessidade de atenção à complexidade deste elemento estrutural.

No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões finais do estudo e dão-se recomendações para estudos e desenvolvimentos futuros relacionados com o tema, com o objetivo de dar continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2

A PRÉ-FABRICAÇÃO EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS DE BETÃO ARMADO

2.1. GENERALIDADES

A pré-fabricação destaca-se das restantes técnicas construtivas, uma vez que os vários elementos são produzidos em fábrica, e posteriormente montados no local da obra. Esta técnica inovadora na indústria da construção civil, verificou avanços significativos imediatamente após a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de reconstrução rápida e à escassez de mão de obra [1].

O betão, o aço, a madeira e os materiais compósitos, são exemplos de materiais utilizados e podem surgir na forma de elemento construtivo, elemento de reforço ou como molde. Em Portugal, os elementos estruturais pré-fabricados mais comuns são pilares, vigas, lajes e paredes, que combinados entre si originam vários sistemas estruturais pré-fabricados.

Os edifícios pré-fabricados de betão não têm uma resposta favorável quando submetidos a forças horizontais, como ações sísmicas, especialmente quando não estão dimensionados para esse efeito [2]. Nesta tipologia de edifícios, as ligações viga-pilar surgem como uma das condicionantes. Estas desempenham um papel fundamental na transferência de esforços, e, portanto, o seu correto dimensionamento e conceção são essenciais para garantir a segurança do edifício. A modelação das estruturas pré-fabricadas surge como uma fase importante de todo o processo, com o objetivo de compreender a maneira como os esforços se distribuem entre os elementos construtivos, sendo o ponto de partida para o dimensionamento dos mesmos.

2.2. EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS PRÉ-FABRICADOS EM PORTUGAL

Inicialmente, em Portugal, a pré-fabricação focava-se essencialmente na produção de lajes e painéis, sem recurso a cofragem em obra. Contudo, atualmente a aplicação é mais comum nos edifícios industriais porticados, constituídos maioritariamente por vigas e pilares. Estes edifícios, compostos por vários pórticos, caracterizam-se pelos seus vãos elevados numa direção, entre 20 a 30 m [3], e vãos de menor dimensão na direção perpendicular.

O estudo feito por Rodrigues [3], indica que em 2017 estes edifícios concentravam-se ao longo da costa de Portugal, nas regiões mais a norte e centro. Além disso, há duas tipologias que se destacam, constituídas por pórticos paralelos com apenas um piso, pilares encastrados na base e ligação viga-pilar articulada ou garantida por atrito, em ambas as situações. São normalmente utilizados dois tipos de vigas, que se distinguem pela sua secção transversal. Num dos casos, as vigas evidenciam uma secção

transversal “I” variável em altura (vigas “delta”), e no outro, as vigas têm uma secção transversal “I” constante, como ilustrado na Fig. 2.1.

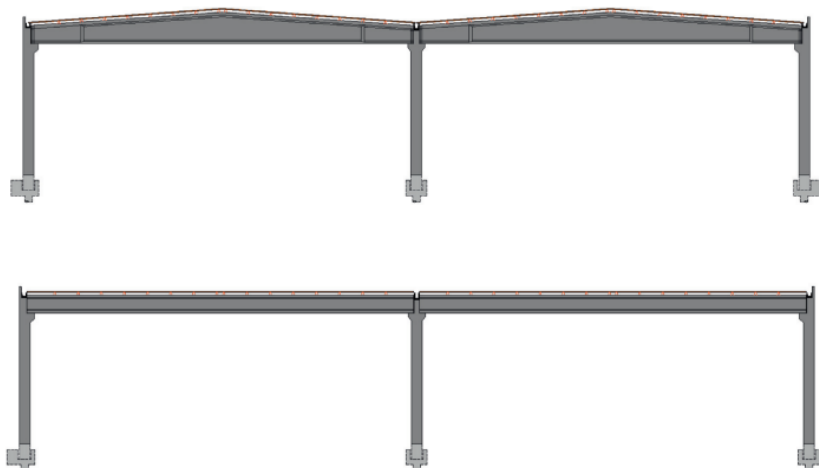


Fig. 2.1 - Exemplos de pórticos com secção transversal variável e constante [3]

2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A execução de estruturas utilizando elementos pré-fabricados de betão destaca-se pelas inúmeras vantagens, sobretudo de carácter económico, uma vez que permite a redução dos custos associados a uma obra. Por exemplo, devido à elevada repetição de elementos construtivos, como pilares e vigas, é provável que os custos relacionados com a cofragem diminuam, através da reutilização dos moldes [4].

Em comparação com as estruturas monolíticas executadas no local, os elementos pré-fabricados são executados e armazenados em fábrica, o que proporciona uma montagem mais rápida e, consequentemente, uma redução do tempo de construção. Segundo Steinle [4], a montagem de um pilar pré-fabricado de um edifício com 2 pisos requer cerca de 10 minutos e apenas uma utilização da grua, enquanto que a montagem de um pilar betonado *in situ* requer no mínimo três utilizações da grua por piso.

Além disso, verifica-se um controlo de qualidade mais apurado na produção do betão e na execução dos elementos. Estes são inspecionados e ensaiados antes da sua aplicação, o que permite identificar potenciais defeitos. As classes de resistência alcançadas pelo betão são superiores [4, 5].

A pré-fabricação proporciona ainda uma maior segurança, uma vez que as horas despendidas no estaleiro são menores, reduzindo, por conseguinte, o risco de acidentes de trabalho [5].

No entanto, é crucial reconhecer que este método construtivo também revela certas desvantagens que devem ser ponderadas, uma vez que podem influenciar o processo construtivo e o resultado da obra.

As ligações entre os vários elementos pré-fabricados apresentam problemas que influenciam o comportamento da estrutura, pois são responsáveis por assegurar a transmissão adequada dos esforços. Durante a produção das múltiplas tipologias construtivas, a presença dos elementos necessários para a realização das ligações pode dificultar o processo de colocação e compactação do betão nos moldes. Para combater o problema, limita-se a quantidade de elementos, o que por vezes pode complicar a junção eficaz entre as partes estruturais [1].

No transporte, é imperativo salvaguardar as componentes salientes dos elementos de betão, de modo a evitar riscos para o ambiente circundante e garantir a sua resistência a impactos imprevistos. Contudo, podem ocorrer danos que comprometem a integridade das ligações durante este processo.

Por sua vez, a montagem dos elementos pré-fabricados desempenha um papel importante na eficiência da estrutura, e exige um planeamento cuidadoso e uma execução precisa. Existem dificuldades associadas a esta fase do processo, relacionadas com o acesso à zona da ligação e com as dimensões dos elementos construtivos.

A produção, o transporte e a montagem dos elementos pré-fabricados, além de condicionarem o comportamento e execução das ligações, representam um desafio para a técnica de pré-fabricação. Estas etapas implicam algumas complexidades logísticas, que podem comprometer a eficiência de todo o processo. Desde a fabricação dos elementos até à sua instalação na obra, há fatores que têm de ser considerados, como o manuseio adequado das peças, a necessidade de equipamentos especializados e de grandes dimensões para o transporte (Fig. 2.2), montagem e elevação, assim como a conceção precisa das ligações entre os elementos. Este conjunto de operações acarreta custos específicos e requerem um planeamento antecipado, de forma a garantir que prazos estipulados sejam cumpridos e que a integridade estrutural não seja afetada [6].



Fig. 2.2 - Transporte de um elemento pré-fabricado [4]

2.4. PRINCIPAIS ELEMENTOS NA CONCEÇÃO DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS

Ao longo das décadas, a técnica de pré-fabricação tem sido alvo de uma evolução significativa, e representa uma resposta à procura crescente por métodos construtivos mais eficientes, rápidos e versáteis. A diversificação das tipologias construtivas tem sido fundamental para atender às necessidades de vários projetos, desde estruturas residenciais até edificações comerciais e industriais.

2.4.1. PILARES

Os pilares pré-fabricados, também designados como elementos principais verticais de uma estrutura pré-fabricada, têm como função transmitir as cargas às fundações.

A sua secção transversal mínima é condicionada pela dimensão da ligação viga-pilar, estando entre os 0,25 e 0,30 m, e pode ser retangular ou circular. É de salientar que os pilares são produzidos horizontalmente com o seu comprimento a variar entre os 12 e os 18 m [6].

Adicionalmente, podem exibir consolas curtas em mais do que uma das suas faces, que servem de apoio para as vigas [4], tal como é perceptível na Fig. 2.3.

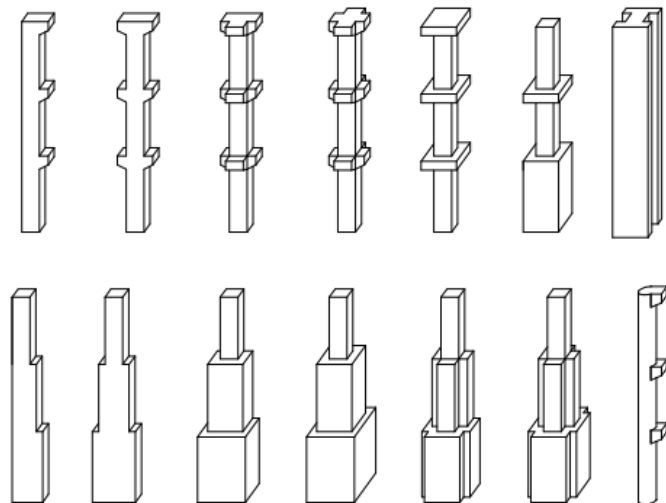


Fig. 2.3 - Geometria de pilares pré-fabricados [7]

2.4.2. VIGAS

Segundo Elliot [6], as vigas são os principais elementos horizontais de uma estrutura pré-fabricada, e têm como função transmitir as cargas aos pilares.

Há uma diversidade de opções para a secção transversal de uma viga pré-fabricada. Pode ser quadrada, retangular, com secção em “T”, “T” invertido, “I”, “U”, e até mesmo de secção e inércia variável, como pode observar-se na Fig. 2.4. Além disso, dividem-se em vigas internas e vigas externas. Enquanto as vigas internas são pré-esforçadas ou de betão armado, as vigas externas de fachada e com vãos menores, são tendencialmente de betão armado e possuem uma secção transversal assimétrica [8].

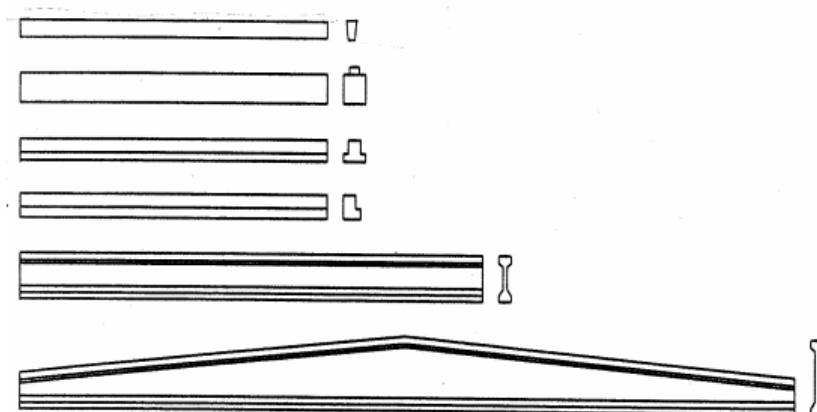


Fig. 2.4 - Geometria de vigas pré-fabricadas [9]

2.4.3. LAJES

As lajes pré-fabricadas, elementos horizontais de uma estrutura, têm de ser capazes de suportar as cargas verticais gravíticas e transmiti-las aos restantes elementos que constituem um edifício, tais como vigas, pilares e fundações, respetivamente. Além de alcançarem grandes vãos, destacam-se das lajes betonadas *in situ*, pela elevada resistência do betão utilizado e pela rapidez na montagem dos painéis [6].

Das inúmeras variedades, destacam-se as lajes alveolares (Fig. 2.5), as lajes “TT” (Fig. 2.6) e as pré-lajes maciças (Fig. 2.7)

As lajes alveolares, exibem espaços vazios circulares, ovais ou retangulares, que são executados antes da cura do betão. A existência dos alvéolos, possibilita uma diminuição do peso da laje, tornando esta solução económica, quando comparada com a solução tradicional. Adicionalmente, estes painéis pré-fabricados conseguem vencer vãos até aos 18 m e evidenciam uma largura normalmente de 1,2 m [4, 8]. Em geral, são as mais utilizadas no continente europeu e representam 40 a 60% do mercado de lajes pré-fabricadas [10].



Fig. 2.5 – Secção transversal de lajes alveolares pré-fabricadas [4]

Por sua vez, as lajes “TT” são mais eficientes do que as alveolares, na medida em que conseguem atingir vãos ainda mais elevados, até aos 25 m. Contudo, a maioria destes elementos requerem uma camada superior betonada *in situ*, juntamente com a colocação de uma malha de armadura de compressão, o que reduz a relevância das vantagens previamente descritas. [4, 6].

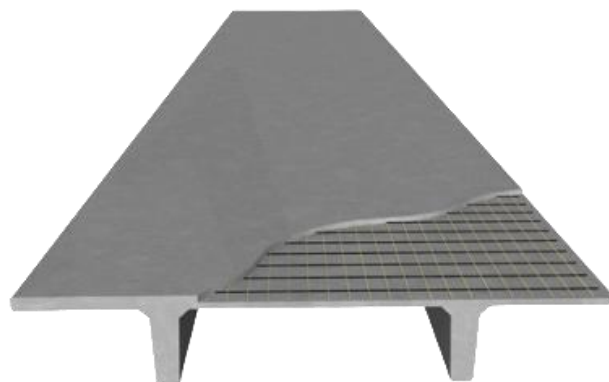


Fig. 2.6 - Exemplo de uma laje pré-fabricada com secção transversal "TT" [11]

As pré-lajes maciças consistem em acrescentar uma camada superior de betão *in situ*, com uma espessura entre 0,5 e 0,75 m, à laje pré-fabricada, sendo esta utilizada como cofragem permanente. Utilizam-se armaduras treliçadas na produção do painel pré-fabricado, com o objetivo de garantir a sua interação com betão *in situ*. As treliças resistem a tensões temporárias durante a construção, até ao instante em que a laje pré-fabricada começa a atuar em simultâneo com a cobertura *in situ* [11].

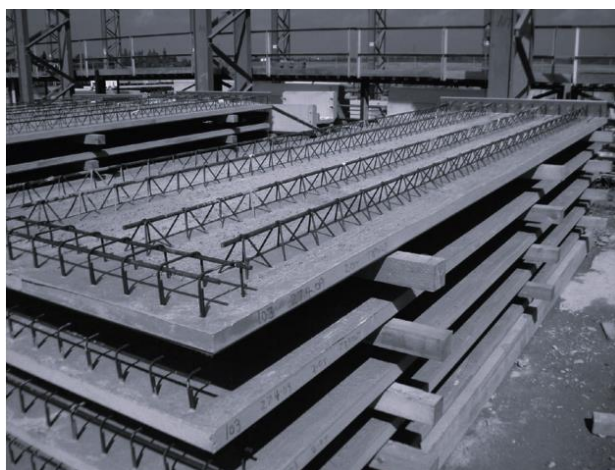


Fig. 2.7 - Exemplo de uma pré-laje maciça [10]

2.4.4. PAREDES

Nos elementos pré-fabricados estão incluídas as paredes (Fig. 2.8), que podem exibir funções estruturais ou não estruturais, e servem de suporte para as lajes de piso, lajes de cobertura e vigas. As paredes, além de transmitirem as cargas gravíticas às fundações, tal como os pilares, também podem ser utilizadas para resistir às ações horizontais a que estão sujeitas, sendo assim utilizadas como elementos de contraventamento, assegurando a estabilização do edifício [12].

A produção destes painéis realiza-se com o auxílio de moldes colocados na horizontal, com secção transversal retangular.



Fig. 2.8 - Exemplo de uma parede pré-fabricada e respetiva ligação [6]

2.4.5. FUNDAÇÕES

As fundações são os elementos responsáveis por transmitir as cargas da estrutura ao terreno. Como soluções pré-fabricadas, existem as sapatas, as estacas e os lintéis.

De acordo com o seu formato e fabrico, as fundações superficiais mais comuns dividem-se em três tipos distintos: fundação monolítica, fundação em cálice e bloco de fundação. Enquanto as fundações monolíticas são concebidas em fábrica juntamente com os pilares, as restantes podem ser construídas através de elementos pré-fabricados ou betonadas *in situ*, e requerem um elemento de ligação encarregue de transmitir os esforços entre o pilar e a fundação [4], como parafusos ou armaduras, tal como é evidente na Fig. 2.9.

Todavia, em Portugal, não é comum adotar soluções de sapatas pré-fabricadas. Assim, as fundações são geralmente betonadas *in situ* e posteriormente ligadas aos pilares pré-fabricados [13].

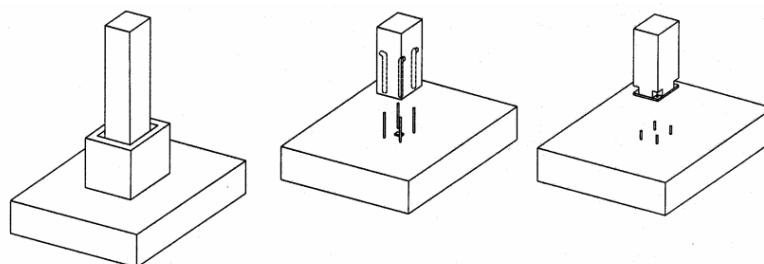


Fig. 2.9 - Ligações entre fundações e pilares pré-fabricados [9]

2.5. LIGAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

Na pré-fabricação, a conceção adequada das ligações entre os elementos assume um papel com um grau de importância elevado, pelo que devem ser concebidas de forma rigorosa. Estas ligações têm como principal função garantir a transmissão eficiente de esforços entre os elementos adjacentes e assegurar a estabilidade da estrutura.

Os métodos mais utilizados para a execução das ligações são a injeção de argamassa ou calda de cimento nas juntas entre os elementos, a utilização de placas de apoio e até mesmo parafusos. Existe uma grande diversidade de soluções utilizadas em função do tipo de elementos ligados, do esforço predominante e do processo de execução da própria ligação.

As ligações devem ser capazes de resistir às várias forças a que estão sujeitas, incluindo compressão, tração, corte, flexão e torção, bem como às suas combinações [14]. Relativamente ao seu esforço predominante dividem-se em: ligações de compressão, ligações de tração, ligações de corte, ligações de flexão e ligações de torção.

Quanto ao tipo de elementos ligados, podem ser classificadas como ligação pilar-fundação (LPF), ligação pilar-pilar (LPP), ligação viga-pilar (LVP), ligação viga-viga (LVV) e ligação laje-viga (LLV) [1]. Contudo, o foco da dissertação será exclusivamente a ligação viga-pilar.

Por fim, em função do processo de execução, é ainda possível enumerar as seguintes tipologias: ligações aparafusadas, ligações soldadas, ligações pré-esforçadas, ligações de continuidade betonadas em obra, ligações coladas e ligações por atrito [1].

As ligações têm de cumprir determinados requisitos para garantir a segurança das estruturas:

- Resistência, na medida em que devem resistir às forças a que estão sujeitas durante o seu período de vida útil;
- Ductilidade, referente à capacidade de deformação da ligação antes de atingir a rotura;
- Durabilidade;
- Resistência ao fogo [14].

2.5.1. LIGAÇÃO VIGA-PILAR

As vigas apoiam nos pilares e transferem, através da ligação, o seu peso próprio e todas as ações impostas até às fundações. Se essa transferência não for correta, pode resultar numa concentração de tensões e deformações excessivas, causando danos à estrutura. Uma das maiores condicionantes das ligações viga-pilar é a sua resposta a ações sísmicas, que será abordada no Capítulo 3.

Para a presente dissertação, e de acordo com os graus de liberdade restringidos nas extremidades das vigas, importa salientar a ligação viga-pilar articulada, que apenas transmite esforços normais e de corte. A transferência destas forças é geralmente efetuada através de varões de aço, parafusos, aparelhos de apoio metálicos ou elastométricos, calda de cimento ou simplesmente por atrito.

Quando a zona da ligação está sujeita a forças de compressão de intensidade elevada, mas sem ocorrer movimentos laterais ou rotações, é frequente a utilização de chapas ou varões de aço ao longo da junta, devidamente ancorados ou soldados a cada um dos elementos estruturais, de forma a assegurar a transferência das forças de compressão.

Pelo contrário, recorrem-se a placas de apoio metálicas ou elastométricas para conceber a ligação entre uma viga e um pilar, quando se está perante forças de compressão de intensidade moderada e ocorrem

movimentos laterais ou rotações. Apesar dos aparelhos de apoio metálicos evidenciarem resistência à compressão mais elevada, a sua capacidade de rodar é limitada [12].

Estes exemplos de ligações entre as vigas e os pilares estão devidamente ilustrados na Fig. 2.10.

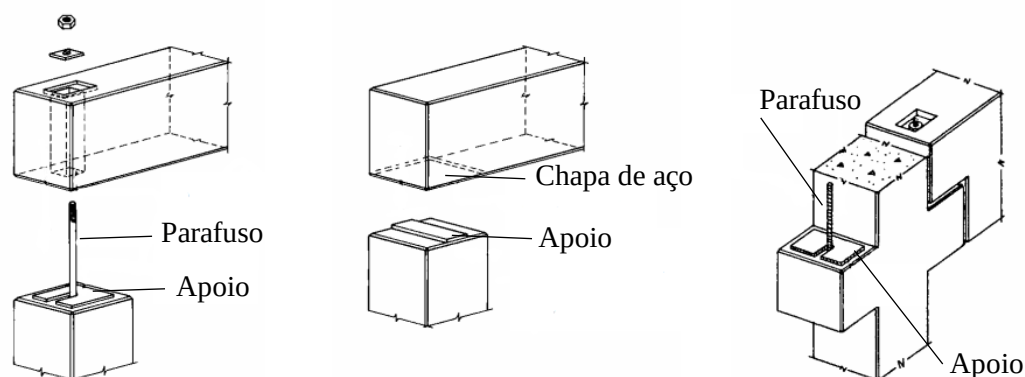


Fig. 2.10 - Tipologias de ligações viga-pilar [12]

Os aparelhos de apoio, quando atuam como ligação entre os pilares e as vigas, têm de cumprir os seguintes requisitos (Fig. 2.11):

- Distribuir adequadamente as forças verticais e horizontais;
- Evitar o contacto entre os dois elementos pré-fabricados adjacentes;
- Localizar-se a uma distância específica do canto do pilar para prevenir o esmagamento do betão [12].

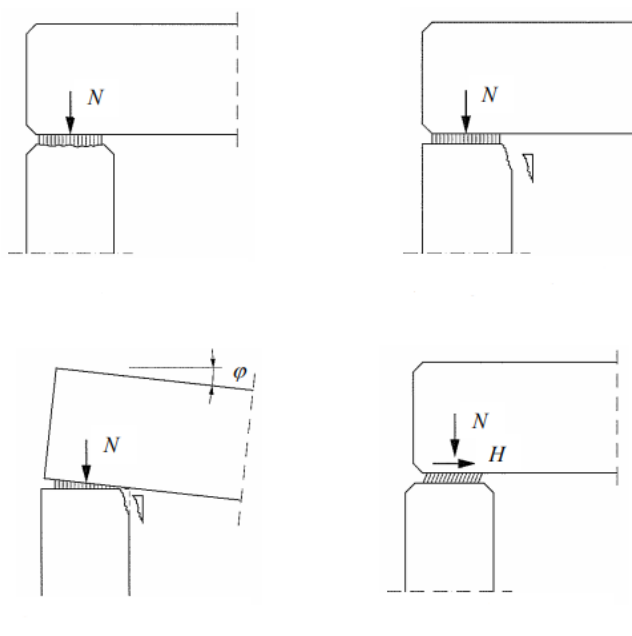


Fig. 2.11 - Requisitos a cumprir pelos aparelhos de apoio [12]

De acordo com a secção 10.9.5 do Eurocódigo 2 [15], que diz respeito à conceção e detalhes dos aparelhos de apoio, estes devem ser dimensionados de modo a assegurar um posicionamento adequado, tendo em conta as tolerâncias de montagem e de fabrico, conforme o ilustrado na Fig. 2.12.

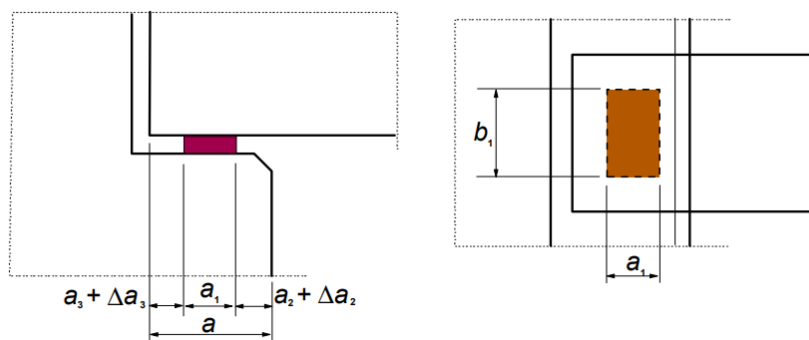


Fig. 2.12 - Exemplo de aparelhos de apoio e definições [15]

Em que:

a_1 é o comprimento útil do apoio, e não deve ser inferior ao indicado no Quadro 2.1;

a_2 é a distância considerada ineficaz a partir da face do elemento de apoio (Quadro 2.2);

a_3 é a distância similar para o elemento apoiado (Quadro 2.3);

Δa_2 é a tolerância para a distância entre as faces dos elementos de apoio (Quadro 2.4);

Δa_3 é a tolerância para o comprimento do elemento apoiado, $\Delta a_3 = l_n/2500$, sendo l_n o comprimento do elemento.

Quadro 2.1 - Valor mínimo a_1 de em mm [15]

Pressão localizada relativa, σ_{Ed} / f_{cd}	$\leq 0,15$	0,15 - 0,4	$> 0,4$
Apoios lineares (pavimentos, coberturas)	25	30	40
Pavimentos nervurados e madres	55	70	80
Apoios concentrados (vigas)	90	110	140

Quadro 2.2 - Distância a_2 (mm) considerada como ineficaz a partir da face do elemento de apoio

Nos casos (-) deverá utilizar-se um enchimento de betão [15]

Material e tipo de apoio	σ_{Ed} / f_{cd}	$\leq 0,15$	0,15 - 0,4	$> 0,4$
Aço	linear	0	0	10
	concentrado	5	10	15
Betão armado $\geq$ C30	linear	5	10	15
	concentrado	10	15	25
Betão simples e betão armado $<$ C30	linear	10	15	25
	concentrado	20	25	35
Alvenaria	linear	10	15	(-)
	concentrada	20	25	(-)

Quadro 2.3 - Distância a_3 (mm) considerada como ineficaz a partir da face do elemento de apoio [15]

Pormenorização da armadura	Apoio	
	Linear	Concentrado
Varões contínuos sobre o apoio (com ou sem encastramento)	0	0
Varões retos, laços horizontais, junto à extremidade do elemento	5	15, mas não inferior ao recobrimento de betão na extremidade
Armaduras de pré-esforço e varões de espera	5	15
Laço vertical	15	recobrimento de betão na extremidade + raio interior de dobragem

Quadro 2.4 - Tolerância Δa_2 para a distância livre entre as faces dos elementos do apoio

l = comprimento do vão [15]

Material do apoio	Δa_2
-------------------	--------------

Aço ou betão prefabricado	$10 \text{ mm} \leq l/1200 \leq 30 \text{ mm}$
Alvenaria ou betão betonado <i>in situ</i>	$15 \text{ mm} \leq l/1200 + 5 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm}$

Em 2.4.1 referiu-se que os pilares podem exibir consolas curtas de forma trapezoidal ou retangular, que têm como principal função suportar as vigas. O anexo J do Eurocódigo 2 [15], sugere modelos de escoras e tirantes para as ligações viga-pilar e as respetivas disposições construtivas de uma consola curta, representadas na Fig. 2.13.

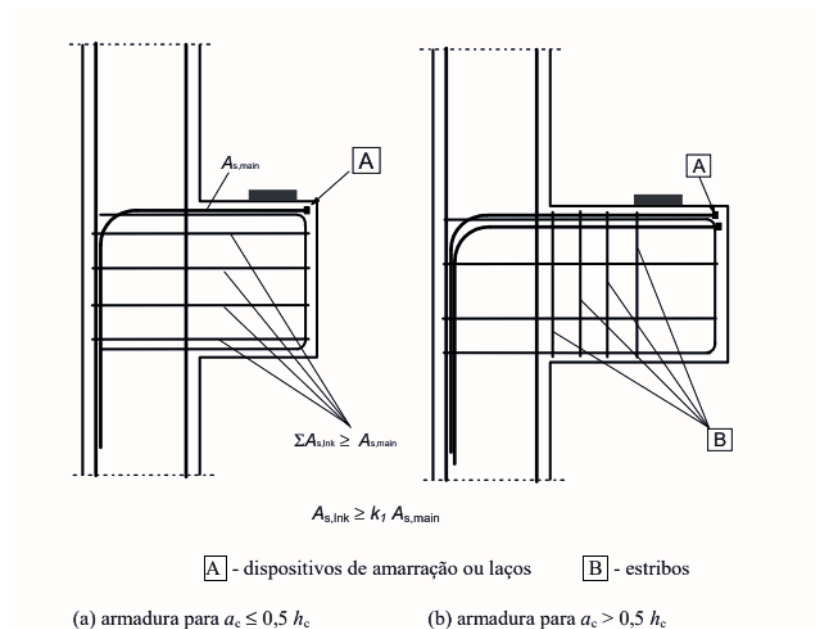


Fig. 2.13 - Pormenorização das armaduras de consolas curtas [15]

As consolas curtas referem-se a elementos estruturais que não podem ser analisados através de métodos com base na teoria das peças lineares, uma vez que não se verifica uma distribuição linear de extensões em determinadas regiões, designadas de regiões de descontinuidade. Como tal, recorre-se a modelos de escoras e tirantes para determinar as suas tensões e esforços.

Estes elementos estruturais podem ser idealizados como treliças, constituídas por escoras que representam campos de tensão de compressão no betão, e por tirantes que seguem a direção das armaduras. Num modelo de escoras e tirantes, as forças em cada uns dos elementos devem ser determinadas, para o estado limite último, através do equilíbrio com as forças aplicadas [15].

A sequência de aplicação do método é a seguinte:

- Identificação da zona de descontinuidade;
- Estabelecimento do equilíbrio de forças exteriores;
- Identificação do “caminho das forças” ou definição do modelo com base nas trajetórias das tensões;
- Determinar as forças de compressão e de tração, através do método dos nós, por exemplo;

- Dimensionar armadura nos tirantes;
- E, por fim, verificar a segurança nos nós e nas escoras.

Na Fig. 2.14 estão representados o esquema de armaduras, os fluxos de tensões e o modelo de escoras e tirantes de um pilar com consola curta, respetivamente.

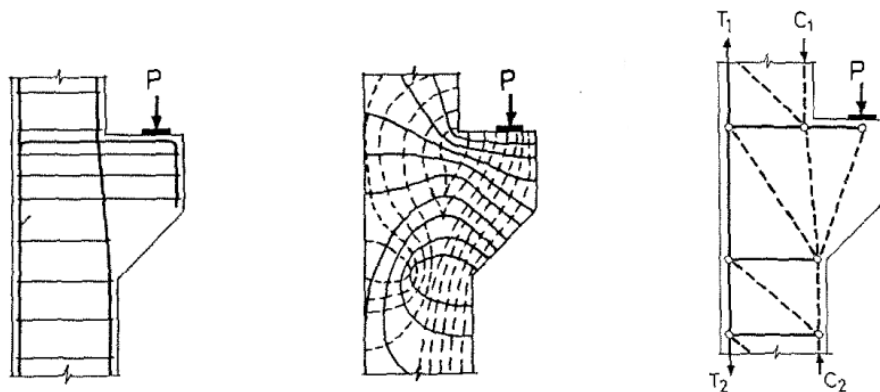


Fig. 2.14 - Modelo de escoras e tirantes para uma consola curta [16]

2.6. SISTEMAS CONSTRUTIVOS

No que se refere à indústria da pré-fabricação, existe um número elevado de sistemas construtivos, dos quais se destacam os sistemas porticados (Fig. 2.15), sistemas em parede (Fig. 2.16) e os sistemas mistos pórticos-paredes.

A presente dissertação centra-se nos edifícios industriais pré-fabricados, onde os sistemas mais comuns são os porticados, constituídos por elementos lineares, isto é, pilares encastrados na base e vigas rotuladas nas extremidades. Geralmente, são utilizados quando se pretende alcançar grandes vãos e espaços abertos sem ser necessário a introdução de paredes [9].

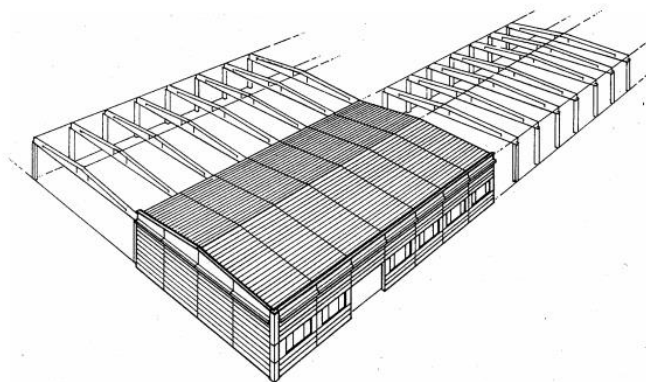


Fig. 2.15 - Sistema porticado pré-fabricado [9]

Por outro lado, quando uma estrutura atinge uma determinada altura, deixa de ser possível transferir as cargas verticais e horizontais diretamente dos pilares para as fundações, devido à combinação das deformações de segunda ordem com os momentos da estrutura provenientes da ação do vento, das imperfeições geométricas e das excentricidades das ligações [6], e portanto recorre-se aos sistemas em parede.

Pode distinguir-se dois exemplos de sistemas estruturais em parede, constituído por paredes de fachada ou por paredes divisórias.

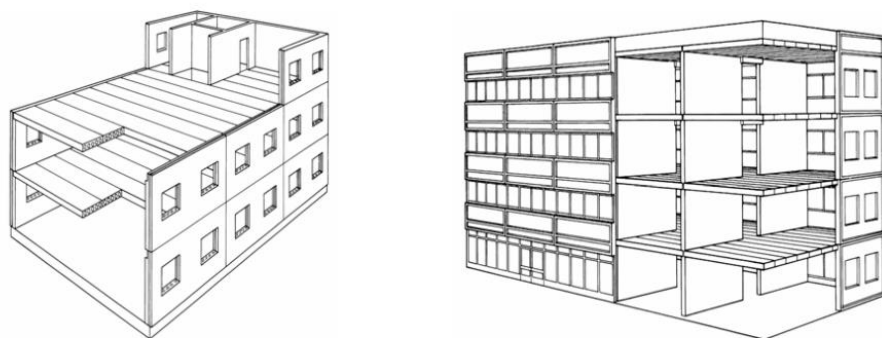


Fig. 2.16 - Exemplos de sistemas estruturais em parede [12]

2.6.1. SISTEMAS PORTICADOS COM VIGAS DE SECÇÃO VARIÁVEL

Os sistemas porticados com vigas de secção variável, tal como está exemplificado na Fig. 2.17, são utilizados em edifícios industriais de um só piso, em geral com vãos entre os 10 e os 40 m. Como é complicado transportar vigas com vãos superiores a 30 m, é comum utilizar-se dois elementos simétricos (Fig. 2.18), que são ligados no local da obra por pós-tensão [17].

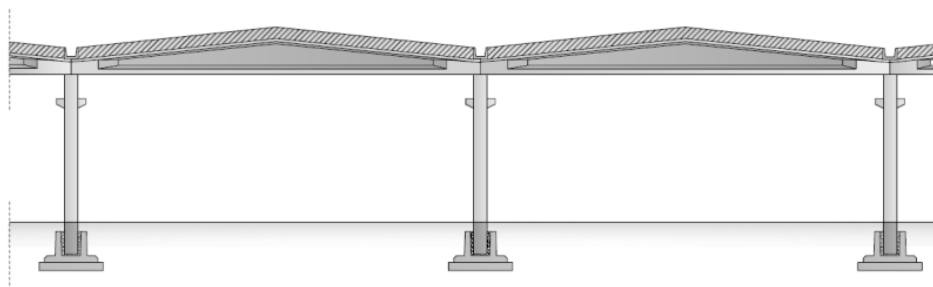


Fig. 2.17 - Exemplo de pórticos com vigas de secção variável [17]

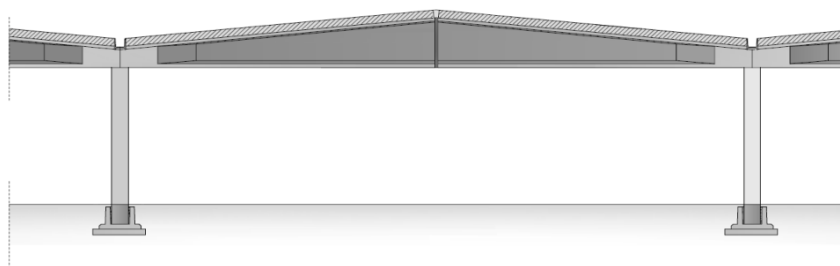


Fig. 2.18 - Exemplo de pórticos constituídos por dois elementos simétricos que representam uma viga de seção variável [17]

2.6.2. SISTEMAS PORTICADOS COM VIGAS DE SECÇÃO CONSTANTE

Analogamente aos sistemas porticados com vigas de seção variável, dispõem-se de sistemas porticados com vigas de seção constante, ilustradas na Fig. 2.19, para edifícios industriais, normalmente com vãos entre os 10 e os 30 m. Este destaca-se do exemplo anterior pela forma como se realiza o transporte das águas pluviais, que neste caso, poderá ser efetuado através de uma laje de betão que as transportam para um tubo de queda [17].

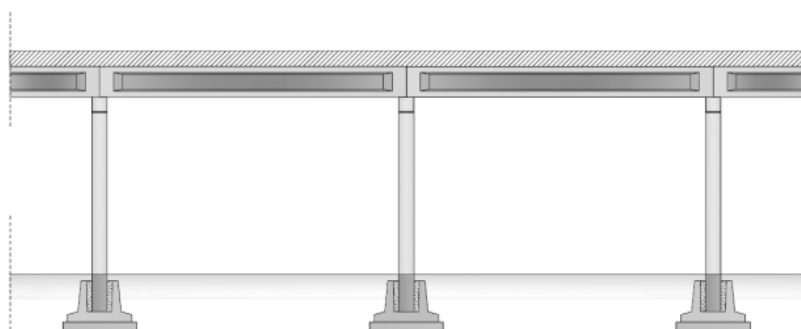


Fig. 2.19 - Exemplo de pórticos com vigas de seção constante [17]

2.7. MODELOS DE ANÁLISE DE ESTRUTURAS

De acordo com a norma europeia NP EN1992-1-1 [15], o objetivo de uma análise estrutural é determinar a distribuição de esforços, extensões e deslocamentos em toda a estrutura. Para isso, recorre-se à análise elástica linear, à análise plástica e à análise não linear.

Na análise elástica linear, o cálculos dos vários elementos baseia-se na Teoria da Elasticidade, seja para o Estado Limite de Utilização (ELS) como para o Estado Limite Último (ELU) [15]. A teoria da elasticidade diz respeito ao comportamento elástico do material, isto é, a capacidade que um material tem de se deformar quando submetido a forças externas, e retornar à sua forma original, sem sofrer danos permanentes.

Esta teoria tem por base as seguintes hipóteses [15]:

- Secções não fendilhadas;
- Relações tensões-extensões lineares;
- Valores médios do módulo de elasticidade.

Os métodos de cálculo baseados na análise plástica só são utilizados nas verificações em relação ao ELU, e centram-se na Teoria da Plasticidade. Por sua vez, a teoria da plasticidade lida com materiais que exibem deformações permanentes, após serem submetidos a forças externas.

Segundo o EC2, os métodos de análise não linear, são utilizados para os estados limites de utilização e para os estados limites últimos, desde que satisfaçam as condições de equilíbrio e de compatibilidade, e se admita um comportamento não linear para os materiais.

2.7.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Uma análise estrutural tem como principal objetivo a determinação da distribuição dos esforços por toda a estrutura. Para determinados elementos e métodos de análise, como o método dos elementos finitos, é mais comum a determinação de tensões, extensões e deslocamentos [15].

O Método dos Elementos Finitos requer que a geometria, os materiais e as ações de uma estrutura sejam conhecidos, e consiste na divisão com vários nós de um elemento laminar, como paredes, lajes e cascas, em elementos de dimensões inferiores, designados de elementos finitos [18].



Fig. 2.20 - Exemplo de uma malha de elementos finitos

Relativamente à geometria da estrutura e aos materiais que a constituem, classifica-se a análise como linear ou não linear. Quando o estudo é feito com base numa geometria inicial indeformada, admite-se que se está perante uma análise linear. Caso contrário, a análise denomina-se por análise não linear geométrica. Ao nível do material, numa análise linear, considera-se que a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não se aplica, está-se perante uma análise não linear material [19].

No que se refere às ações a que uma estrutura está submetida, as análises efetuadas são dinâmicas ou estáticas. Numa análise dinâmica, deve-se considerar as forças de inércia associadas às acelerações de cada um dos componentes da estrutura. Por outro lado, quando é razoável desprezar essas forças de inércia, a análise designa-se estática [19].

3

A VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS PRÉ- FABRICADOS DE BETÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização de edifícios pré-fabricados de betão sofreu um aumento significativo, devido às inúmeras vantagens referidas no Capítulo 2. No entanto, a segurança estrutural, quando sujeitos a atividades sísmicas é uma das suas condicionantes. Assim, é necessário compreender e avaliar o desempenho sísmico deste tipo de estruturas.

Neste contexto, surgem as normas sísmicas que têm como objetivo definir a ação sísmica a utilizar no dimensionamento de uma estrutura. Em Portugal, destaca-se o sismo devastador de 1755, em Lisboa, que provocou uma perda avassaladora de edifícios e vidas humanas. Este evento sísmico realça a importância de uma legislação adequada, de forma a mitigar os seus impactos.

3.2. PRINCIPAIS DANOS NAS VIGAS E NOS PILARES PRÉ-FABRICADOS

A inspeção dos edifícios pré-fabricados, após a ocorrência de sismos, em zonas sísmicamente ativas como Espanha, Turquia e Itália, foi possível identificar as suas fragilidades. Nos sismos recentes, observou-se que estas estruturas evidenciavam um mau desempenho sísmico, com danos nos elementos estruturais e não estruturais. Os principais danos destacam-se ao nível dos pilares (Fig. 3.1), vigas e das ligações entre os dois elementos [20, 21]:

- Desenvolvimento de uma rótula plástica na base dos pilares;
- Rotura estrutural em pilares curtos;
- Rotura na zona superior dos pilares [20].



Fig. 3.1 - Danos em pilares pré-fabricados após a ocorrência de um sismo [20]

Segundo Liberatore [22], os danos locais mais comuns no topo dos pilares estão relacionados com o esmagamento do betão que está a apoiar diretamente a viga, e com a falha estrutural da consola que restringe lateralmente a viga.

O esmagamento do betão deve-se à quantidade insuficiente de recobrimento ou à inexistência de um aparelho de apoio, como o neoprene, na interface dos dois elementos. Por outro lado, no segundo caso, o deslocamento entre a viga e o pilar excede o comprimento disponível e leva à queda da viga, o que pode ser consequência da ausência de uma ligação adequada entre o pilar e a viga [20, 22].

Quando sujeitas a eventos sísmicos, as ligações podem ter um comportamento linear ou não linear. No entanto, a maior parte das estruturas pré-fabricadas, são dimensionadas para apresentarem um comportamento não linear durante um sismo, que depende do comportamento das ligações,:

- Ligações equivalentes a monolíticas, que permitem a rotação na região onde estão localizadas rótulas plásticas;

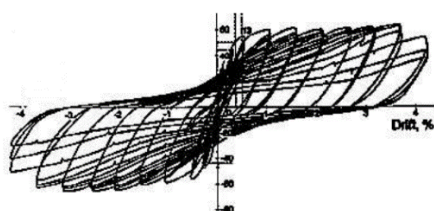


Fig. 3.2 - Resposta de uma estrutura com ligações monolíticas a um ensaio cíclico [23]

- Ligações articuladas, que permitem rotações através da abertura da junta;

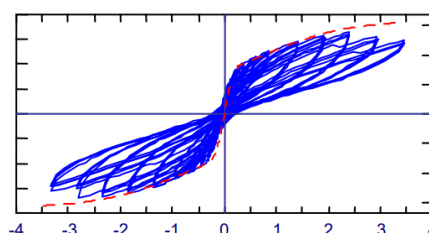


Fig. 3.3 - Resposta de uma estrutura com ligações articuladas a um ensaio cíclico [23]

- Ligações híbridas [23]

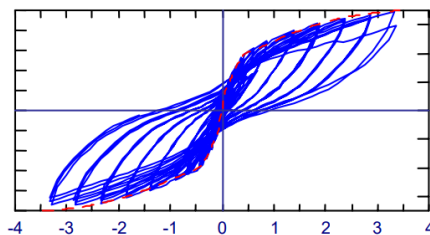


Fig. 3.4 - Resposta de uma estrutura com ligações híbridas a um ensaio cíclico [23]

De acordo com a norma EN 1998-1 [24], a ligação “viga-pilar” deve ser dimensionada de acordo com o mecanismo “Pilar forte-Viga fraca”, que visa garantir que a capacidade resistente dos pilares é superior à das vigas, isto é, a localização de rótulas plásticas dá-se nas extremidades das vigas [22, 24, 25]. É importante para promover um comportamento sísmico mais controlado e dúctil, reduzindo o risco de colapso durante eventos sísmicos.

3.3. NORMAS SÍSMICAS

A 31 de maio de 1958, surgiu o Decreto-Lei nº41658, também designado por Regulamento de Segurança das Construções contra os Sismos (RSCCS), que visava “evitar a ruína das construções em consequência de abalos sísmicos, procurando assim garantir a segurança de pessoas e bens”. O território continental, bem como os arquipélagos dos Açores e da Madeira, passaram a dividir-se em três zonas, A, B e C, com forte, média e fraco risco sísmico, respetivamente.

Em 1983, elaborou-se duas novas regulamentações, o Regulamento de Segurança e Ações (RSA) [26] e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) [27]. O RSA aborda as regras gerais para a verificação da segurança estrutural de edificações e pontes, assim como a definição e quantificação das ações que devem ser consideradas [26]. Por sua vez, o REBAP, estabelece as regras a serem seguidas durante projeto e na execução de estruturas de betão armado e de betão pré-esforçado, tendo como base os critérios gerais de segurança definidos no RSA [27].

A primeira geração dos Eurocódigos apareceu na década de 80, iniciativa da Comissão da Comunidade Europeia juntamente com uma Comissão Diretiva, constituída por representantes dos Estados-Membros [24]. De todos os Eurocódigos Estruturais, a questão fundamental do Eurocódigo 8 (EC8) é a definição da ação sísmica.

3.4. EUROCÓDIGO 8 -2010

Esta norma europeia, divide-se em 6 partes focadas no projeto de estruturas para resistência aos sismos, mas a presente dissertação detalha apenas os fundamentos da parte 1, referentes às regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios.

O Eurocódigo 8 tem como finalidade assegurar, em caso de atividade sísmica, que as vidas humanas são protegidas, os danos são limitados, e as estruturas importantes para a proteção civil se mantêm operacionais [24].

Deste modo, as estruturas, quando dimensionadas, têm de cumprir dois requisitos fundamentais de desempenho: o de não ocorrência de colapso e o de limitação de danos. O primeiro diz que uma estrutura deve resistir à ação sísmica de projeto, sem colapsar local ou globalmente, mantendo assim sua integridade estrutural e uma capacidade de carga residual, após eventos sísmicos. O segundo diz respeito a uma ação sísmica cuja probabilidade de ocorrência é maior do que a da ação sísmica de projeto, ou seja, com um período de retorno inferior, à qual a estrutura deve resistir sem experienciar danos e limitações de utilização.

3.4.1. CONDIÇÕES DO TERRENO

Um aspeto importante definido no Eurocódigo 8 e essencial para a determinação da ação sísmica é a natureza do terreno de fundação. Deve ser sempre garantido que não existem riscos de rotura do terreno, de instabilização de taludes e de assentamentos permanentes provocados por liquefação ou aumento da compacidade do solo no caso de ocorrência de eventos sísmicos.

Como tal, e para a sua classificação, deve realizar-se estudos de caracterização geotécnica como o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) para determinar o número de pancadas necessárias para penetrar 30cm de solo, N_{SPT} , e ensaios de medição de velocidade média das ondas de corte, $v_{s,30}$.

O Eurocódigo 8 sugere que o terreno seja classificado de acordo com a velocidade média das ondas de corte, e, só caso não seja possível, pelo valor do N_{SPT} .

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (3.1)$$

Onde h_i e v_i representam a espessura da camada i num total de N existentes e a velocidade das ondas de corte na camada i num total de N existentes, respetivamente.

Quadro 3.1 - Tipos de terreno [24]

Tipo de Terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (pancadas/30 cm)	c_u (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 - 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compactada ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros	180 - 360	15 – 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de v_s do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s			
S_1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ($PI > 40$) e um elevado teor de água	< 100 (indicativo)	-	10 - 20
S_2	Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A -E ou S_1			

3.4.2. ZONAS SÍSMICAS

Para uma definição mais precisa da ação sísmica, as autoridades nacionais dividiram o território nacional em diferentes zonas sísmicas, para os dois tipos de ações que existem, o tipo 1 e o tipo 2, conforme demonstrado na Fig. 3.5.

Em relação à ação sísmica do tipo 2, o tipo 1 tem uma duração maior e uma distância focal menor. A sismicidade de cada local é caracterizada pelo valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A, a_{gR} , tabelados no Quadro 3.2. No arquipélago da Madeira, considera-se a ação sísmica tipo 1, enquanto no arquipélago dos Açores considera-se a ação sísmica tipo 2.

Quadro 3.2 - Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s^2) nas várias zonas sísmicas [24]

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

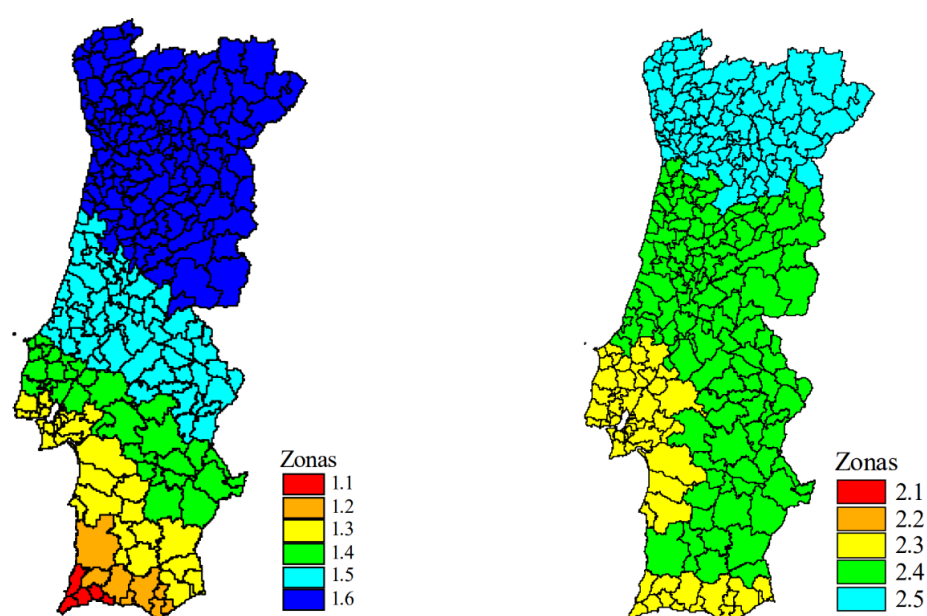


Fig. 3.5 - Zonamento sísmico em Portugal Continental [24]

3.4.3. CLASSES DE IMPORTÂNCIA E COEFICIENTES DE IMPORTÂNCIA

Os edifícios classificam-se em 4 classes de importância distintas de acordo com: as consequências de um evento sísmico em termos de vidas humanas, a sua importância para a proteção civil e as consequências socioeconómicas (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Classes de importância para os edifícios [24]

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

O valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A, a_g , calcula-se multiplicando a_{gR} por γ_I , designado de coeficiente de importância. O Anexo Nacional do EC8 especifica os valores para os coeficientes de importância em função da classe de importância do edifício e da ação sísmica, e estão representados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Coeficientes de importância, γ_I

Classe de Importância	Ação sísmica Tipo 1	Ação sísmica Tipo 2	
		Continente	Açores
I	0,65	0,75	0,85
II	1,00	1,00	1,00
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,50	1,34

3.4.4. ESPETRO DE RESPOSTA ELÁSTICA VS ESPETRO DE RESPOSTA DE CÁLCULO

Os espectros de resposta representam a resposta máxima da estrutura durante um sismo, e dependem do tipo de terreno, da sismicidade do local e do amortecimento.

Para as duas componentes horizontais da ação sísmica, ortogonais entre si, utiliza-se o espectro de resposta elástica horizontal. Por sua vez, recorre-se ao espectro de resposta elástica vertical para representar a componente vertical da ação sísmica.

O espectro de resposta elástica horizontal é definido pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (3.2)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (3.3)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (3.4)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (3.5)$$

Em que:

$S_e(T)$ espectro de resposta elástica;

T período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade;

a_g valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A;

T_B limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_C limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_D valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S coeficiente do solo;

η coeficiente de correção do amortecimento, com valor de referência $\eta = 1$ para 5 % de amortecimento viscoso.

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (3.6)$$

Os valores dos períodos T_B , T_C e T_D e o coeficiente do solo, S , dependem da classe do terreno.

Quadro 3.5 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espectros de resposta elástica de tipo 1 [24]

Tipo de terreno	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Quadro 3.6 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espectros de resposta elástica de tipo 2 [24]

Tipo de terreno	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

O espectro de resposta elástica vertical é definido pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_g \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right] \quad (3.7)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_g \cdot \eta \cdot 3,0 \quad (3.8)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_g \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (3.9)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_g \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (3.10)$$

Quadro 3.7 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo os espectros de resposta elástica verticais [24]

Espectro	a _{vg} /a _g	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
Tipo 1	0,90	0,05	0,15	1,0
Tipo 2	0,45	0,05	0,15	1,0

Para obter uma aproximação do resultado de uma análise que tenha em consideração o comportamento não linear da estrutura, isto é, a sua capacidade de resistir às ações sísmicas no domínio não linear, o EC8 permite efetuar o cálculo para as estruturas resistirem a ações sísmicas inferiores às que corresponderiam numa resposta elástica linear.

Assim, realiza-se uma análise elástica baseada num espectro de resposta reduzido por um coeficiente de comportamento, q, o espectro de cálculo. O coeficiente de comportamento, q, será explicado em 3.4.5.

Para as componentes horizontais da ação sísmica, o espectro de cálculo, é definido pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (3.12)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (3.13)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (3.14)$$

Em que:

$S_d(T)$ é o espectro de cálculo;

q é o coeficiente de comportamento;

$\beta = 0,2$ é o coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de cálculo horizontal.

O espectro de cálculo para a componente vertical da ação sísmica, obtém-se através das expressões (3.11) e (3.14), substituindo a_g pelo valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção vertical, a_{vg} , igualando o coeficiente do solo, S , a 1, e adotando um coeficiente de comportamento, q , não inferior a 1,5.

Quadro 3.8 - Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Ação Sísmica Tipo 1 [24]

Tipo de terreno	$S_{m\acute{a}x}$	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

Quadro 3.9 - Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Ação Sísmica Tipo 2 [24]

Tipo de terreno	$S_{m\acute{a}x}$	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,28	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

O valor do parâmetro S , para a definição dos espectros de resposta elásticos, deve ser determinado através de:

$$\text{Para } a_g \leq 1 \text{ m/s}^2 \quad S = S_{max} \quad (3.15)$$

$$\text{Para } 1 \text{ m/s}^2 < a_g < 4 \text{ m/s}^2 \quad S = S_{max} - \frac{S_{max} - 1}{3} (a_g - 1) \quad (3.16)$$

$$\text{Para } a_g \geq 4 \text{ m/s}^2 \quad S = 1,0 \quad (3.17)$$

3.4.5. COEFICIENTES DE COMPORTAMENTO

Na conceção das estruturas de betão, deve-se assegurar uma adequada capacidade de dissipação de energia por parte da estrutura, sem reduzir a sua resistência quando submetida às ações existentes. Assim, o EC8 define três classes de ductilidade:

- DCL, classe de ductilidade baixa;
- DCM, classe de ductilidade média;
- DCH, classe de ductilidade alta.

O valor do coeficiente de comportamento, q , para as ações sísmicas horizontais é dado pela seguinte expressão:

$$q = q_0 k_w \geq 1,5 \quad (3.18)$$

Em que:

q_0 é o valor básico do coeficiente de comportamento (Quadro 3.8);

k_w é o coeficiente que reflete o modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes.

Quadro 3.10 - Valor básico do coeficiente de comportamento q_0 [24]

Tipo estrutural	DCM	DCH
Sistema porticado, sistema misto, sistema de paredes acopladas	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Sistema de paredes não acopladas	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Sistema torsionalmente flexível	2,0	3,0
Sistema de pêndulo invertido	1,5	2,0

Em que:

α_1 é o valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para ser atingida pela primeira vez a resistência à flexão em qualquer elemento da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras ações de cálculo;

α_u é o valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para formar rótulas plásticas num número de secções suficiente para provocar a instabilidade global da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras ações de cálculo.

Para sistemas porticados de um só piso regulares em planta, utiliza $\alpha_u/\alpha_1=1,1$ e $k_w=1,00$.

O EC8 apresenta uma secção direcionada para estruturas pré-fabricadas de betão. O valor do coeficiente de comportamento para estruturas pré-fabricadas, q_p , pode ser calculado através da expressão seguinte:

$$q_p = k_p \cdot q \quad (3.19)$$

Em que:

q é o coeficiente de comportamento determinado de acordo com a expressão (3.18)

k_p é o fator de redução função da capacidade de dissipação de energia da estrutura pré-fabricada

(Na presente dissertação, por simplificação, optou-se por considerar $k_p = 1$).

3.4.6. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Para determinar os esforços de uma estrutura, deve-se ter em consideração as massas associadas a todas as forças gravíticas atuantes. Deste modo, a ação sísmica deve ser combinada com outras ações da seguinte maneira:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,I} \cdot Q_{k,i} \quad (3.20)$$

Em que:

$G_{k,j}$ é o valor característico da ação permanente j ;

$Q_{k,i}$ é o valor característico da ação variável i .

$\psi_{E,I}$ é o coeficiente de combinação para a ação variável i (Expressão 3.17);

$$\psi_{E,I} = \varphi \cdot \psi_{2i} \quad (3.21)$$

Em que:

ψ_{2i} é o coeficiente de combinação para o valor quase-permanente da ação variável Q_i , indicados no Anexo A1 da norma EN 1990:2002 [28]

Quadro 3.11 - Valores de φ para calcular $\psi_{E,I}$ [24]

Tipo de ação variável	Piso	φ
Categorias A-C	Cobertura	1,0
	Pisos com ocupações correlacionadas	0,8
	Pisos com ocupações independentes	0,5
Categorias D-F e arquivos		1,0

3.4.7. COMBINAÇÕES DOS EFEITOS DAS COMPONENTES DA AÇÃO SÍSMICA

Quando ocorre um evento sísmico, a força induzida na estrutura atua nas duas direções horizontais, ortogonais entre si. De acordo com o EC8, deve considerar-se que as duas componentes atuam em simultâneo, porém a resposta da estrutura deve ser avaliada individualmente, e o valor máximo de cada efeito poderá ser calculado como a raiz quadrada do somatório dos quadrados dos esforços em cada direção [24].

$$E_{Edx} "+" 0,30 \cdot E_{Edy} \quad (3.22)$$

$$0,30 \cdot E_{Edx} "+" E_{Edy} \quad (3.23)$$

Em que:

"+" significa "a combinar com";

E_{Edx} representa os esforços devidos à aplicação da ação sísmica segundo o eixo horizontal x escolhido para a estrutura;

E_{Edy} representa os esforços devidos à aplicação da mesma ação sísmica segundo o eixo horizontal ortogonal y da estrutura.

Em alternativa, para um método mais rigoroso, pode-se utilizar as três combinações seguintes para o cálculo dos efeitos da ação:

$$E_{Edx} + 0,30 \cdot E_{Edy} + 0,30 \cdot E_{Edz} \quad (3.24)$$

$$0,30 \cdot E_{Edx} + E_{Edy} + 0,30 \cdot E_{Edz} \quad (3.25)$$

$$0,30 \cdot E_{Edx} + 0,30 \cdot E_{Edy} + E_{Edz} \quad (3.26)$$

Em que:

E_{Edz} representa os esforços devidos à aplicação da componente vertical da ação sísmica de cálculo.

4

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS 2D SIMPLIFICADOS DE BARRAS E MODELOS COM ELEMENTOS FINITOS

4.1. INTRODUÇÃO

Os modelos simplificados requerem menos tempo e recursos para serem analisados em comparação com os modelos de elementos finitos, permitindo aos engenheiros projetistas realizar avaliações reais e eficientes sem comprometer a precisão dos resultados.

Deste modo, este capítulo foca-se na modelação de vários pórticos pré-fabricados de betão, com o objetivo de perceber o melhor modelo para representar a distribuição de esforços entre um pilar e uma viga adjacentes, dando particular atenção às abordagens habituais para a modelação destas ligações.

Numa primeira fase, realizou-se este estudo para um pórtico com uma viga plana de secção transversal em “I”, e de seguida, para um pórtico com uma viga de secção e inércia variáveis, também designada de viga delta. Além dos modelos simplificados, foram elaborados modelos de referência para efeitos de comparação através do método dos elementos finitos.

De acordo com a comparação numérica e experimental realizada em [20], concluiu-se que um modelo com ligações rotuladas evidencia um comportamento semelhante ao de um modelo físico com ferrolhos e neoprene. Logo, nestes casos, é adequado considerar ligações rotuladas para uma aproximação numérica.

Assim, recorreu-se ao *software* Robot Structural Analysis, para interpretar a influência das opções de modelação nos resultados finais, em termos de deslocamentos e esforços de flexão entre os elementos pré-fabricados viga e pilar, e também na frequência de vibração da estrutura.

O programa de cálculo automático permite realizar análises estáticas e dinâmicas de diversos modelos estruturais, sejam ele bi ou tridimensionais, e produz diagramas e mapas que traduzem o comportamento da estrutura. No que diz respeito à análise dinâmica, utiliza-se a análise modal e os espectros de resposta de cálculo presentes no Eucódigo 8 – Parte 1 [24]. Além disso, possibilita a transferência de dados entre outros softwares, como o AutoCAD, também utilizado na presente dissertação (Quadros 4.1 a 4.4).

Os modelos são caracterizados por três objetos diferentes: nós, barras e painéis. Os nós representam os pontos de interseção das barras e dos painéis existentes no modelo estrutural e têm com função restringir translações e rotações. As barras correspondem aos elementos lineares, como vigas e pilares. E os

painéis correspondem a elementos como lajes e paredes. Todas estas informações estão bem explicadas no manual de utilizador do *software* [29].

4.2. MODELAÇÃO

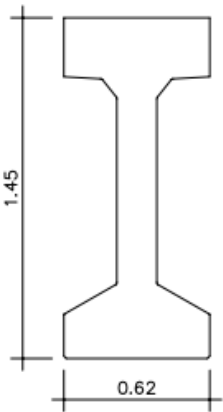
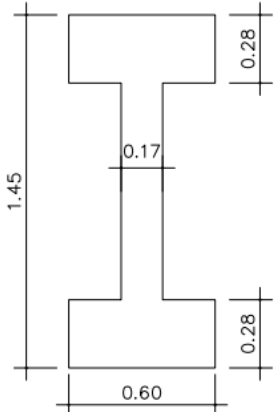
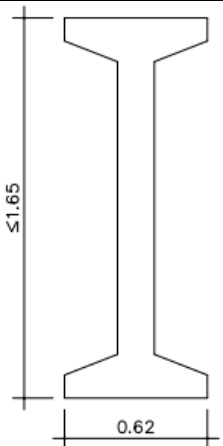
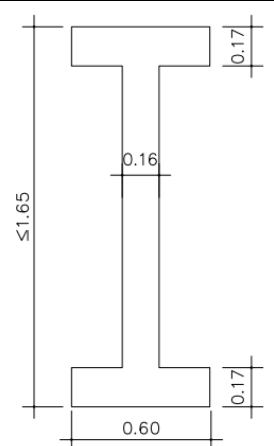
4.2.1. GEOMETRIA

A tipologia do edifício industrial em estudo, localizado em Lisboa, é caracterizada por ter apenas um piso, com pórticos paralelos, pilares encastrados na base e as vigas simplesmente apoiadas nos pilares.

No que diz respeito à geometria no plano, as propriedades variam dependendo da direção analisada. Numa direção, só existe um vão de 30 metros. Na direção transversal, o número de vãos são três, com 10m cada um. Os eixos principais considerados foi X e Z, horizontal e vertical, respetivamente.

A modelação 2D fez-se na direção X, da viga mais comprida, com pórticos de 30 m de vão, e utilizou-se um betão de elevada resistência, C50/60, muito comum nos pré-fabricados. Em todos os casos, com o objetivo de simplificar a modelação, determinou-se uma secção transversal equivalente para cada viga, mantendo constante o valor da sua inércia.

Quadro 4.1 - Geometria dos pilares e das vigas

Elemento Construtivo	Secção Transversal	Secção utilizada
Pilares	0,6 x 0,5 m ²	-
Viga "I" de Secção Constante		
Viga "I" de Secção Variável		

Como ponto de referência para comparação de resultados, modelaram-se dois pórticos, com elementos finitos, um com vigas de secção constante e outro com vigas de secção variável, onde a ligação entre a viga e o pilar está representada através de um apoio, com características e propriedades idênticas ao de um neoprene. As suas dimensões e localização foram devidamente calculadas, de acordo com o presente em 2.5.1 da presente dissertação e no EC2 [15].

Para desenvolver o modelo de cálculo com recurso a elementos finitos, utilizou-se o modo “Plane Stress Structure Design” presente no programa. Este modo considera 2 graus de liberdade por nó, que correspondem aos deslocamentos no plano bidimensional, isto é, deslocamentos horizontais (U_x) e deslocamentos verticais (U_y).

No Robot, utiliza-se o método de Coons para a geração da malha de elementos finitos, constituídas por elementos quadriláteros de 4 nós, neste caso com dimensões de 0,05 m.

Além dos modelos com elementos finitos, modelaram-se vários pórticos com elementos de barras, que se distinguem pela forma como se delineou a ligação entre os dois elementos construtivos:

- Tipo 1: A ligação é representada por duas rótulas, uma em cada extremidade da viga, e não se considera as excentricidades horizontal e vertical entre o pilar e a viga.
- Tipo 2: Ligação idêntica à do Tipo 1, mas considerando a excentricidade horizontal entre a viga e o pilar.
- Tipo 3: Nesta ligação, teve-se em atenção a excentricidade horizontal entre a viga e o pilar, e a excentricidade vertical do cachorro. Contudo, considerou-se que o eixo da viga está diretamente apoiado no apoio real, desprezando assim a sua excentricidade vertical.
- Tipo 4: Ligação idêntica à do Tipo 4. No entanto, neste caso não se desprezou nenhuma das excentricidades.
- Tipo 5: Neste tipo, introduziu-se uma escora e um tirante na zona do cachorro, cujas suas dimensões e a inclinação da escora foram devidamente calculadas conforme o sugerido no EC2. Esta ideia surgiu após observar a direção das tensões nessa zona, nos elementos finitos, e teve como objetivo perceber se seria uma melhor aproximação.

Esta comparação também permitirá validar a precisão dos modelos simplificados em relação aos modelos de elementos finitos.

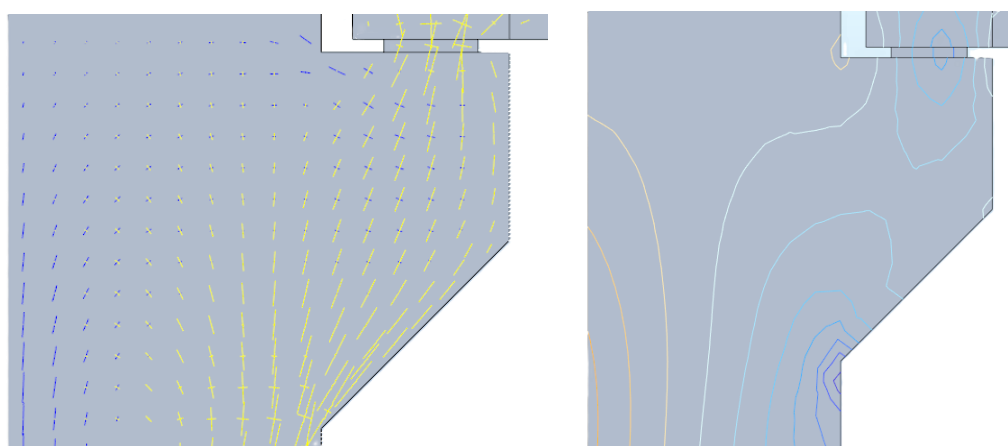


Fig. 4.1 – Direção das tensões principais e isolinhas no cachorro (Robot)

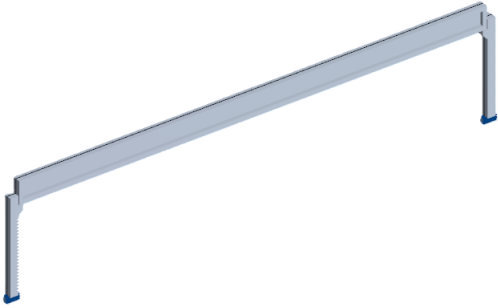
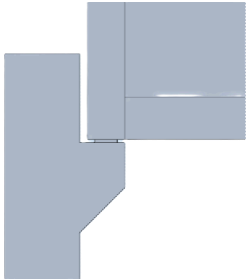
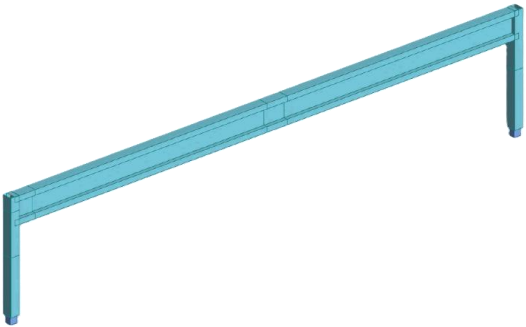
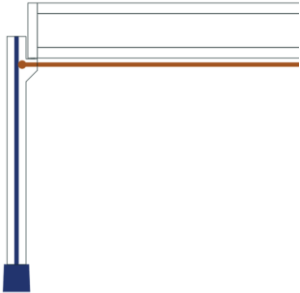
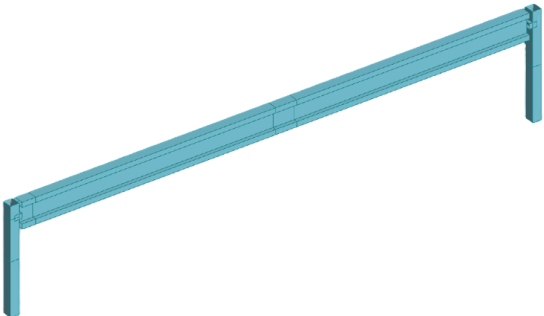
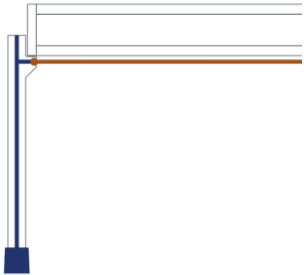
Nos modelos onde os pórticos estão modelados com barras, definiram-se os pilares e as vigas com as secções transversais presentes no Quadro 4.1.

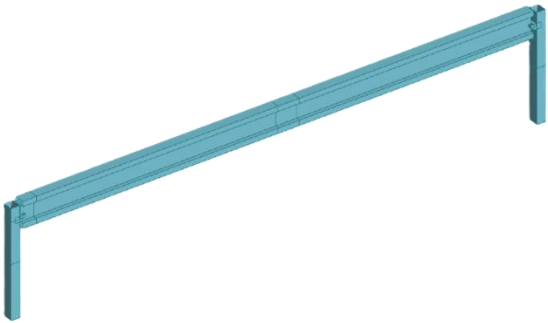
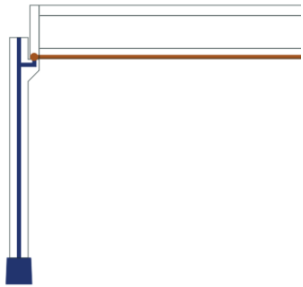
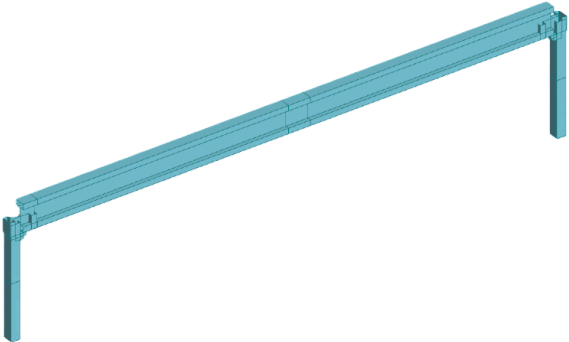
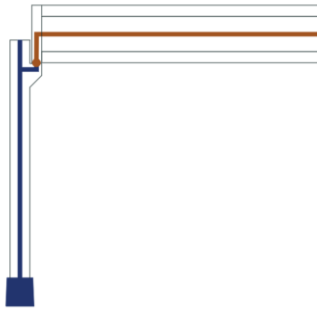
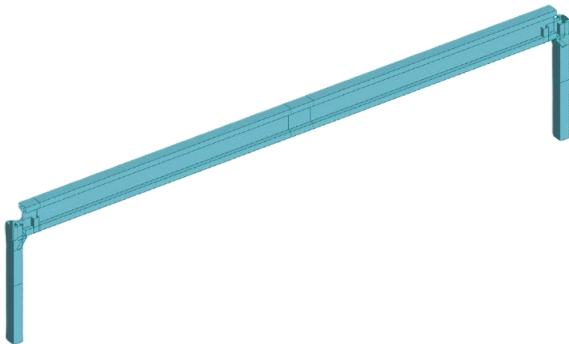
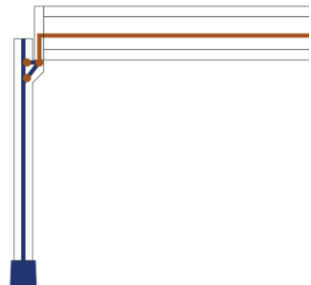
Os Quadros 4.2, 4.3 e 4.4 revelam a geometria dos pórticos formados pelas vigas de secção constante “I” e dos pórticos formados pelas vigas de secção variável “I”, com especial foco na zona da ligação. Na presente dissertação, a designação de “Viga I” refere-se à viga de secção constante, e a designação de “Viga Delta” refere-se à viga de secção variável.

No modelo com elementos finitos, para modelar a viga I, criaram-se 5 painéis:

- Dois com espessura de 60cm, que representam a zona maciça da secção longitudinal da viga I, junto ao apoio.
- Dois com espessura de 60cm e altura de 28cm, que representam os banzos da secção transversal viga I.
- Um com espessura de 17cm, que representa a alma da secção transversal da viga I.

Quadro 4.2 - Pórticos modelados com a viga de secção constante “I”

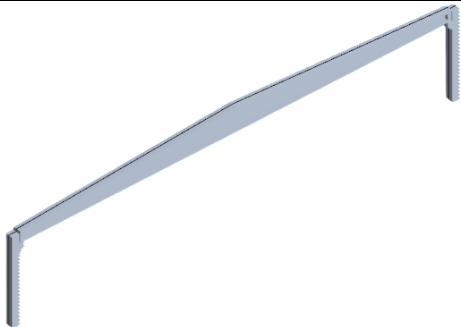
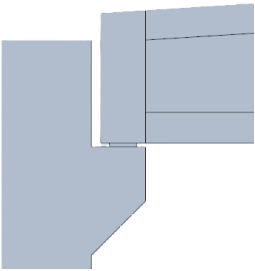
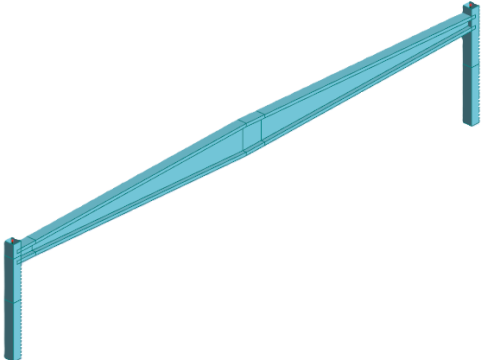
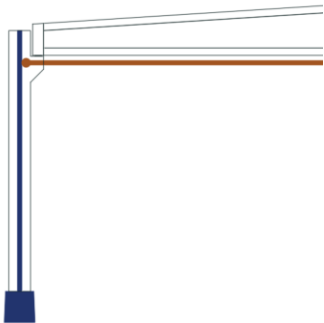
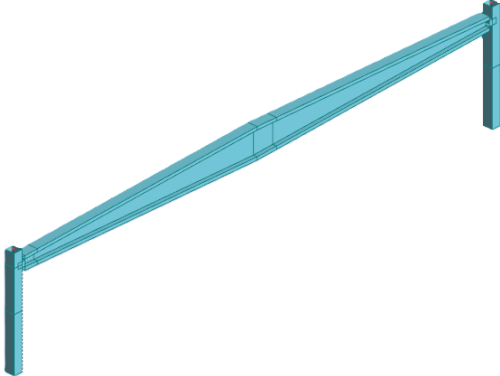
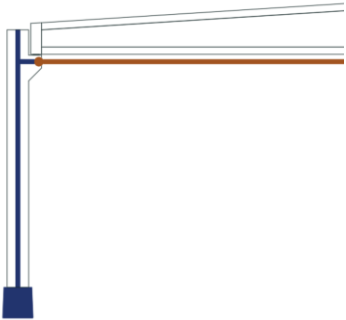
	Pórtico	Ligação
MEF		
Tipo 1		
Tipo 2		

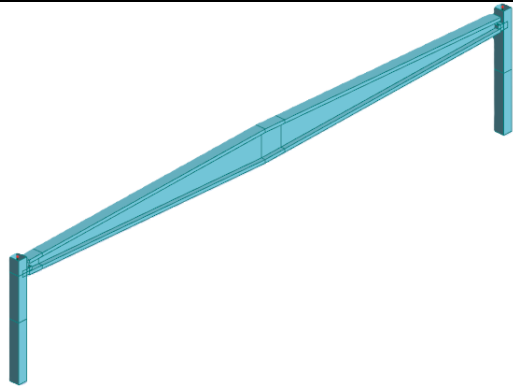
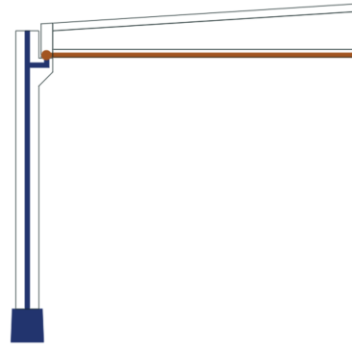
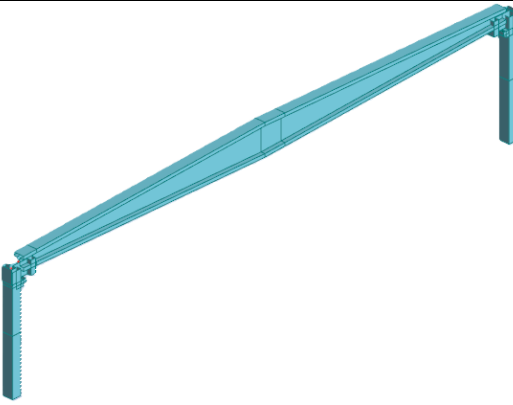
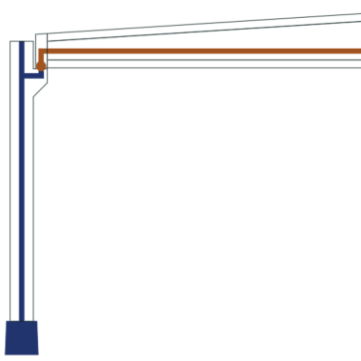
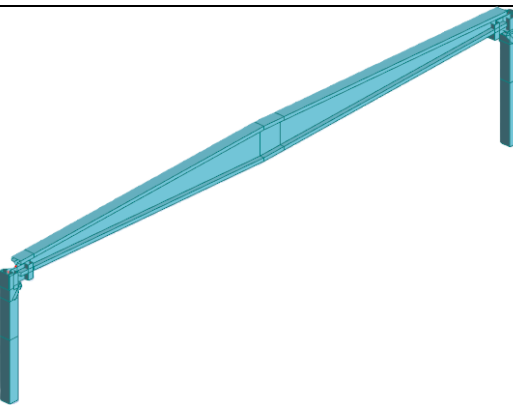
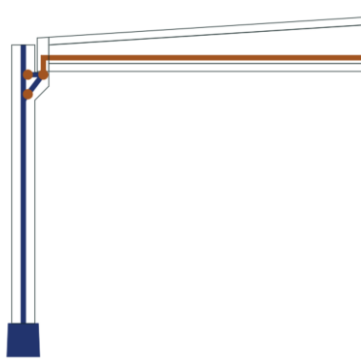
	Pórtico	Ligação
Tipo 3		
Tipo 4		
Tipo 5		

Nos elementos finitos, o processo de modelação da viga delta, com elementos finitos, foi semelhante ao da viga I. A única particularidade é a sua inclinação, isto é, a variação da secção transversal com o comprimento. No entanto, a meio vão, a viga apresenta as características presentes no Quadro 4.1.

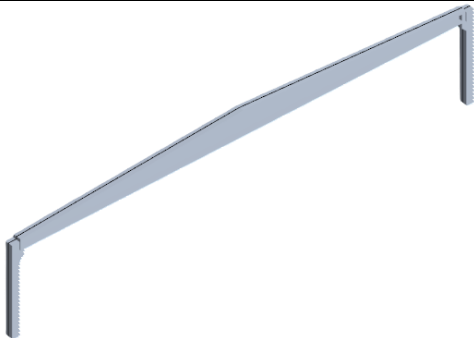
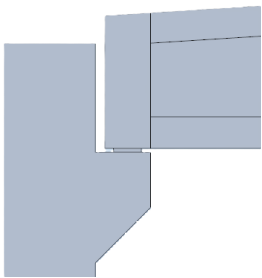
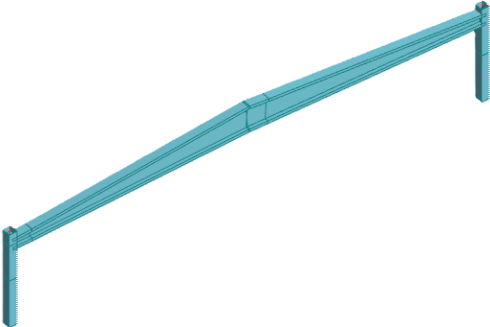
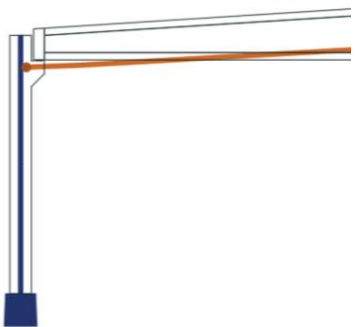
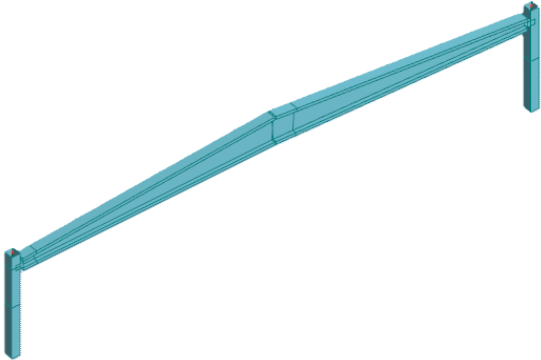
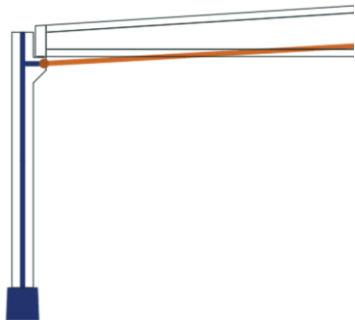
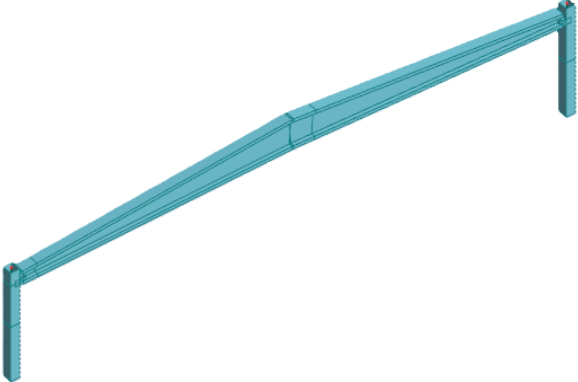
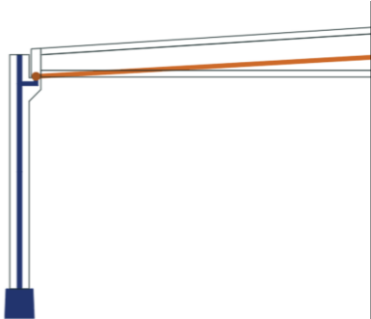
A diferença dos pórticos representados no Quadro 4.3 para os pórticos do Quadro 4.4 está na modelação da viga com barras. No 1º caso, foi modelada com o seu eixo na horizontal, enquanto no 2º caso, modelou-se com o eixo inclinado, de modo que o seu banzo inferior ficasse perfeitamente horizontal. Assim, além de ser possível a comparação com o modelo de referência (MEF), avaliaram-se as diferenças entre os 2 casos, e concluiu-se qual seria o melhor para representar esta tipologia

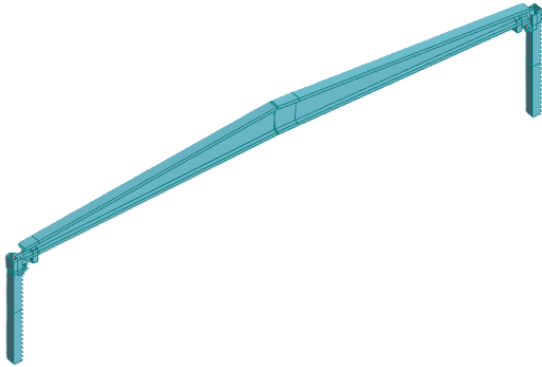
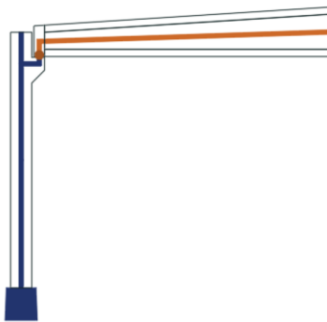
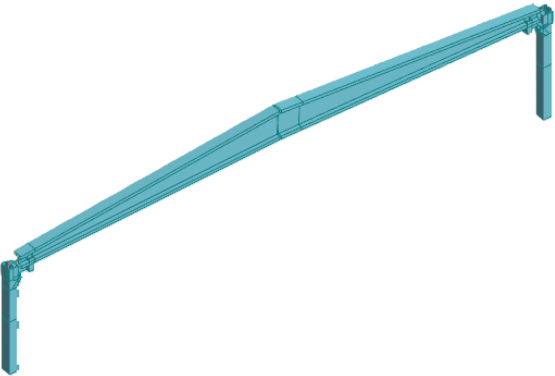
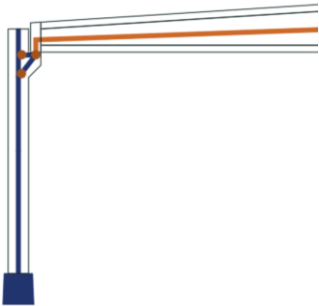
Quadro 4.3 - Pórticos modelados com a viga de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal

	Pórtico	Ligação
MEF		
Tipo 1		
Tipo 2		

	Pórtico	Ligação
Tipo 3		
Tipo 4		
Tipo 5		

Quadro 4.4 - Pórticos modelados com a viga de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado

	Pórtico	Ligação
MEF		
Tipo 1		
Tipo 2		
Tipo 3		

	Pórtico	Ligação
Tipo 4		
Tipo 5		

4.2.2. AÇÕES

No presente estudo, para a determinação dos esforços na estrutura, consideraram-se várias ações, como o peso próprio de cada elemento estrutural, calculado automaticamente pelo software, bem como o peso dos revestimentos, das madres e dos contraventamentos.

Além disso, introduziu-se no programa as ações relativas à utilização edifício, que abrangem as sobrecargas associadas a painéis fotovoltaicos, sobrecargas correntes (EC0) e sobrecargas suspensas, tipicamente utilizadas pela empresa Struconcept, assim como a influência do vento e do sismo.

As ações (Quadro 4.5), quando colocadas no modelo, uma vez que estavam por metro quadrado, foram multiplicadas pela largura de influência do pórtico, 10 metros.

Quadro 4.5 - Valores das ações consideradas

Ações Permanentes		
Peso Próprio		-
Peso dos Revestimentos		RCP1 = 0,20 kN/m ²
Peso das Madres e Contraventamentos		RCP2 = 0,10 kN/m ²
Ações Variáveis		
Sobrecarga	Painéis Fotovoltaicos	SOB1 = 0,15 kN/m ²
	Correntes	SOB2 = 0,40 kN/m ²
	Suspensa	SOB3 = 0,10 kN/m ²

Por sua vez, ação do vento foi quantificada de acordo com prescrito no EC1-1-4 [30], assumindo que o edifício industrial está situado numa faixa costeira com 5km de largura ou a altitudes superiores a 600 m, que pelo Anexo Nacional do EC1, corresponde a uma zona B. Além disso, pertence a zona suburbana, o que corresponde a uma categoria de terreno III. Os restantes parâmetros utilizados para a sua classificação estão presentes no anexo A1 da presente dissertação.

Por último, para quantificar a ação sísmica pelo EC8 [24], foi necessário caracterizar os parâmetros presentes no Quadro 4.6:

Quadro 4.6 - Parâmetros associados à Ação Sísmica

Ação Sísmica		
Localização		Lisboa
Zona Sísmica	Tipo 1	1,3
	Tipo 2	2,3
Aceleração (a_{gr})	Tipo 1	1,5
	Tipo 2	1,7
Tipo de Terreno		B

Ação Sísmica	
Classe de Importância	II
Coeficiente de Comportamento (q)	3,3
Amortecimento (ξ)	5 %

Para a ação sísmica do Tipo 1 e do Tipo 2, e através das expressões 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 obtiveram-se os seguintes espectros de resposta de cálculo:

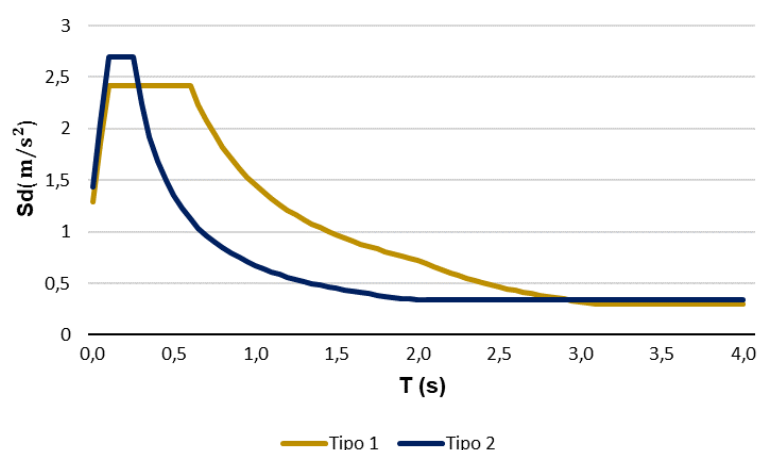


Fig. 4.2 - Espectro de resposta utilizado

4.2.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

A combinação das várias ações que atuam sobre uma estrutura, determinam o seu comportamento ao longo do tempo. Para assegurar a segurança da estrutura a todos os possíveis casos de carga, deve-se seguir as normas regulamentares adequadas, e aplicar-se os coeficientes de segurança recomendados.

Estas combinações devem ser consideradas em relação a dois tipos principais de estados limites: o estado limite último (ELU) e o estado limite de serviço (ELS). No estado limite último, as cargas permanentes e variáveis foram majoradas, através dos coeficientes parciais de segurança de 1,35 e 1,5, respetivamente. Por outro lado, no estado limite de serviço, utilizou-se a combinação quase permanente de ações.

De acordo com o EC0, ao considerar que a estrutura diz respeito a uma Categoria H, os coeficientes associados a cada ação são os seguintes:

Quadro 4.7 - Coeficientes de Combinação

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas	0	0	0
Vento	0,6	0,2	0

A ação sísmica da estrutura, seja o Tipo 1 como o Tipo 2, na direção X e Z foi combinada com as restantes ações. Considerou-se um coeficiente de combinação, ψ_E , igual a 1 para cargas permanentes, e igual a 0 para cargas variáveis ($\varphi=1,0$), de acordo com o referido em 3.4.6. Deste modo, as expressões resultantes dessa combinação foram as seguintes:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + E_{Edx} + 0,30 \cdot E_{Edz} \quad (4.1)$$

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + E_{Edx} - 0,30 \cdot E_{Edz} \quad (4.2)$$

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + 0,30 \cdot E_{Edx} + E_{Edz} \quad (4.3)$$

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} - 0,30 \cdot E_{Edx} + E_{Edz} \quad (4.4)$$

As restantes combinações estão apresentadas no anexo A2 da presente dissertação.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta secção, apresenta-se a resposta da estrutura às ações consideradas, para cada um dos modelos estudados. Os objetivos, foram compreender qual dos modelos, quando sujeitos às diversas combinações de ações, demonstram uma resposta mais próxima da realidade, e como é que a forma de modelar a estrutura e a ligação entre os elementos construtivos, influencia a distribuição dos esforços ao longo da estrutura.

Para facilitar a interpretação de resultados obtidos, foram selecionadas três zonas específicas da estrutura, consideradas de elevada importância. A primeira zona escolhida corresponde ao meio vão da viga, um ponto crítico para avaliação de deformações máximas e esforços de flexão. A segunda zona diz respeito a uma área altamente solicitada no pilar, o cachorro. A terceira zona de interesse situa-se na base do pilar, um ponto crucial para análise de esforços axiais e momentos fletores.

Devido à grande extensão de resultados obtidos, decidiu-se destacar e comparar as deformações e os esforços resultantes apenas para três combinações específicas de ações (Anexo A1), que demonstravam as diferenças ou semelhanças mais significativas, dependendo do modelo analisado.

- ULS_SOB3: Combinação apenas de cargas gravíticas (peso próprio, restantes cargas permanentes e sobrecargas) em estado limite último, que tem como ação variável base (AVB) a sobrecarga 3.
- ELS: Combinação para o estado limite de serviço.
- Ação Sísmica Tipo 1 – 1*X-0,3*Z: Combinação da ação sísmica do Tipo 1 com cargas gravíticas.

Para os pórticos constituídos pelas vigas delta, além das comparações e análises realizadas em relação ao MEF, foram também avaliadas as diferenças entre os pórticos compostos por vigas modeladas com o eixo horizontal e aqueles com vigas modeladas com o eixo inclinado.

Como tal, na combinação de ações gravíticas em ELU, foram analisados os momentos fletores ao longo das vigas e dos pilares, com especial atenção às zonas 1, 2 e 3. Na combinação para o ELS, o foco incidiu sobre os deslocamentos ao longo das vigas. Por fim, na combinação sísmica, destacaram-se as

forças de corte na base dos pilares (zona 3) e os deslocamentos horizontais ao longo do seu comprimento. Além disso, realizou-se uma análise modal em cada modelo, permitindo a análise dos modos de vibração de cada estrutura e as respetivas frequências naturais.

A obtenção dos esforços de flexão nos modelos com elementos finitos foi realizada de forma analítica (Fig. 4.3), com base nas tensões calculadas pelo programa, obedecendo à hipótese de Bernoulli das secções planas. Isto é, o diagrama de tensões varia linearmente ao longo da profundidade da secção transversal, seja da viga como do pilar, o que permite calcular os momentos flectores correspondentes, e não é válido para zonas próximas dos apoios (cachorros) e restantes zonas de descontinuidade.

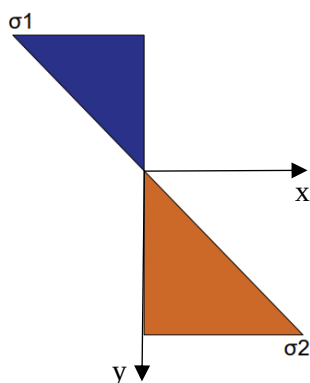


Fig. 4.3 - Diagrama de tensões lineares representativo

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (4.5)$$

$$\sigma_M = \sigma_1 - \sigma_N \quad (4.6)$$

$$\sigma_M = \frac{M}{I_x} \times y \quad (4.7)$$

Em que:

σ_1 é a tensão na fibra superior.

σ_2 é a tensão na fibra inferior.

σ_N tensão proveniente da contribuição do esforço axial.

σ_M é a tensão proveniente da contribuição do momento fletor na fibra superior.

M é o valor do momento fletor.

I_x é o momento de Inércia em relação ao eixo do x.

y é a distância da fibra superior ao centro de gravidade da secção.

4.3.1. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO ULS_SOB3

Para a combinação ULS_SOB3, procedeu-se a uma análise detalhada das envolventes dos momentos fletores das vigas de todos os tipos de pórticos deste estudo, inclusive do MEF, que permite observar como é que a diferente abordagem na representação da ligação influencia a distribuição dos momentos fletores ao longo do comprimento da viga.

4.3.1.1. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Constante "I"

O Tipo 1 é o modelo mais simplificado de todos e não representa de forma adequada os esforços máximos que ocorrem em zonas críticas da viga, nomeadamente nas extremidades e no meio vão. Este resultado já era esperado devido às suas condições de apoio. Na zona de ligação entre a viga e o pilar, o facto do momento fletor ser nulo pode levar ao subdimensionamento dos elementos estruturais e comprometer a segurança da estrutura. Em comparação com os outros, o Tipo 1 é o que apresenta o valor de momento fletor no meio vão mais discrepante em relação ao MEF.

Em comparação com o Tipo 1, o Tipo 2 introduz a excentricidade horizontal na ligação entre a viga e o pilar, ou seja, neste modelo, representando assim o cachorro do pilar. Esta alteração resultou num aumento dos momentos fletores na zona 2, sendo assim uma representação mais próxima da realidade e dos valores obtidos no MEF. No entanto, este modelo ainda não é o ideal, porque não tem em conta todas as excentricidades presentes na ligação, em particular a excentricidade vertical do cachorro e da viga. Embora a influência da excentricidade vertical da viga nos valores dos seus esforços seja relativamente baixa, é significativa para a obtenção de esforços nos pilares. O Tipo 3, além da horizontal, considera também a excentricidade vertical do cachorro, mas os resultados obtidos são análogos aos do Tipo 2.

A abordagem de modelação do Tipo 4 e do Tipo 5, proporciona uma envolvente de momentos fletores mais alinhada com o comportamento esperado da estrutura, e o obtido no MEF. Estas representam de forma mais exata a interação entre a viga e o pilar. A utilização de um modelo de escoras e tirantes no cachorro (Tipo 5), demonstra um comportamento mais fiel à realidade, apresentando uma diferença de apenas 0,06% no valor do momento obtido a meio vão da viga em relação ao valor obtido no MEF (Quadro 4.8).

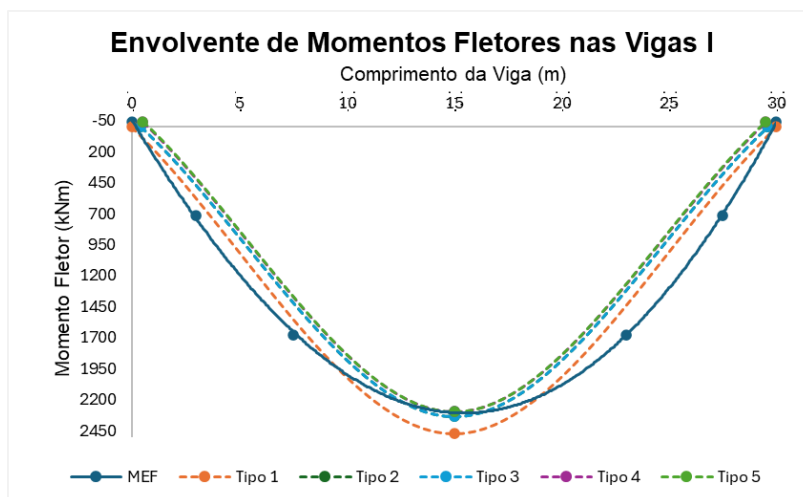


Fig. 4.4 - Envolve de momentos fletores nas vigas de secção constante "I"

Aprofundou-se esta análise com o destaque das diferenças nos momentos fletores na zona 3, que corresponde à base dos pilares, em relação ao MEF.

No Tipo 1, o momento fletor na base do pilar é nulo. Este resultado é irrealista, e pode levar a um dimensionamento incorreto e inseguro dos pilares e da estrutura como um todo.

Tal como já foi referido, no Tipo 2, introduz-se a excentricidade horizontal entre a viga e o pilar, que resulta em momentos fletores na base do pilar. Apesar de ser notória a melhoria em relação ao Tipo 1, este modelo ainda subestima os esforços reais do elemento estrutural, sendo a variação percentual do valor do momento fletor, em relação ao MEF, superior a 50% (Quadro 4.8).

O Tipo 3 revela que, embora a consideração da excentricidade vertical do cachorro seja importante, por si só, não é o suficiente para representar a verdadeira distribuição de esforços entre a viga e o pilar. À semelhança do Tipo 2, a variação percentual também é superior a 50% (Quadro 4.8).

Por fim, nos Tipo 4 e Tipo 5, os momentos fletores na zona 3 são da mesma ordem de grandeza do que os obtidos no MEF, com uma variação percentual de 5,44% e 3,84%, respetivamente. Esta aproximação indica que os modelos são uma boa representação da realidade. Esta aproximação de valores deve-se às excentricidades existentes, que geram forças adicionais, contribuindo para o aumento do momento fletor na base dos pilares.

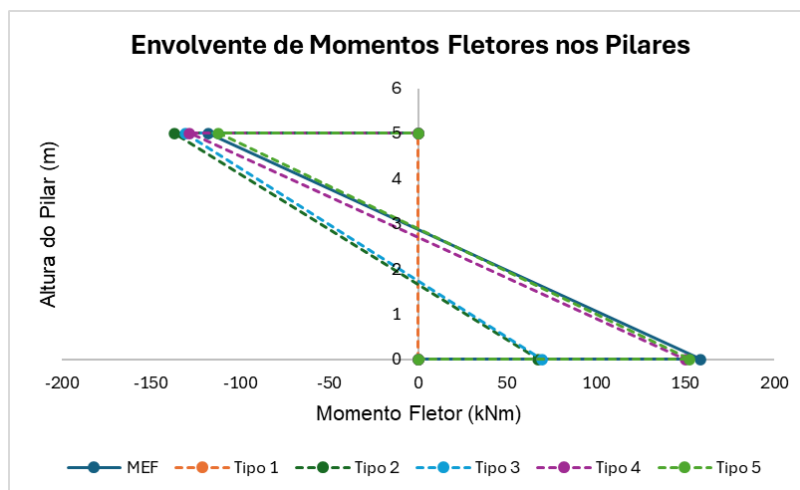


Fig. 4.5 - Envolve de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante

"I"

Para uma melhor compreensão das Figuras 4.4 e 4.5, apresenta-se o quadro seguinte, com os valores dos momentos nas três zonas em estudo mencionadas anteriormente, bem como a respetiva variação percentual dos momentos em relação ao modelo com elementos finitos. Importa salientar novamente que o valor do momento para o MEF foi calculado analiticamente através das expressões 4.5 a 4.7.

Quadro 4.8 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga I)

Pórtico	Zona 1	Δ%	Zona 2	Δ%	Zona 3	Δ%
MEF	2294,70	-	-117,88	-	158,75	-
Tipo 1	2474,59	7,84%	0	74,25%	0	-100,00%
Tipo 2	2336,33	1,81%	-136,80	-11,92%	67,60	-57,42%
Tipo 3	2336,50	1,82%	-130,70	-8,08%	69,42	-56,27%
Tipo 4	2297,71	0,13%	-128,31	-6,57%	150,11	-5,44%
Tipo 5	2296,19	0,06%	-111,99	3,71%	152,65	-3,84%

4.3.1.2. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Variável "I"

Neste contexto, ao modelar o pórtico com a viga delta, um dos objetivos consistiu em determinar se a maneira mais eficaz de a representar nos modelos simplificados, seria através de um eixo geométrico horizontal ou inclinado.

De facto, e tal como se pode observar na Fig. 4.6 e na Fig. 4.7, as diferenças são pouco significativas para os esforços obtidos na viga. Na zona 1, que corresponde ao meio vão da viga, as variações do momento para o mesmo tipo de pórtico, mas com diferentes modelações de eixos, revelam-se insignificantes. A menor variação corresponde ao Tipo 5 de 8,51% com o eixo horizontal e 4,97% com o eixo inclinado.

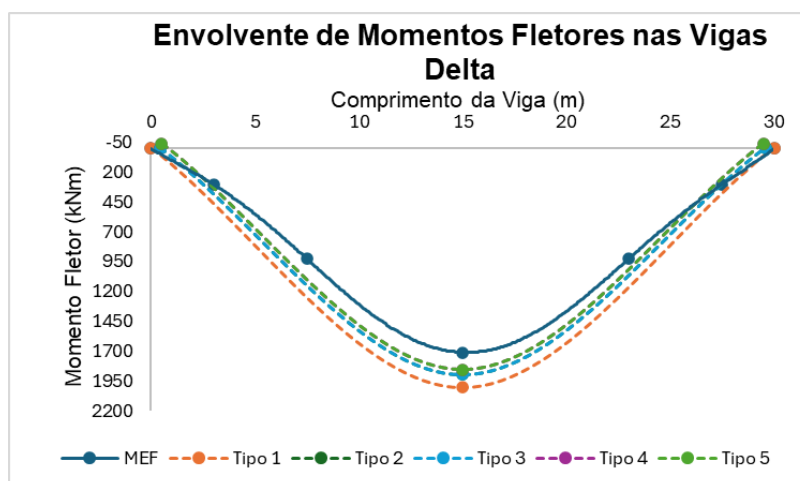


Fig. 4.6 - Envoltória de momentos fletores nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal

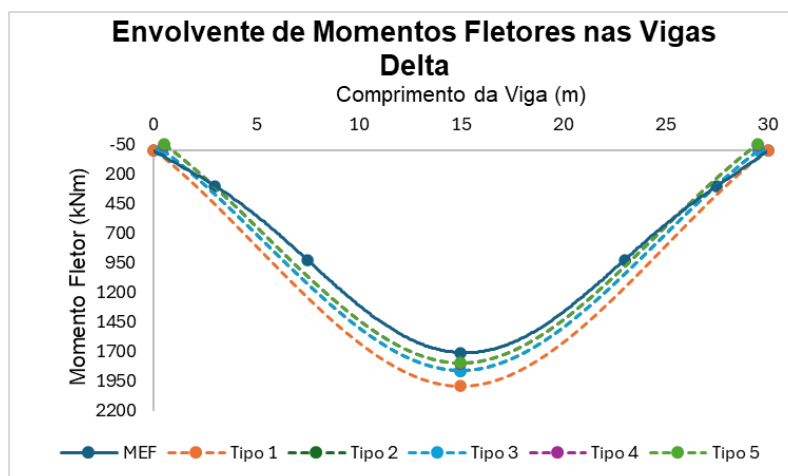


Fig. 4.7 - Envolvente de momentos fletores nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado

Verificou-se que tanto nos modelos com o eixo inclinado como horizontal, à exceção do Tipo 5, os valores dos momentos fletores na zona 2 são ligeiramente superiores ao do modelo com elementos finitos. No entanto, a ordem de grandeza dos esforços mantém-se, sendo os valores obtidos para o Tipo 1 os mais distantes do MEF, e os Tipos 4 e 5 os mais próximos, para as duas situações, conforme demonstrado na Fig. 4.8.

Os modelos com o eixo horizontal, Tipos 1 a 3, não representam com precisão o valor do momento fletor na base dos pilares. Comparativamente com o MEF, as variações percentuais são de 100%, 68,54% e 67,66%, respetivamente. Por outro lado, a diferença do momento fletor dos Tipos 4 e 5 em relação ao MEF, é consideravelmente menor, sendo de 6,25% e 8,53%, respetivamente. Estas percentagens estão presentes no Quadro 4.9 e referem-se à zona 3.

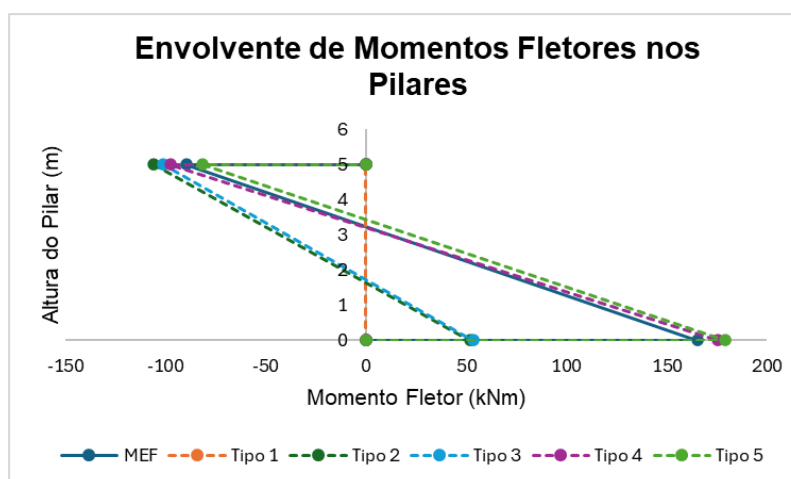


Fig. 4.8 - Envolvente de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo horizontal

Apesar da inclinação do eixo geométrico não influenciar significativamente o valor do momento fletor na viga, o mesmo já não acontece nos pilares, particularmente na zona 3, correspondente à base, tal como pode observar-se na Fig. 4.9.

A inclinação do eixo geométrico introduz componentes de forças horizontais adicionais, que não existem num eixo horizontal e contribuem significativamente para o aumento dos momentos fletores na base dos pilares. Esse aumento chega a ser mais do dobro de um modelo para o outro.

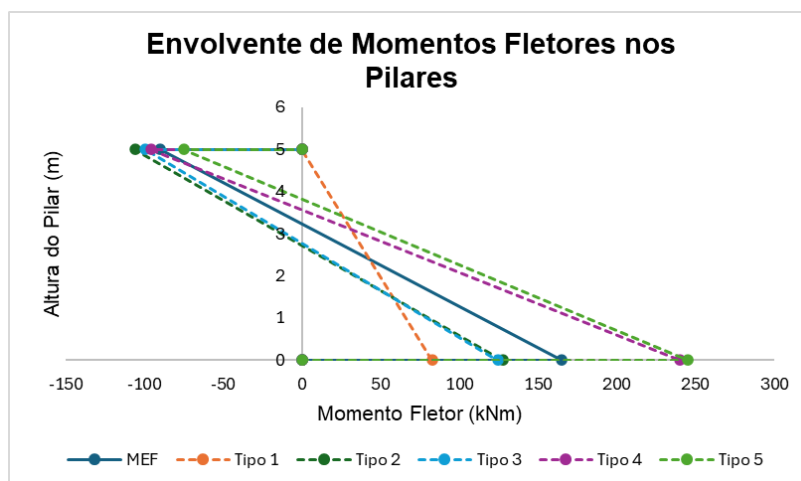


Fig. 4.9 - Envolvente de momentos fletores nos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo inclinado

No modelo de elementos finitos, a viga comporta-se de modo que as forças cheguem praticamente verticais ao aparelho de apoio (Fig 4.10), algo que os modelos com barras (eixo inclinado) não estão a conseguir simular.

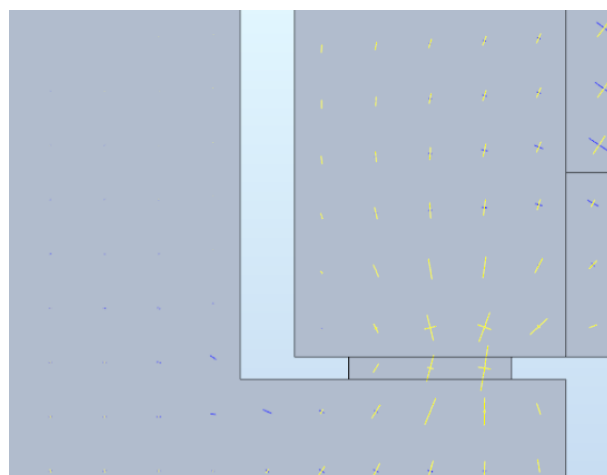


Fig. 4.10 - Direção das tensões principais (Robot)

Foram realizados alguns ensaios no modelo de barras, tentando simular o aparelho de apoio de forma a aproximar os esforços finais dos obtidos no modelo de elementos finitos. Para isso introduziu-se uma barra de baixa rigidez, na zona do apoio. Conseguiu-se alguma aproximação entre os esforços dos 2 modelos, mas não de forma completamente satisfatória. Este assunto deve ser melhor estudado em trabalhos futuros, com uma melhor avaliação do comportamento dos aparelhos de apoio.

Os quadros seguintes apresentam os valores dos momentos fletores nas três zonas em estudo, assim como a sua variação percentual em relação ao modelo de elementos finitos (MEF). Estes dados são fundamentais para a correta interpretação das Figuras 4.6 a 4.9, permitindo uma análise detalhada e comparativa dos resultados obtidos.

Quadro 4.9 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga delta – eixo horizontal)

Pórtico	Zona 1	Δ%	Zona 2	Δ%	Zona 3	Δ%
MEF	1709,26	-	-89,75	-	165,25	-
Tipo 1	2003,28	17,20%	0	-100,00%	0	-100,00%
Tipo 2	1894,35	10,83%	-105,84	17,93%	51,98	-68,54%
Tipo 3	1894,35	10,83%	-101,12	12,67%	53,45	-67,66%
Tipo 4	1856,45	8,61%	-97,51	8,65%	175,58	6,25%
Tipo 5	1854,77	8,51%	-81,43	-9,27%	179,34	8,53%

Quadro 4.10 - Valor do momento fletor (kNm) nas zonas em estudo e a respetiva variação percentual em relação ao MEF (Viga delta – eixo inclinado)

Pórtico	Zona 1	Δ%	Zona 2	Δ%	Zona 3	Δ%
MEF	1709,26	-	-89,75	-	165,25	-
Tipo 1	1993,46	16,63%	0	-100,00%	82,70	-49,95%
Tipo 2	1860,75	8,86%	-106,01	18,12%	127,55	-22,81%
Tipo 3	1862,28	8,95%	-99,18	10,51%	124,63	-24,58%
Tipo 4	1798,00	5,19%	-95,75	6,69%	240,41	45,48%
Tipo 5	1794,23	4,97%	-74,85	-16,60%	245,37	48,48%

4.3.2. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO ELS

É importante que a estrutura funcione de forma adequada em serviço, garantindo que as deformações estejam dentro dos limites recomendados. Como já foi referido, para esta combinação, a zona em análise foi a 1.

De um modo geral, a análise das deformadas de todos os Tipos existentes, seja vigas I (Fig. 4.11) ou vigas deltas (Fig. 4.12 e Fig. 4.13), conclui-se que os valores a meio vão são todos muito semelhantes ao obtidos nos modelos com elementos finitos.

Contudo, no Tipo 1, a ligação é considerada articulada e incapaz de resistir a momentos fletores, resultando numa estrutura mais flexível e que permite maiores deslocamentos. Este modelo apresenta os maiores deslocamentos a meio vão, com variações percentuais de 11,76% para a viga I e 15,15% e 15,20% para as vigas deltas, em comparação com os modelos de elementos finitos (Quadro 4.11).

Pelo contrário, nos restantes modelos, a consideração das excentricidades na zona da ligação, introduz uma certa continuidade na ligação e proporciona uma redução do comprimento da viga, aumentando a sua rigidez. Assim, no meio vão, os deslocamentos diminuem, aproximando-se dos resultados nos modelos de elementos finitos. Para ambas as vigas I ou delta, os Tipos 2 a 5 mostram uma boa correlação com os resultados dos MEF, com variações percentuais abaixo dos 5% (Quadro 4.11).

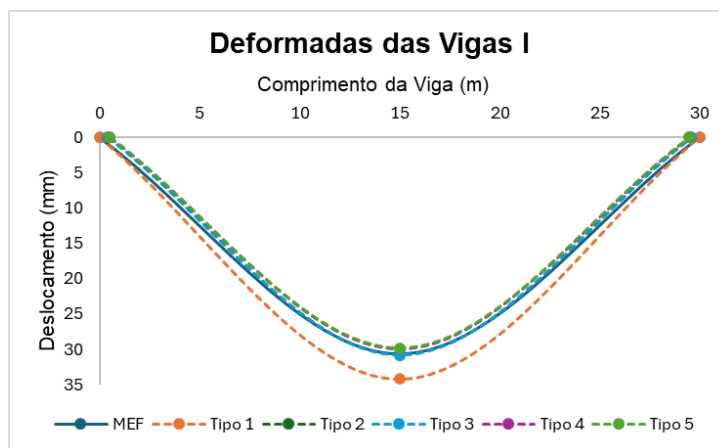


Fig. 4.11 - Deformadas nas vigas de secção constante "I"

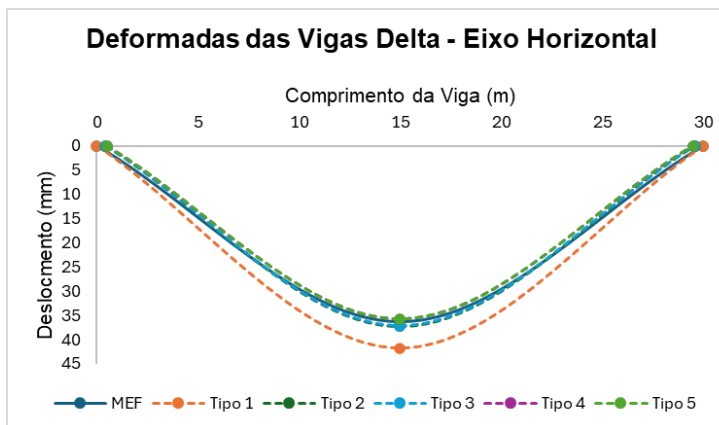


Fig. 4.12 - Deformadas nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal

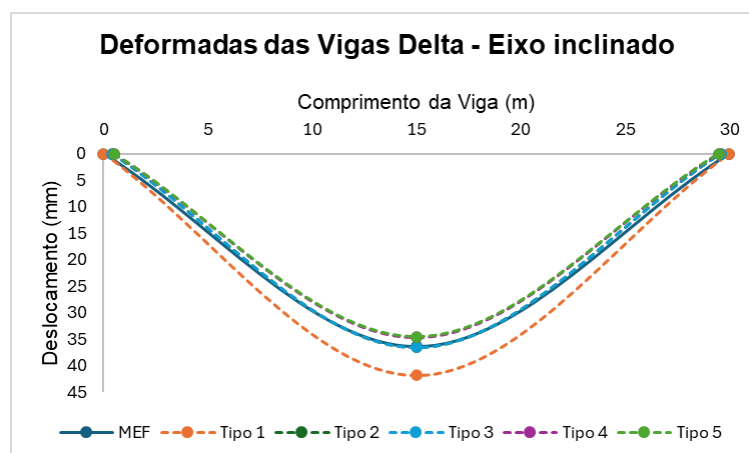


Fig. 4.13 - Deformadas nas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado

Quadro 4.11 - Valor do deslocamento vertical (mm) na secção a meio vão das vigas e a respetiva variação percentual em relação ao MEF

Pórtico	Viga I	$\Delta\%$	Viga delta – eixo horizontal	$\Delta\%$	Viga delta – eixo inclinado	$\Delta\%$
MEF	30,6	-	36,3	-	36,3	-
Tipo 1	34,2	11,76%	41,8	15,15%	41,8	15,20%
Tipo 2	30,8	0,65%	37,2	2,48%	36,5	0,55%
Tipo 3	30,8	0,65%	37,1	2,20%	36,5	0,55%
Tipo 4	29,9	-2,29%	35,7	-1,65%	34,6	-4,68%
Tipo 5	29,8	-2,61%	35,7	-1,93%	34,5	-4,96%

4.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COMBINAÇÃO SÍSMICA

Segundo o EC8 [24], para a introdução da ação sísmica no programa, deve-se considerar um novo modelo com propriedades de rigidez elástica de flexão e de esforço transversal dos elementos de betão iguais a metade da rigidez correspondente dos elementos não fendilhados. Assim, todos os modelos simplificados e de elementos finitos foram recriados com metade do módulo de elasticidade do betão utilizado, com o objetivo de cumprir esse requisito.

Para a combinação da ação sísmica com as cargas gravíticas, é pertinente analisar as forças de corte na base dos pilares e a sua respetiva deformada, uma vez que estes parâmetros afetam a resposta da estrutura perante condições sísmicas.

Deste modo, os resultados obtidos em termos de forças de corte na base dos pilares (zona 3) e deslocamentos no topo do pilar (zona 2) estão representados nos Quadros 4.12 e 4.13, respetivamente.

Quadro 4.12 - Forças de corte (kN) na base dos pilares (zona 3)

Pórtico	Viga I	$\Delta\%$	Viga delta – eixo horizontal	$\Delta\%$	Viga delta – eixo inclinado	$\Delta\%$
MEF	88,15	-	76,42	-	76,42	-
Tipo 1	91,13	3,38%	78,60	2,85%	78,58	2,83%
Tipo 2	87,87	-0,32%	75,69	-0,96%	75,98	0,53%
Tipo 3	84,19	-4,49%	72,55	-5,06%	72,82	-4,71%
Tipo 4	84,56	-4,07%	72,69	-4,88%	72,97	-4,51%
Tipo 5	88,26	-0,12%	76,54	0,16%	76,79	0,48%

Quadro 4.13 - Deslocamento horizontal (mm) no topo dos pilares (zona 2)

Pórtico	Viga I	$\Delta\%$	Viga delta – eixo horizontal	$\Delta\%$	Viga delta – eixo inclinado	$\Delta\%$
MEF	54,8	-	39,3	-	39,3	-
Tipo 1	61,8	12,77%	52,9	34,61%	47,3	20,36%
Tipo 2	61,1	11,50%	52,6	33,84%	47,5	20,87%
Tipo 3	60,7	10,77%	52,2	32,82%	47,4	20,61%
Tipo 4	55,2	0,73%	43,6	10,94%	39,2	-0,25
Tipo 5	49,1	-10,40%	39,2	-0,25%	35,4	-9,92%

4.3.3.1. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Constante “I”

Tal como é evidente na Fig. 4.13 e no Quadro 4.12, todos os modelos simplificados apresentam uma boa aproximação com os resultados do modelo de elementos finitos. As variações percentuais são relativamente pequenas, indicando que todos os tipos de modelação são eficazes para prever as forças de corte na base dos pilares. Ainda assim, os modelos Tipo 2 e Tipo 5 destacam-se como os mais precisos, especialmente o Tipo 5, que remete para uma variação percentual de apenas 0,12%.

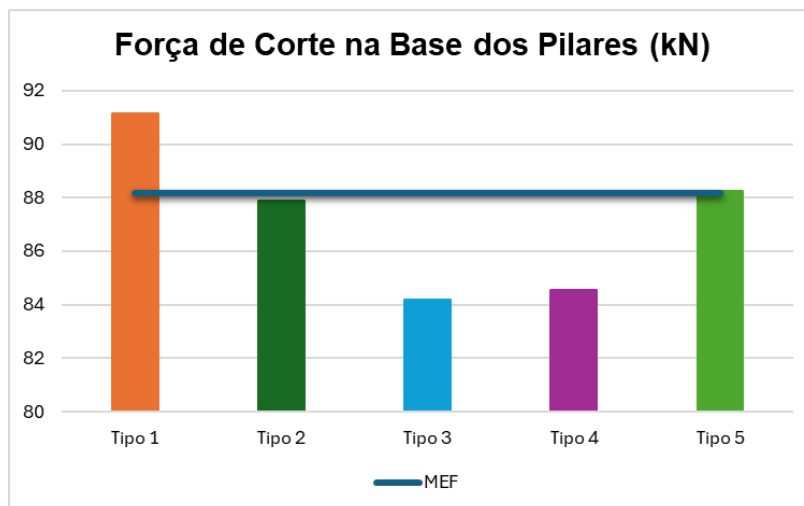


Fig. 4.14 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante "I"

A modelação da ligação entre a viga e o pilar influencia as deformações horizontais dos pilares. Por este motivo, já era de esperar que na zona 2, os deslocamentos fossem maiores para os Tipos 1,2 e 3 do que nos Tipos 4 e 5. Nesta situação, destaca-se o Tipo 4 com uma variação percentual de 0,73% em relação ao MEF, registando a maior semelhança (Fig. 4.14).

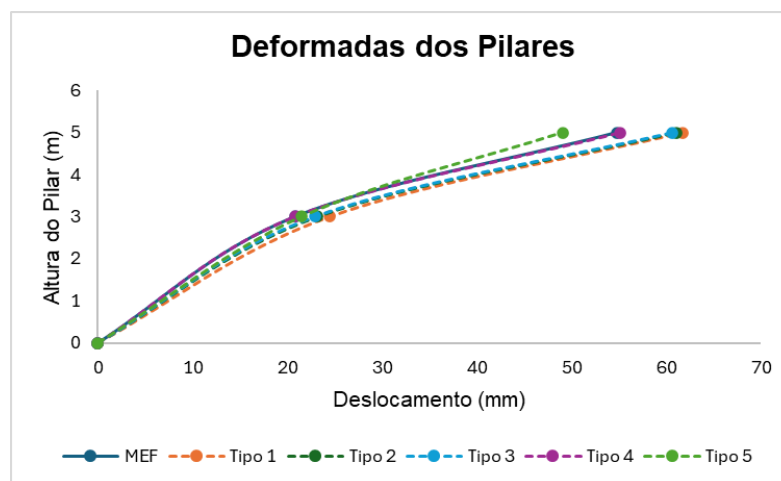


Fig. 4.15 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção constante "I"

As forças de corte na base dos pilares são forças que atuam na base da estrutura como resposta aos deslocamentos provocados pela ação sísmica. Deste modo, quanto maior a força de corte na base dos pilares, maior deveria ser o deslocamento provocado pela ação sísmica na zona 2, tal como acontece no Tipo 1. Observando as Figuras 4.14 e 4.15, é notório que o Tipo 1 evidencia a força de corte na base mais elevada, assim como o deslocamento no topo do pilar.

Analogamente, sendo que as forças de corte dos Tipos 2 e 5 e dos Tipos 3 e 4 são muito próximas entre si, seria de esperar que acontecesse o mesmo com os deslocamentos. No entanto, não é o caso.

A zona 2 do Tipo 5 evidencia um deslocamento mais elevado do que o Tipo 2, o que pode estar associado a forma como se modelou a ligação. A escora presente no cachorro do pilar do Tipo 5, poderá estar a aumentar a rigidez do pilar, condicionando assim o seu deslocamento.

Relativamente aos Tipos 3 e 4, que têm forças de corte praticamente iguais, apresentam uma diferença de 5 mm no seu deslocamento na zona 2 (Fig. 4.16 e Fig. 4.17). Isto pode ser explicado devido à introdução da excentricidade vertical da viga, uma vez que a posição do seu eixo “forma um pequeno pórtico”. Devido às ações gravíticas desta combinação, as pernas do pórtico tendem a abrir em direções opostas, diminuindo o deslocamento no pilar esquerdo e agravando o deslocamento do pilar direito (Fig. 4.17).

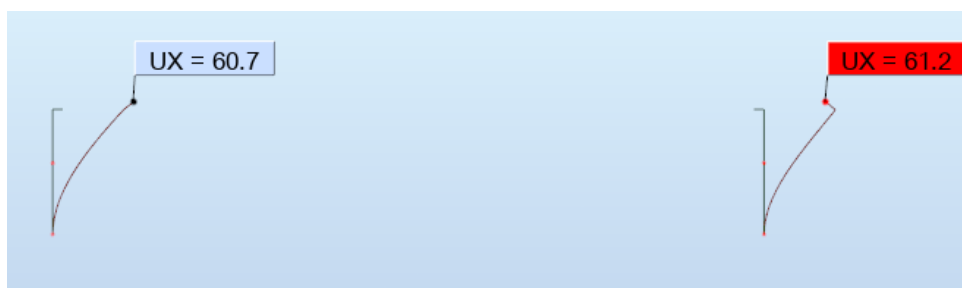


Fig. 4.16 - Deslocamento na zona 2 dos pilares do Tipo 3

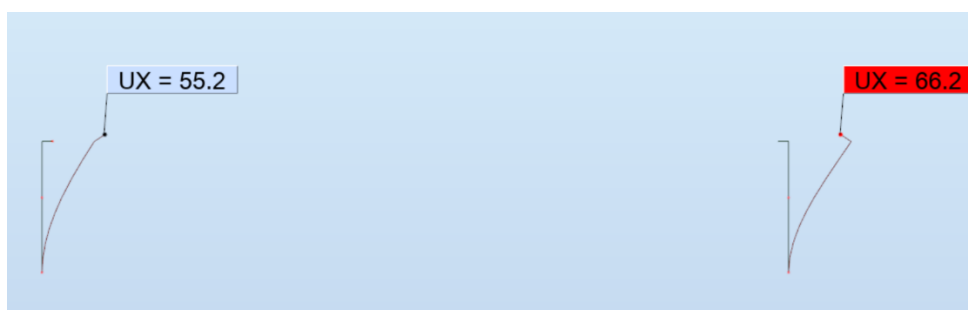


Fig. 4.17 - Deslocamento na zona 2 dos pilares do Tipo 4

4.3.3.2. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Variável “I”

Observando a Fig. 4.18, a Fig. 4.19 e o Quadro 4.12, conclui-se que as forças de corte são ligeiramente superiores para o Tipo 1, em ambos os modelos simplificados com o eixo da viga na horizontal e inclinado, com variações percentuais em relação ao MEF muito idênticas, 2,85% e 2,83%, respetivamente.

Em comparação com os modelos de elementos finitos, os Tipos 2 a 4 apresentam uma variação percentual menor na modelação com o eixo geométrico inclinado. Por outro lado, o Tipo 5 é extremamente preciso em ambos os eixos, com variações percentuais de 0,12% e 0,48%, respetivamente.

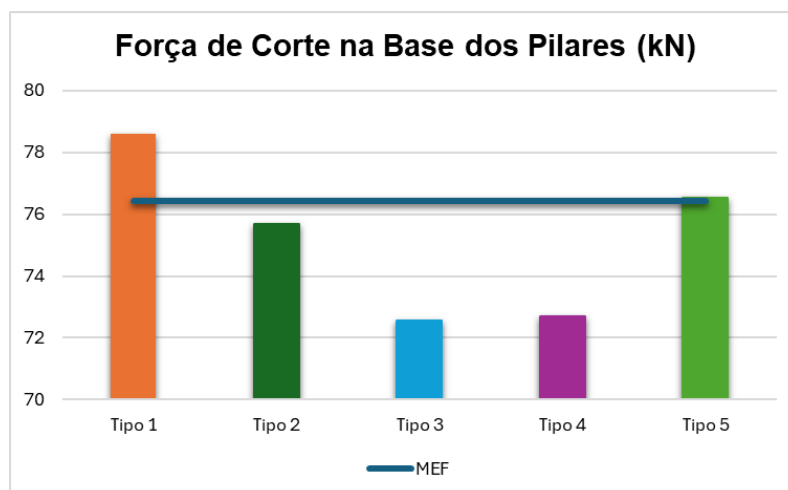


Fig. 4.18 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal

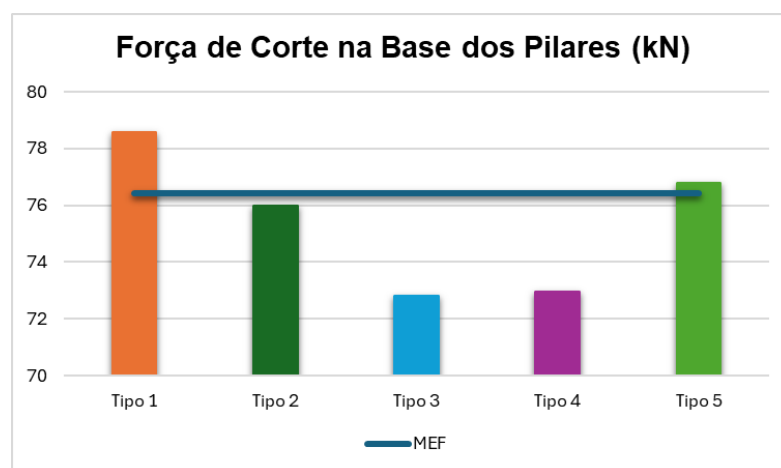


Fig. 4.19 - Forças de corte na base dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado

Relativamente ao deslocamento na zona 2, mais uma vez, destaca-se o Tipo 1 em ambas as situações, apresentando o maior valor, com uma variação percentual em relação ao MEF de 34,61% para o modelo simplificado com o eixo da viga horizontal, e 20,35% para o modelo simplificado com o eixo da viga inclinado. Os Tipos 2 e 3 revelam-se análogos ao Tipo 1 em termos de resposta.

Por outro lado, o Tipo 5 mostra-se o mais semelhante ao MEF, no modelo com o eixo geométrico da viga delta horizontal, com uma diferença de apenas 0,25%. Contudo, com o eixo inclinado, é o Tipo 4 que se destaca pela sua precisão com uma variação de 0,25%.

A Fig. 4.20 e a Fig. 4.21 representam o deslocamento horizontal dos pilares ao longo da sua altura, e de uma forma geral, não se observam grandes diferenças no deslocamento da zona 2 entre os dois casos.

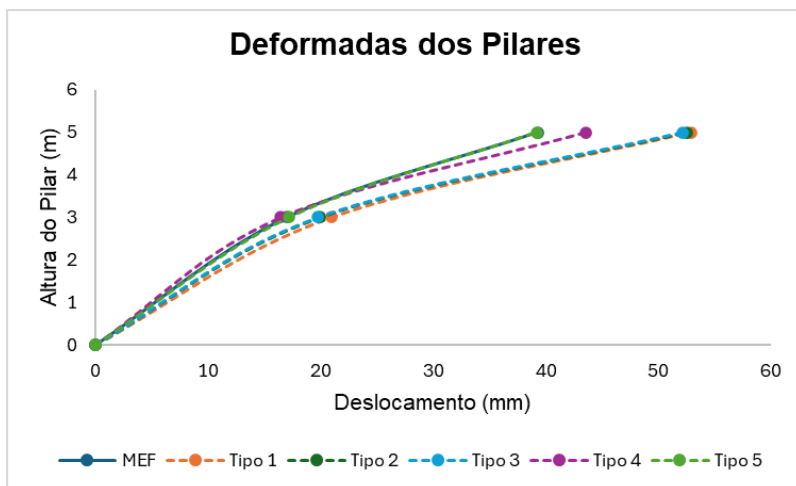


Fig. 4.20 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico horizontal

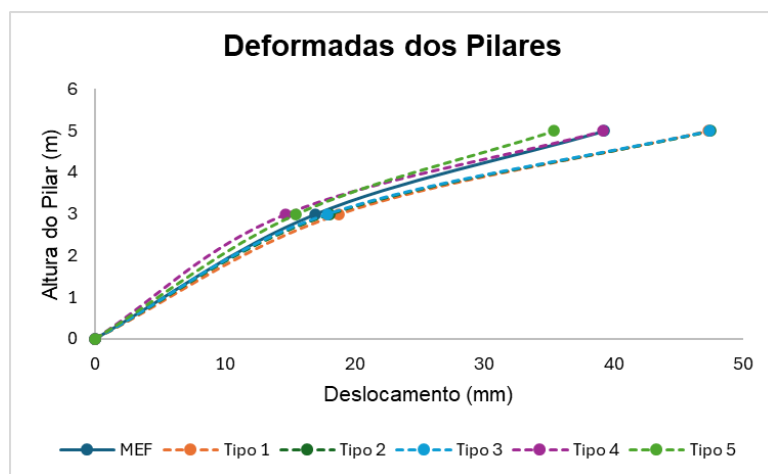


Fig. 4.21 - Deformadas dos pilares dos pórticos constituídos pelas vigas de secção variável "I": Eixo geométrico inclinado

4.3.4. ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Realizou-se uma comparação dos modos de vibração dos modelos simplificados com os modelos de elementos finitos. Os modos de vibração de uma estrutura são fundamentais na análise dinâmica dos sistemas estruturais, e permitem compreender como a estrutura responde a diferentes excitações dinâmicas, especialmente os sismos. Cada modo de vibração está associado a uma frequência natural da estrutura.

Segundo o EC8 [24], para realizar a análise modal por espectro de resposta, a soma das massas modais efetivas para os modos considerados representa, pelo menos 90% da massa total da estrutura. Por defeito, o programa de cálculo assume 10 modos de vibração, embora só fosse, necessários 2 modos para este caso.

4.3.4.1. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Constante “I”

As frequências naturais associadas ao primeiro modo de vibração para os modelos constituídos por vigas de secção constante estão representadas no Quadro 4.14:

Quadro 4.14 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas “I”

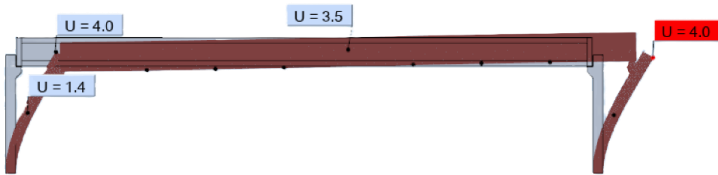
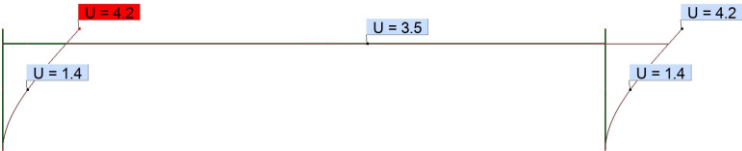
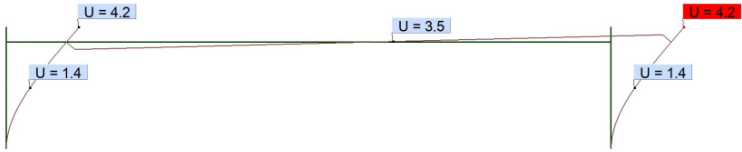
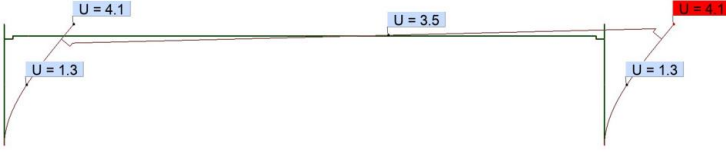
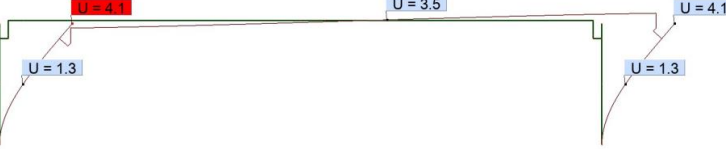
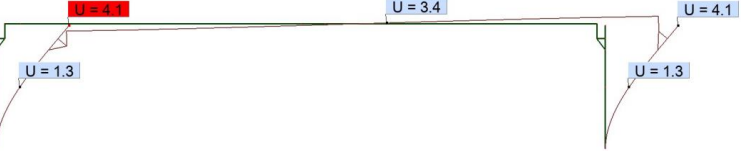
Modo de Vibração	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
1	1,18	1,21	1,22	1,17	1,18	1,17

Com base na análise das frequências associadas ao primeiro modo de vibração (horizontal), pode concluir-se que os Tipos 1 e 2 apresentam frequências ligeiramente mais elevadas do que no MEF. Ainda que seja uma aproximação bastante precisa, indica uma estrutura um pouco mais rígida para ações horizontais. Por outro lado, os Tipos 3 a 5 revelam-se particularmente eficazes na representação do comportamento da estrutura, especialmente o Tipo 4, que apresenta um valor de frequência exatamente igual ao do MEF.

Os deslocamentos associados a cada pórtico são muito semelhantes (Quadro 4.15), o que indica que todos os modelos simplificados conseguem representar adequadamente o comportamento da estrutura sob o primeiro modo de vibração.

Quadro 4.15 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas

"I"

Pórtico	f (Hz)	Modo de Vibração 1
MEF	1,18	
Tipo 1	1,21	
Tipo 2	1,22	
Tipo 3	1,17	
Tipo 4	1,18	
Tipo 5	1,17	

4.3.4.2. Pórticos Constituídos por Vigas de Secção Variável “I”

As frequências naturais associadas a cada modo de vibração para os modelos constituídos pelas vigas de secção variável estão representadas nos Quadros 4.15 e 4.16:

Quadro 4.16 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas delta (eixo horizontal)

Modo de Vibração	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
1	1,39	1,43	1,43	1,37	1,38	1,35

Quadro 4.17 - Frequências naturais (Hz) dos pórticos formados por vigas delta (eixo inclinado)

Modo de Vibração	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
1	1,39	1,43	1,43	1,38	1,38	1,36

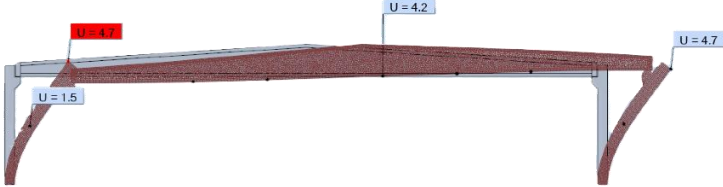
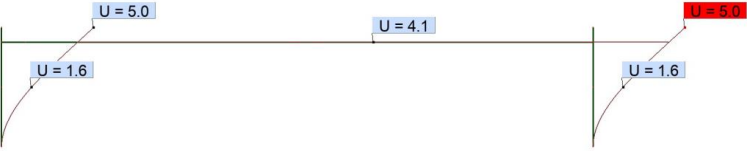
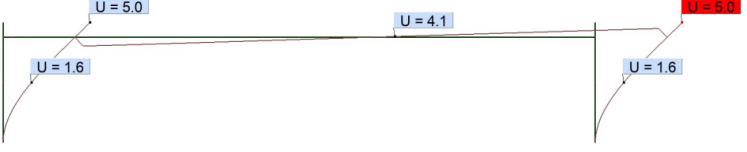
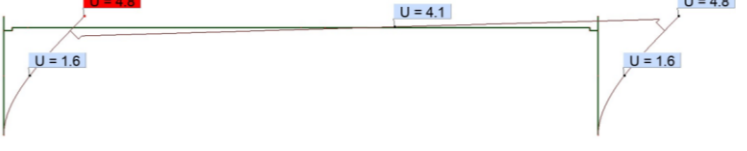
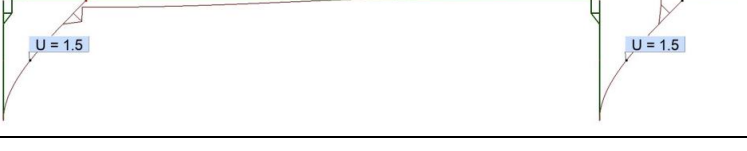
Analogamente às comparações realizadas anteriormente, a análise das frequências associadas ao primeiro modo de vibração dos pórticos formados por vigas delta, pode ser feita através da comparação de todos os modelos simplificados com o modelo de elementos finitos, bem como entre os próprios modelos simplificados.

Mais uma vez, e pela razão referida em 4.3.4.1, os Tipos 1 e 2, seja a viga modelada com o eixo horizontal ou inclinado nos modelos simplificados, evidenciam frequências mais elevadas em relação ao MEF, enquanto os Tipos 3 a 5 apresentam valores mais semelhantes.

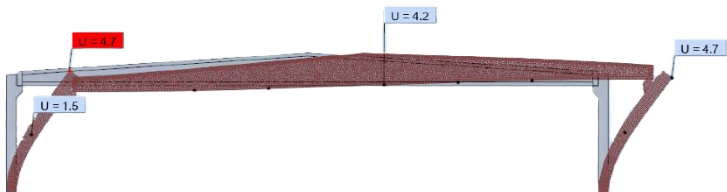
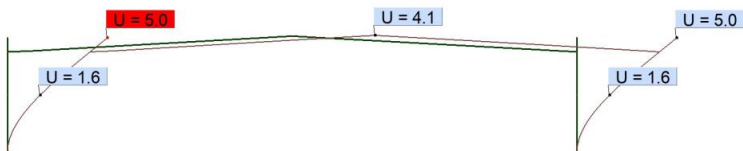
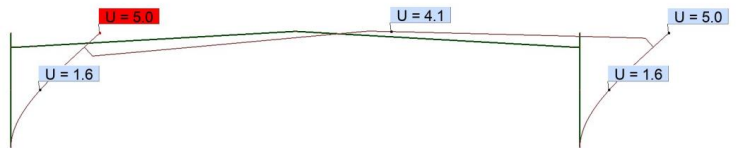
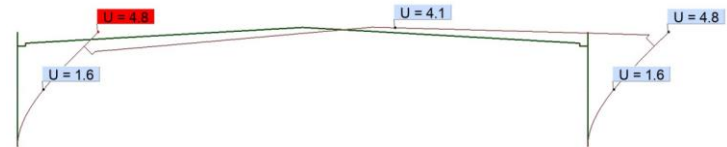
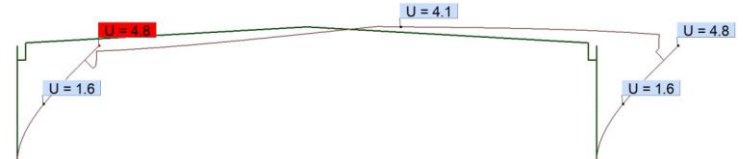
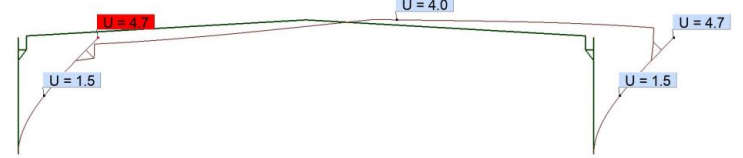
Por sua vez, o Tipo 4 destaca-se pela sua precisão com uma variação percentual 0,72%. Apesar do Tipo 5 evidenciar um valor um pouco inferior, continua a ser uma boa aproximação e uma modelação eficaz.

Ao comparar os modelos com o eixo horizontal com os modelos com o eixo inclinado, concluiu-se que tanto as frequências como os deslocamentos (Quadros 4.18 a 4.19) são praticamente iguais, indicando que a inclinação do eixo não afeta significativamente esses parâmetros.

Quadro 4.18 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas delta (eixo horizontal)

Pórtico	f (Hz)	Modo de Vibração 1
MEF	1,39	
Tipo 1	1,43	
Tipo 2	1,43	
Tipo 3	1,37	
Tipo 4	1,38	
Tipo 5	1,35	

Quadro 4.19 - Frequências naturais e deformadas associadas ao primeiro modo de vibração da estrutura: Vigas delta (eixo inclinado)

Pórtico	f (Hz)	Modo de Vibração
MEF	1,39	
Tipo 1	1,43	
Tipo 2	1,43	
Tipo 3	1,38	
Tipo 4	1,38	
Tipo 5	1,36	

4.4. PONTO SINGULAR NAS VIGAS DELTA

4.4.1. DESCRIÇÃO DA PARTICULARIDADE DA VIGA DE SECÇÃO VARIÁVEL

Os programas de cálculo automático são ferramentas fundamentais para a análise estrutural, que permitem determinar a resposta da estrutura quando está submetida a diversas ações. No entanto, podem apresentar determinadas particularidades e fragilidades que requerem uma melhor compreensão para garantir a confiança no modelo e nos respetivos resultados.

Durante a utilização do Robot Structural Analysis, surgiu uma singularidade que merece destaque na presente dissertação. Ao analisar os resultados obtidos para as tensões na secção do meio vão da viga de secção variável, observou-se que no seu banzo superior, o diagrama apresentava uma distribuição de tensões irregulares e não linear (Fig. 4.22).

Nesta secção apenas estão apresentados os resultados obtidos para uma carga permanente (RCP1). Contudo, a situação ocorre para todas as ações e combinações de ações analisadas.

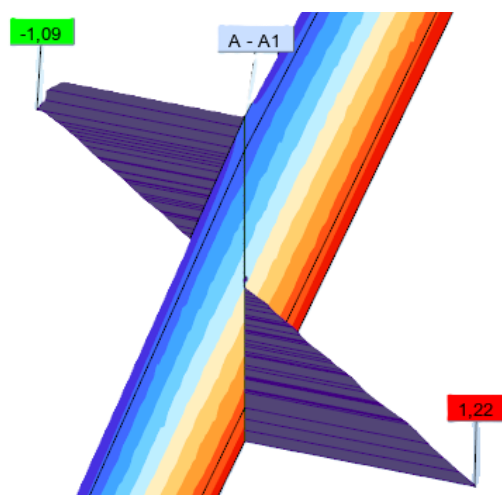


Fig. 4.22 – Diagrama irregular de tensões no meio vão da viga de secção variável para a ação RCP1.

Inicialmente, essa variação foi interpretada como um possível erro na modelação ou uma falha no programa. Porém, após uma análise detalhada, revelou-se que essa característica é, na verdade consequência da mudança de geometria no vértice do elemento estrutural. A falta de equilíbrio das forças internas no vértice da viga implica uma forma irregular do diagrama quando comparado com regiões mais homogêneas do elemento, onde este equilíbrio é assegurado (Fig. 4.23).

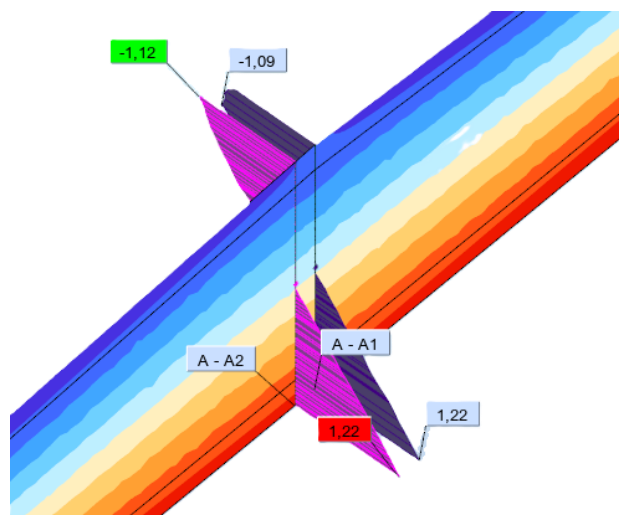


Fig. 4.23 - Diagrama de tensões para a secção do meio vão e para uma secção adjacente (RCP1)

Em estruturas mais complexas, a má interpretação dos resultados provenientes da análise estrutural podem comprometer o dimensionamento de toda a estrutura. Assim, neste contexto, é importante justificar a forma do diagrama de tensões fornecidos pelo programa de cálculo automático, com a finalidade de reforçar a confiança no modelo.

4.4.2. ESTRATÉGIAS PARA SUAVIZAR OS DIAGRAMAS

A identificação de peculiaridades associados à modelação estrutural são, de certa forma, importantes para garantir a segurança das estruturas em qualquer projeto. Neste caso, para tentar aproximar os diagramas obtidos de um diagrama mais regular e linear, é crucial interpretar e compreender o comportamento da viga na secção a meio vão.

Deste modo, analisou-se os resultados das tensões através dos mapas e do sentido das cruzes. As cruzes representam os valores máximos e mínimos das tensões principais, e são uteis para visualizar de forma clara a distribuição das tensões na estrutura. Constatou-se que no banzo superior, as tensões principais em vez de acompanharem a geometria do vértice, tendem a “curvar”, tal como é perceptível na Figura 4.24.

Após a verificação destes aspetos, optou-se por explorar soluções que pudessem suavizar a forma dos diagramas de tensões no meio vão:

- Refinar a malha dos elementos finitos no vértice de mudança de inclinação da viga, para melhorar a precisão dos resultados;
- Suavizar a transição entre as duas partes da viga, através da introdução de um “fillet”, isto é um “arredondamento” do vértice.

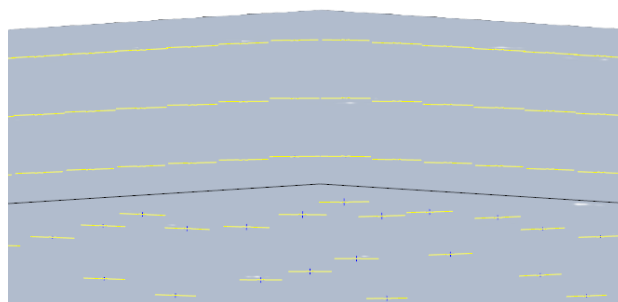


Fig. 4.24 - "Crosses" no vértice da viga delta (Robot)

Teoricamente, se a malha de elementos finitos não for suficientemente refinada no vértice, o diagrama de tensões pode parecer menos preciso do que realmente é, ou seja, elementos de menores dimensões remetem para uma melhor representação das tensões. Logo, numa primeira fase, refinou-se a malha de elementos finitos no vértice da viga, triplicando o número de elementos utilizados (Figura 4.25). Todavia, o diagrama de tensões a meio vão não revelou qualquer diferença, e então esta hipótese foi excluída.

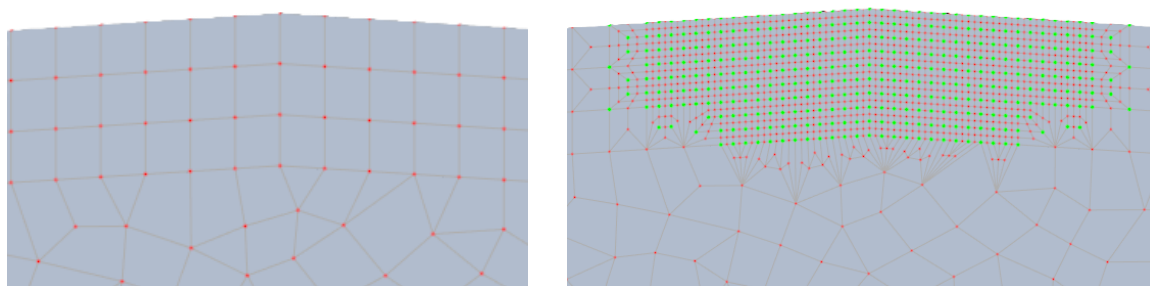


Fig. 4.25 - Malha de elementos finitos no vértice, antes e depois de ser refinada

Posteriormente, no modelo recriou-se o banzo superior da viga, desta vez, introduzindo o comando "fillet" do Robot Structural Analysis, que cria um arco entre dois segmentos de reta. Na sua geometria, é necessário definir um raio para o arco, assim com os elementos a unir. O objetivo desta solução foi aproximar a forma da estrutura ao caminho das tensões observado na Figura 4.26.

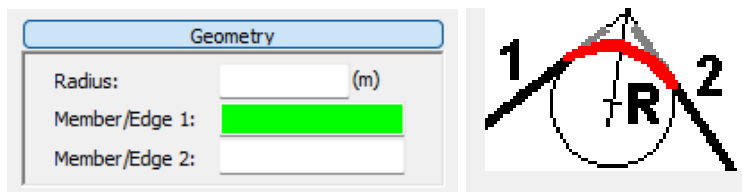


Fig. 4.26 - Parâmetros para definição do comando "fillet" (Robot)

Este processo foi iterativo, com a definição de raios distintos para o arco, analisando a variação do diagrama de tensões, com o intuito de encontrar um raio que suavizasse por completo o vértice, desde o ponto de transição de diagramas num lado da viga até ao correspondente no outro lado (Figura 4.27). Concluiu-se que à medida o raio aumentava, o diagrama tornava-se mais linear no banzo superior e aproximava-se da forma “esperada”.

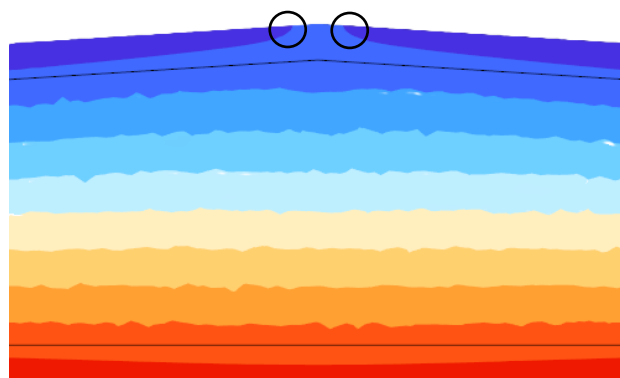


Fig. 4.27 - Pontos de transição entre secções com diagramas lineares e secções com diagramas não lineares

Para ilustrar os resultados deste estudo, apresentam-se de seguida as imagens dos diagramas de tensões sem a realização do “fillet” e outro com um raio escolhido por realçar melhor a aproximação requerida. Estas imagens permitem visualizar como a variação dos raios influenciam a linearidade dos diagramas, em particular no banzo superior.

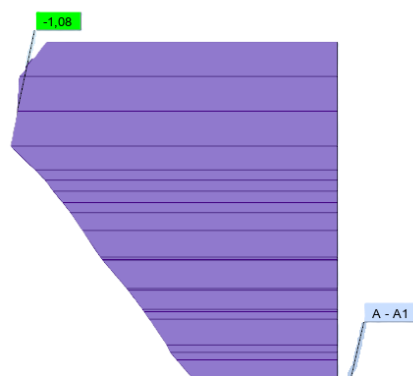


Fig. 4.28 - Diagrama de tensões no banzo superior da secção a meio vão da viga (sem arredondamento do vértice)

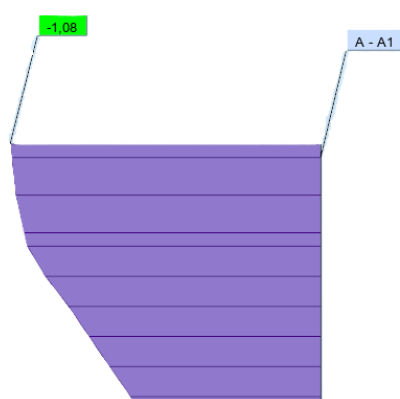


Fig. 4.29 - Diagrama de tensões no banzo superior da secção a meio vão da viga com arredondamento do vértice)

Esta análise foi realizada para confirmar que, o comportamento dos diagramas de tensões não compromete a análise dos resultados, mas sim reflete as particularidades inerentes à modelação de elementos estruturais com geometrias variáveis. Compreender que esta variação é uma característica própria da viga delta permite uma interpretação correta dos resultados e reforça a confiança no modelo.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido na presente dissertação, procurou analisar e comparar diferentes abordagens de modelação de um pórtico constituído por elementos pré-fabricados, com o objetivo de avaliar a sua eficácia na obtenção de esforços e estudar as diferentes formas de representar a ligação entre a viga e os pilares. Esta análise fornece práticas para a modelação de estruturas industriais pré-fabricadas de betão armado, com ênfase na ligação entre a viga e o pilar, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais resilientes.

A análise comparativa entre os modelos simplificados e os elementos finitos, permitiu determinar quais dos modelos oferecem resultados aceitáveis e quais necessitam de ajustes. Os modelos simplificados Tipo 4 e Tipo 5 (escoras e tirantes) destacaram-se pela sua proximidade aos resultados dos elementos finitos, sugerindo que a consideração de todas as excentricidades é crucial para uma representação real dos esforços e uma melhor distribuição das forças entre a viga e os pilares.

Além disso, verificou-se que a modelação da viga delta com o eixo geométrico horizontal nos modelos simplificados, é mais eficaz, e evita a introdução de forças e momentos fletores adicionais, especialmente na base dos pilares, sendo importante para o seu correto dimensionamento.

Na análise das deformações em condições de serviço, a rigidez das vigas influenciou ligeiramente o valor dos deslocamentos.

Para a combinação sísmica, concluiu-se que qualquer um dos modelos representa de forma eficaz a resposta aos sismos, dada a proximidades dos valores das forças de corte na base dos pilares e das frequências naturais de cada Tipo ao MEF.

Dada a proximidade de valores em relação aos modelos com elementos finitos, conclui-se que a utilização de modelos simplificados adequados permite uma análise eficiente e não compromete o resultado da estrutura.

Adicionalmente, os Tipos 4 e 5 revelam-se particularmente adequados para o projeto de estruturas pré-fabricadas, e a sua compreensão é essencial para aplicações futuras, permitindo o desenvolvimento de projetos mais seguros. Se a utilização dos Tipos 1 a 3 já evidencia diferenças tão significativas para uma estrutura tão simples como um pórtico, a discrepância de valores associadas a uma estrutura complexa, com mais pisos será muito mais elevada.

Relativamente à análise realizada na Secção 4.4, importa destacar que apesar dos diagramas de tensões não apresentarem a forma esperada, isso não implica necessariamente um erro. Além disso, é

fundamental alertar sobre as nuances associadas à viga delta, para o caso de se realizem estudos futuros relacionados com este elemento estrutural.

Em suma, com a pré-fabricação em betão armado a ganhar cada vez mais destaque em Portugal, é fundamental salientar a importâncias destas comparações. Elas não só proporcionam conhecimento e entendimento dos programas de cálculo automático, como também desenvolvem a sensibilidade necessária para interpretar os resultados por eles fornecidos.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na presente dissertação, não foram determinados aspetos potenciais que contribuem para avanços contínuos na análise e dimensionamento de estruturas pré-fabricadas de betão armado. Como tal, seria interessante desenvolver no futuro os estudos seguintes:

- Validação experimental dos modelos, seja através de ensaios em laboratório ou monitorização de edifícios reais;
- Realização do mesmo estudo para estruturas mais complexas, com vários pisos, por exemplo;
- Analisar a influência de parâmetros como as propriedades do betão utilizado e dos aparelhos de apoio, assim como as secções transversais dos elementos construtivos;
- Avaliação do comportamento dos aparelhos de apoio, para melhorar os resultados finais dos modelos simplificados de barras com o eixo da viga delta inclinado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

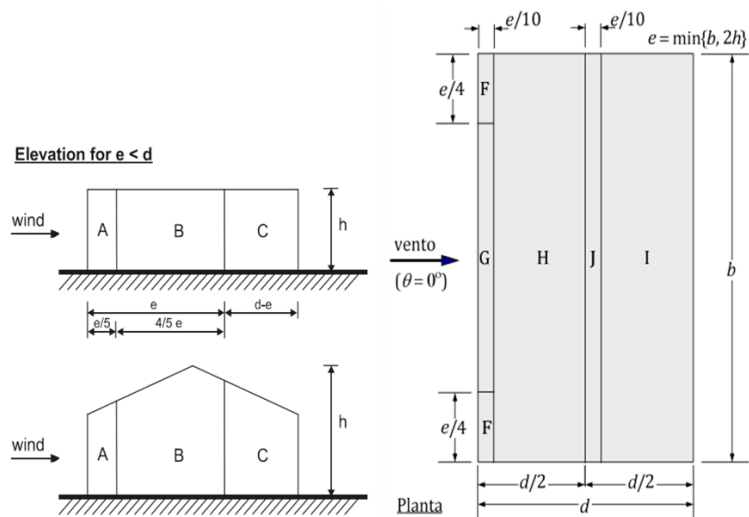
- [1] P. d. Santos, *Ligações de estruturas prefabricadas de betão*. LNEC, Pompeu dos Santos.
- [2] R. S. Nádia Batalha, Hugo Vitorino, Humberto Varum, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues, "Modelação do comportamento sísmico de edifícios prefabricados de betão armado " *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, pp. 77-88, 2020.
- [3] H. Rodrigues, R. Sousa, H. Vitorino, N. Batalha, H. Varum, e P. Fernandes, "Characterisation of Portuguese RC precast industrial building stock," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, pp. 1-19, 2020.
- [4] A. Steinle, H. Bachmann, e M. Tillmann, *Precast Concrete Structures* 2ed.: John Wiley & Sons, 2019.
- [5] A. B. Couto e J. P. Couto, "Vantagens produtivas e ambientais da pré-fabricação," 2007.
- [6] K. S. Elliott, *Precast concrete structures*. Crc Press, 2019.
- [7] A. J. S. da Magalhães, "A Pré-Fabricação em Betão em Edifícios," Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2013.
- [8] K. S. Elliott e A. Tovey, *Precast concrete frame buildings: design guide*. British Cement Association Wexham Springs, Slough, 1992.
- [9] A. Van Acker, "Manual de sistemas pré-fabricados de concreto," *Traduzido por Marcelo de Araújo Ferreira*. São Paulo, SP: Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, 2002.
- [10] K. S. Elliott e C. Jolly, *Multi-storey precast concrete framed structures*. Wiley, 2013.
- [11] F. I. du Béton, "FIB-Bulletin 101: Precast Concrete in Tall Buildings," *Guide to good practice*, 2021.
- [12] F. I. du Béton, "FIB-Bulletin 43: Structural connections for precast concrete buildings," *Guide to good practice*, 2008.
- [13] P. M. Lagartixo, "Sistemas Estruturais de Edifícios Industriais," Tese de Mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa-Faculdade de Ciências ..., 2011.
- [14] I. Holly e I. Abrahim, "Connections and joints in precast concrete structures," *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 49-56, 2020.
- [15] N. EN, "1-1. NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2—Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios," *IPQ—Instituto Português da Qualidade*, 2010.
- [16] J. Calavera, "Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón," 1999.
- [17] C. Bonfanti, A. Carabellese, e G. Toniolo, "Strutture prefabbricate: catalogo delle tipologie esistenti," *Italian Civil Protection Department, ReLUIS and Assobeton*, 2008.
- [18] T. M. A. de Sousa Tavares, "Análise comparativa de modelos de cálculo automático no âmbito do projeto de estruturas," Mestrado em Engenharia Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012/2013.
- [19] Á. F. Azevedo, "Método dos elementos finitos," *Faculdade de Engenharia da universidade do Porto*, vol. 1, no. 7, 2003.
- [20] A. Furtado *et al.*, "Seismic precast. Seismic performance assessment of existing precast industrial buildings," ed: Politécnico de Leiria, 2021.
- [21] N. Batalha, H. Rodrigues, e H. Varum, "Seismic performance of RC precast industrial buildings—learning with the past earthquakes," *Innovative infrastructure solutions*, vol. 4, no. 1, p. 4, 2019.

- [22] L. Liberatore, L. Sorrentino, D. Liberatore, e L. D. Decanini, "Failure of industrial structures induced by the Emilia (Italy) 2012 earthquakes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 629-647, 2013.
- [23] F. I. du Beton, "Seismic design of precast concrete building structures," *FIB Bulletin Number*, vol. 27, 2003.
- [24] N. EN, "1-NP EN 1998-1, Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos–Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios," *European Standard*, 1991.
- [25] P. N. do Carmo Ferreira, "Análise sísmica de um edifício constituído por elementos pré-fabricados de betão," Mestrado em Engenharia Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022/2023.
- [26] R. de Segurança, "Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (Decreto-Lei n. ° 235/83, de 31 de maio)," *Diário da República*, pp. 1991-2024.
- [27] R. d. E. d. B. REBAP, "Armado e Pré-esforçado," *Porto Editora*, 1983.
- [28] I. Eurocódigo, "0: Bases para o projecto de estruturas," *Instituto Português da Qualidade*, 2009.
- [29] Autodesk. "User's Guide." <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2024/ENU/?guid=GUID-4A734308-B2F3-4147-A310-BD47C48E9ED1> (acedido em mar. 15, 2024).
- [30] N. EN, "1-4-Eurocódigo 1-Ações em estruturas, Parte 1-4: Ações gerais, Ações do vento," *Caparica: Instituto Português de Qualidade*, 2010.

ANEXOS

A1

QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO



Coefficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes

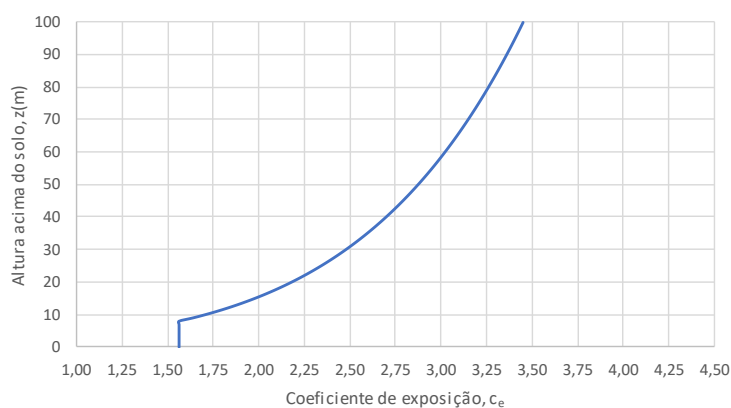
ângulo α	direcção do vento $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8	-1,2	-0,6	-0,8	-1,4	-1,2
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-0,7	-1,2	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
0°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-1,2	-0,4	-1,0	-1,5	-1,5
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2	-1,2	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5

Local do edifício:	
Zona	$v_{b,0} = 30,000 \quad [m/s]$
Categoria do Terreno	$z_0 = 0,300 \quad [m]$
III	$z_{min} = 8,000 \quad [m]$

Dimensões do edifício		
d =	30,00	m
b =	30,00	m
b _{inf} =	10,00	m
h =	6,00	m
α =	5,00	graus
e =	12,00	m

Coeficientes de pressão externa nas paredes (c _{pe})				
A	c _{pe,10} =	-1,20	e/5 =	2,40 m
B	c _{pe,10} =	-0,80	(4/5)e =	9,60 m
C	c _{pe,10} =	-0,50	d-e =	18,00 m
D	c _{pe,b,10} =	0,70	(Barlavento)	
E	c _{pe,s,10} =	-0,30	(Sotavento)	

C _{dir}	1
C _{season}	1
C _{prob}	1
c _o	1
C _s C _d	1



Coeficiente de exposição: 1,57

Pressão dinâmica de pico: 0,881 kN/m²

VENTO 1+ E VENTO 1-					VENTO 2+ E VENTO 2-				
c_{pi}	0,20	kN/m ²	m	kN/m	c_{pi}	0,20	kN/m ²	m	kN/m
D =	0,50	0,44	30,00	4,41	D =	0,50	0,44	30,00	4,41
E =	-0,50	-0,44	30,00	-4,41	E =	-0,50	-0,44	30,00	-4,41
F =	-1,90	-1,67	3,00	-16,74	F =	-0,20	-0,18	3,00	-1,76
G =	-1,40	-1,23	1,20	-12,34	G =	-0,20	-0,18	1,20	-1,76
H =	-0,80	-0,70	13,80	-7,05	H =	-0,20	-0,18	13,80	-1,76
J =	-0,80	-0,70	1,20	-7,05	J =	-0,80	-0,70	1,20	-7,05
I =	-0,80	-0,70	13,80	-7,05	I =	-0,80	-0,70	13,80	-7,05
c_{pi}	-0,30	kN/m ²	m	kN/m	c_{pi}	-0,30	kN/m ²	m	kN/m
D =	1,00	0,88	30,00	8,81	D =	1,00	0,88	30,00	8,81
E =	0,00	0,00	30,00	0,00	E =	0,00	0,00	30,00	0,00
F =	-1,40	-1,23	3,00	-12,34	F =	0,30	0,26	3,00	2,64
G =	-0,90	-0,79	1,20	-7,93	G =	0,30	0,26	1,20	2,64
H =	-0,30	-0,26	13,80	-2,64	H =	0,30	0,26	13,80	2,64
J =	-0,30	-0,26	1,20	-2,64	J =	-0,30	-0,26	1,20	-2,64
I =	-0,30	-0,26	13,80	-2,64	I =	-0,30	-0,26	13,80	-2,64

A2

FOLHAS DE CÁLCULO COM AS COMBINAÇÕES DE AÇÕES

w0 ψ1 ψ2
 1 PP - - -
 2 RCP1 - - -
 3 RCP2 - - -
 4 SOB1 0 0 0
 5 SOB2 0,0 0,0 0,0
 6 SOB3 0,0 0,0 0,0
 7 V1+ 0,6 0,2 0,0
 8 V2+ 0,6 0,2 0,0
 9 V1- 0,6 0,2 0,0
 10 V2- 0,6 0,2 0,0

Base	10: V2-																				
	1: PP	2: RCP1	3: RCP2	4: SOB1	5: SOB2	6: SOB3	7: V1+	8: V2+	9: V1-	10: V2-											
SOB1	11 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	1,50	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	12 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	1,50	5	0,00	6	0,00	7	0,90	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	13 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	1,50	5	0,00	6	0,00	7	0,90	8	0,90	9	0,00	10	0,00
	14 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	1,50	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,90	10	0,00
	15 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	1,50	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,90
SOB2	16 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	1,50	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	17 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	1,50	6	0,00	7	0,90	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	18 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	1,50	6	0,00	7	0,00	8	0,90	9	0,00	10	0,00
	19 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	1,50	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,90	10	0,00
	20 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	1,50	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,90
SOB3	21 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	1,50	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	22 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	1,50	7	0,90	8	0,00	9	0,00	10	0,00
	23 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	1,50	7	0,00	8	0,90	9	0,00	10	0,00
	24 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	1,50	7	0,00	8	0,00	9	0,90	10	0,00
	25 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	1,50	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,90
V1+	26 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	0,00	7	1,50	8	0,00	9	0,00	10	0,00
V2+	27 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	1,50	9	0,00	10	0,00
V1-	28 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	1,50	10	0,00
V2-	29 (C)	1	1,35	2	1,35	3	1,35	4	0,00	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	1,50
ELS	30 (C)	1	1,00	2	1,00	3	1,00	4	0,00	5	0,00	6	0,00	7	0,00	8	0,00	9	0,00	10	0,00

ψ0 ψ1 ψ2
 - - -
 - - -
 - - -
 - - -
 0 0 0
 0,0 0,0 0,0
 0,0 0,0 0,0
 0,6 0,2 0,0
 0,6 0,2 0,0
 0,6 0,2 0,0
 0,6 0,2 0,0

31 Análise Modal
 32 Sismo EC8_Tipo 1_X
 33 Sismo EC8_Tipo 1_Z
 38 Sismo EC8_Tipo 2_X
 39 Sismo EC8_Tipo 2_Z

Base	32: Sismo EC8 - X	33: Sismo EC8 - Z	1: PP	2: RCP1	3: RCP2	4: SOB1	6: SOB3
Tipo 1.3	34 (C) (CQC)	1 * X 0.3 * Z	32 1,00 0,30	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	35 (C) (CQC)	1 * X -0.3 * Z	32 1,00 -0,30	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	36 (C) (CQC)	0.3 * X 1 * Z	32 0,30 1,00	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	37 (C) (CQC)	0.3 * X -1 * Z	32 0,30 -1,00	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
Base	38: Sismo EC8 - X	39: Sismo EC8 - Z	1: PP	2: RCP1	3: RCP2	4: SOB1	6: SOB3
Tipo 2.3	40 (C) (CQC)	1 * X 0.3 * Z	38 1,00 0,30	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	41 (C) (CQC)	1 * X -0.3 * Z	38 1,00 -0,30	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	42 (C) (CQC)	0.3 * X 1 * Z	38 0,30 1,00	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00
	43 (C) (CQC)	0.3 * X -1 * Z	38 0,30 -1,00	1 1,00	2 1,00	3 1,00	4 1,00

A3

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA O PP

PP - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		0	-21,55	-21,1	-29,35	-30,78	-7,32	-7,81	-7,42	-7,42	-7,32	-7,31	7,20	7,81	7,33	7,33	7,19	7,19
Δ %	-29,52	100,0%	27,0%	28,5%	0,6%	-4,3%		-6,7%	-1,4%	-1,4%	0,0%	0,1%	8,5%	8,5%	1,8%	1,8%	-0,1%	-0,1%
Zona 2		-188,29	-185,03	-185,03	-185,03	-198,4	-3,71	-0,63	-3,65	-3,52	-3,46	-3,18	1,55	0	2,42	2,28	2,23	1,86
Δ %	-169,1	-11,3%	-9,4%	-9,4%	-9,4%	-17,3%		83,0%	1,6%	5,1%	6,7%	14,3%		-100,0%	56,1%	47,1%	43,9%	20,0%
Zona 3		-227,74	-224,47	-224,47	-224,47	-234,48	-4,45	-0,76	-2,25	-2,29	-4,08	-4,18	2,6	0	0,75	0,79	2,58	2,62
Δ %	-230,57	1,2%	2,6%	2,6%	2,6%	-1,7%		82,9%	49,4%	48,5%	8,3%	6,1%		-100,0%	-71,2%	-69,6%	-0,8%	0,8%

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1370,53	1293,96	1293,97	1272,55	1271,5
Zona 2	0	-75,87	-72,48	-71,16	-62,97
Zona 3	0	37,49	38,5	83,19	85,08

Viga - zona 1					
b (m)	0,6				
h (m)	1,45				
y (m)	-0,725				
I (m4)	0,1269				
A (m2)	0,4873				
σ med (MPa)	-0,06				
σ M (MPa)	-7,26				
M (kNm)	1270,8				

Pilar - zona 3					
b (m)	0,6				
h (m)	0,5				
y (m)	-0,25				
I (m4)	0,00625				
A (m2)	0,3				
σ med (MPa)	-0,925				
σ M (MPa)	-3,53				
M (kNm)	88,13				

PP - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração			
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-24,89	0	-15,01	-14,7	-26,11	-27,62	-4,96	-5,93	-5,64	-5,64	-5,56	-5,56	5,53	5,93	5,57	5,57	5,43	5,42
		100,0%	39,7%	40,9%	-4,9%	-11,0%		-19,6%	-13,7%	-13,7%	-12,1%	-12,1%		7,2%	0,7%	0,7%	-1,8%	-2,0%
Zona 2																		
Δ %	-120,17	-132,12	-131,06	-131,06	-131,06	-144,44	-2,57	-0,44	-2,55	-2,46	-2,39	-2,15	1,04	0	1,68	1,59	1,51	1,19
		-9,9%	-9,1%	-9,1%	-9,1%	-20,2%		82,9%	0,8%	4,3%	7,0%	16,3%		-100,0%	61,5%	52,9%	45,2%	14,4%
Zona 3																		
Δ %	-173,93	-171,57	-170,51	-170,51	-170,51	-180,51	-4,04	-0,57	-1,61	-1,64	-4,11	-4,24	2,64	0	0,47	0,5	2,97	3,04
		1,4%	2,0%	2,0%	2,0%	-3,8%		85,9%	60,1%	59,4%	-1,7%	-5,0%		-100,0%	-82,2%	-81,1%	12,5%	15,2%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,7	σ_{med} (MPa)	0,285
σM (MPa)	-3,34	σM (MPa)	-5,245
M (kNm)	83,50	M (kNm)	859,54

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1021,41	966,56	966,56	947,5
Zona 2	0	-52,93	-50,58	-48,74
Zona 3	0	26	26,73	88,56
				91,05

PP - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-24,89	-7,97	-22,28	-21,35	-32,14	-33,83	-4,96	-5,92	-5,56	-5,57	-5,4	-5,39	5,53	5,88	5,46	5,46	5,25	5,23
		68,0%	10,5%	14,2%	-29,1%	-35,9%		-19,4%	-12,1%	-12,3%	-8,9%	-8,7%		6,3%	-1,3%	-1,3%	-5,1%	-5,4%
Zona 2																		
Δ %	-120,17	-132,31	-131,26	-131,26	-131,26	-144,64	-2,57	-0,44	-2,56	-2,42	-2,35	-2,02	1,04	0	1,68	1,55	1,48	1,05
	-10,1%		-9,2%	-9,2%	-9,2%	-20,4%		82,9%	0,4%	5,8%	8,6%	21,4%		-100,0%	61,5%	49,0%	42,3%	1,0%
Zona 3																		
Δ %	-173,93	-171,76	-170,71	-170,71	-170,71	-180,71	-4,04	-2,25	-3,14	-3,08	-5,43	-5,58	2,64	1,11	2,01	1,95	4,29	4,38
	1,2%	1,2%	1,9%	1,9%	1,9%	-3,9%		44,3%	22,3%	23,8%	-34,4%	-38,1%		-58,0%	-23,9%	-26,1%	62,5%	65,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,7	σ_{med} (MPa)	0,285
σM (MPa)	-3,34	σM (MPa)	-5,245
M (kNm)	83,50	M (kNm)	859,54

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1016,43	949,7	950,47	918,05
Zona 2	0	-53,02	-49,59	-47,85
Zona 3	41,95	64,36	62,86	121,49
				124,56

A4

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A RCP1

RCP1 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-4,77	0	-3,52	-3,45	-4,8	-4,85	-1,2	-1,28	-1,22	-1,22	-1,2	-1,2	1,18	1,28	1,2	1,2	1,18	1,18
		100,0%	26,2%	27,7%	-0,6%	-1,7%		-6,7%	-1,7%	-1,7%	0,0%	0,0%		8,5%	1,7%	1,7%	0,0%	0,0%
Zona 2																		
Δ %	-25,69	-30	-29,15	-29,15	-29,15	-29,15	-0,59	-0,1	-0,59	-0,57	-0,56	-0,49	0,25	0	0,4	0,38	0,37	0,29
	-16,8%		-13,5%	-13,5%	-13,5%	-13,5%		83,1%	0,0%	3,4%	5,1%	16,9%		-100,0%	60,0%	52,0%	48,0%	16,0%
Zona 3																		
Δ %	-29,69	-30	-29,15	-29,15	-29,15	-29,15	-0,69	-0,1	-0,34	-0,35	-0,64	-0,64	0,45	0	0,15	0,15	0,45	0,45
	-1,0%		1,8%	1,8%	1,8%	1,8%		85,5%	50,7%	49,3%	7,2%	7,2%		-100,0%	-66,7%	-66,7%	0,0%	0,0%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	-0,12	σ _{med} (MPa)	-0,01
σ _M (MPa)	-0,57	σ _M (MPa)	-1,19
M (kNm)	14,25	M (kNm)	208,29

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	225	212,43	212,43	208,93	208,89
Zona 2	0	-12,39	-11,84	-11,62	-9,72
Zona 3	0	6,12	6,29	13,62	13,62

RCP1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-5,7	0	-3,51	-3,44	-6,01	-6,1	-1,08	-1,31	-1,24	-1,24	-1,22	-1,22	1,22	1,31	1,22	1,22	1,19	1,19
	100,0%	38,4%	39,6%	39,6%	-5,4%	-7,0%		-21,3%	-14,8%	-14,8%	-13,0%	-13,0%		7,4%	0,0%	0,0%	-2,5%	-2,5%
Zona 2																		
Δ %	-25,75	-30	-29,15	-29,15	-29,15	-29,15	-0,59	-0,1	-0,59	-0,57	-0,55	-0,46	0,25	-100,0%	0,4	0,38	0,36	0,26
	-16,5%	-13,2%	-13,2%	-13,2%	-13,2%	-13,2%		83,1%	0,0%	3,4%	6,8%	22,0%		-100,0%	60,0%	52,0%	44,0%	4,0%
Zona 3																		
Δ %	-29,75	-30	-29,15	-29,15	-29,15	-29,15	-0,88	-0,1	-0,34	-0,35	-0,9	-0,91	0,64	0	0,15	0,15	0,71	0,72
	-0,8%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%		88,6%	61,4%	60,2%	-2,3%	-3,4%		-100,0%	-76,6%	-76,6%	10,9%	12,5%

Pilar - zona 3			Viga - zona 1		
b (m)	0,6		b (m)	0,6	
h (m)	0,5		h (m)	1,65	
y (m)	-0,25		y (m)	-0,825	
l (m4)	0,00625		l (m4)	0,1352	
A (m2)	0,3		A (m2)	0,4136	
σ_{med} (MPa)	-0,12		σ_{med} (MPa)	0,07	
σ_{M} (MPa)	-0,76		σ_{M} (MPa)	-1,15	
M (kNm)	19,00		M (kNm)	188,46	

RCP1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)									Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ	-5,7	-1,78	-5,14	-4,92	-7,36	-7,49	-1,08	-1,3	-1,22	-1,22	-1,19	-1,19	1,22	1,29	1,2	1,2	1,15	1,15
Δ %	68,8%	9,8%	13,7%	13,7%	-29,1%	-31,4%		-20,4%	-13,0%	-13,0%	-10,2%	-10,2%		5,7%	-1,6%	-1,6%	-5,7%	-5,7%
Zona 2																		
Δ	-25,75	-30,05	-29,2	-29,2	-29,2	-29,2	-0,59	-0,1	-0,59	-0,56	-0,55	-0,43	0,25	0	0,4	0,37	0,35	0,23
Δ %	-16,7%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%		83,1%	0,0%	5,1%	6,8%	27,1%		-100,0%	60,0%	48,0%	40,0%	-8,0%
Zona 3																		
Δ	-29,75	-30,05	-29,2	-29,2	-29,2	-29,2	-0,88	-0,48	-0,68	-0,67	-1,2	-1,21	0,64	0,28	0,49	0,48	1	1,02
Δ %	-1,0%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%		45,5%	22,7%	23,9%	-36,4%	-37,5%		-56,3%	-23,4%	-25,0%	56,3%	59,4%

Pilar - zona 3				Viga - zona 1			
b (m)	0,6	b (m)	0,6				
h (m)	0,5	h (m)	1,65				
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825				
l (m4)	0,00625	l (m4)	0,1352				
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136				
σ_{med} (MPa)	-0,12	σ_{med} (MPa)	0,07				
σ (MPa)	-0,76	σ (MPa)	-1,15				
M (kNm)	19,00	M (kNm)	188,46				

Momento Flector (kNm)									
Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4		Tipo 5	
Zona 1	223,88	208,53	208,7	201,31	201,14				
Zona 2	0	-12,41	-11,62	-11,23	-8,28				
Zona 3	9,4	14,65	14,33	27,53	27,82				

A5

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A RCP2

RCP2 - Pórticos com Vigas de Secção Constante																
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão							Tensões (MPa) - Tração		
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Zona 1																
Δ %	-2,38	0	-1,76	-1,72	-2,4	-2,43	-0,6	-0,64	-0,61	-0,61	-0,6	-0,6	0,59	0,64	0,6	0,6
		100,0%	26,1%	27,7%	-0,8%	-2,1%		-6,7%	-1,7%	-1,7%	0,0%	0,0%		8,5%	1,7%	1,7%
Zona 2																
Δ %	-12,85	-15	-14,58	-14,57	-14,58	-14,57	-0,29	-0,05	-0,3	-0,29	-0,28	-0,24	0,13	0	0,2	0,19
		-16,7%	-13,5%	-13,4%	-13,5%	-13,4%		82,8%	-3,4%	0,0%	3,4%	17,2%		-100,0%	53,8%	46,2%
Zona 3																
Δ %	-14,85	-15	-14,58	-14,57	-14,58	-14,57	-0,35	-0,05	-0,17	-0,17	-0,32	-0,32	0,23	0	0,07	0,08
		-1,0%	1,8%	1,9%	1,8%	1,9%		85,7%	51,4%	51,4%	8,6%	8,6%		-100,0%	-69,6%	-65,2%
																-4,3%

Pilár - zona 3							Viga - zona 1						
b (m)	h (m)	y (m)	I (m ⁴)	A (m ²)	σ_{med} (MPa)	σM (MPa)	M (kNm)	b (m)	h (m)	y (m)	I (m ⁴)	A (m ²)	σ_{med} (MPa)
0,6	0,5	-0,25	0,00625	0,3	-0,06	-0,29	7,25	0,6	1,45	-0,725	0,1269	0,4873	-0,005
													-0,595
													104,15

Momento Fletor (kNm)						
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5		
Zona 1	112,5	106,21	106,22	104,46	104,44	
Zona 2	0	-6,19	-5,92	-5,81	-4,86	
Zona 3	0	3,06	3,14	6,81	6,81	

RCP2 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-2,85	0	-1,76	-1,72	-3,01	-3,05	-0,55	-0,65	-0,62	-0,62	-0,61	-0,61	0,48	0,65	0,61	0,61	0,6	0,6
	100,0%	100,0%	38,2%	39,6%	-5,6%	-7,0%		-18,2%	-12,7%	-12,7%	-10,9%	-10,9%		35,4%	27,1%	27,1%	25,0%	25,0%
Zona 2																		
Δ %	-12,88	-15	-14,58	-14,58	-14,58	-14,58	-0,29	-0,05	-0,3	-0,29	-0,28	-0,23	0,12	0	0,2	0,19	0,18	0,13
	-16,5%	-16,5%	-13,2%	-13,2%	-13,2%	-13,2%		82,8%	-3,4%	0,0%	3,4%	20,7%		-100,0%	66,7%	58,3%	50,0%	8,3%
Zona 3																		
Δ %	-14,88	-15	-14,58	-14,58	-14,58	-14,58	-0,44	-0,05	-0,17	-0,17	-0,45	-0,46	0,32	0	0,07	0,08	0,36	0,36
	-0,8%	-0,8%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%		88,6%	61,4%	61,4%	-2,3%	-4,5%		-100,0%	-78,1%	-75,0%	12,5%	12,5%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	-0,06	σmed (MPa)	-0,035
σM (MPa)	-0,38	σM (MPa)	-0,515
M (kNm)	9,50	M (kNm)	84,40

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	112,5	106,22	106,22	104,02
Zona 2	0	-6,19	-5,92	-5,71
Zona 3	0	3,04	3,13	10,1

RCP2 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-2,85	-0,89	-2,57	-2,46	-3,75	-3,75	-0,55	-0,65	-0,61	-0,61	-0,59	-0,59	0,48	0,65	0,6	0,6	0,58	0,57
		68,8%	9,8%	13,7%	-31,6%	-31,6%		-18,2%	-10,9%	-10,9%	-7,3%	-7,3%		35,4%	25,0%	25,0%	20,8%	18,8%
Zona 2																		
Δ %	-12,88	-15,02	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-0,29	-0,05	-0,3	-0,28	-0,27	-0,21	0,12	0	0,2	0,18	0,18	0,12
		-16,6%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%		82,8%	-3,4%	3,4%	6,9%	27,6%		-100,0%	66,7%	50,0%	50,0%	0,0%
Zona 3																		
Δ %	-14,88	-15,02	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-0,44	-0,24	-0,34	-0,34	-0,6	-0,61	0,32	0,14	0,24	0,24	0,5	0,51
		-0,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%		45,5%	22,7%	22,7%	-36,4%	-38,6%		-56,3%	-25,0%	-25,0%	56,3%	59,4%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	-0,06	σmed (MPa)	-0,035
σM (MPa)	-0,38	σM (MPa)	-0,515
M (kNm)	9,50	M (kNm)	84,40

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	111,94	104,26	104,35	100,66
Zona 2	0	-6,2	-5,81	-4,14
Zona 3	4,7	7,33	7,16	13,77

A6

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB1

SOB1 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		0	-2,64	-2,58	-3,6	-3,64	-0,9	-0,95	-0,91	-0,91	-0,9	-0,9	0,89	0,96	0,9	0,9	0,89	0,89
Δ %		100,0%	26,3%	27,9%	-0,6%	-1,7%		-5,6%	-1,1%	-1,1%	0,0%	0,0%		7,9%	1,1%	1,1%	0,0%	0,0%
Zona 2		-22,5	-21,86	-21,86	-21,86	-21,86	-0,44	-0,08	-0,44	-0,43	-0,42	-0,36	0,19	0	0,3	0,28	0,28	0,22
Δ %		-16,8%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%		81,8%	0,0%	2,3%	4,5%	18,2%		-100,0%	57,9%	47,4%	47,4%	15,8%
Zona 3		-22,27	-21,86	-21,86	-21,86	-21,86	-0,52	-0,08	-0,26	-0,26	-0,48	-0,48	0,34	0	0,11	0,12	0,34	0,34
Δ %		-1,0%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%		84,6%	50,0%	50,0%	7,7%	7,7%		-100,0%	-67,6%	-64,7%	0,0%	0,0%

Pilar - zona 3				
b (m)	0,6			
h (m)	0,5			
y (m)	-0,25			
I (m4)	0,00625			
A (m2)	0,3			
σmed (MPa)	-0,09			
σM (MPa)	-0,43			
M (kNm)	10,75			

Viga - zona 1				
b (m)	0,6			
h (m)	1,45			
y (m)	-0,725			
I (m4)	0,1269			
A (m2)	0,4873			
σmed (MPa)	-0,005			
σM (MPa)	-0,895			
M (kNm)	156,66			

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	168,75	159,32	156,7	156,67
Zona 2	0	-9,29	-8,88	-8,71
Zona 3	0	4,59	4,72	10,22
				10,21

SOB1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-4,27	0	-2,63	-2,58	-4,51	-4,58	-0,81	-0,98	-0,93	-0,93	-0,92	-0,92	0,91	0,98	0,92	0,92	0,89	0,89
	100,0%	38,4%	39,6%	39,6%	-5,6%	-7,3%		-21,0%	-14,8%	-14,8%	-13,6%	-13,6%		7,7%	1,1%	1,1%	-2,2%	-2,2%
Zona 2																		
Δ %	-19,32	-22,5	-21,86	-21,86	-21,86	-21,86	-0,44	-0,08	-0,44	-0,43	-0,42	-0,34	0,19	0	0,3	0,28	0,27	0,2
	-16,5%	-13,1%	-13,1%	-13,1%	-13,1%	-13,1%		81,8%	0,0%	2,3%	4,5%	22,7%		-100,0%	57,9%	47,4%	42,1%	5,3%
Zona 3																		
Δ %	-22,31	-22,5	-21,86	-21,86	-21,86	-21,86	-0,66	-0,08	-0,26	-0,26	-0,68	-0,68	0,48	0	0,11	0,11	0,53	0,54
	-0,9%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%		87,9%	60,6%	60,6%	-3,0%	-3,0%		-100,0%	-77,1%	-77,1%	10,4%	12,5%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,09	σ_{med} (MPa)	0,05
σM (MPa)	-0,57	σM (MPa)	-0,86
M (kNm)	14,25	M (kNm)	140,94

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	168,75	159,32	159,32	156,03	155,98
Zona 2	0	-9,29	-8,88	-8,57	-6,78
Zona 3	0	4,56	4,69	15,14	15,25

SOB1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração			
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-4,27	-1,34	-3,85	-3,69	-5,52	-5,62	-0,81	-0,98	-0,92	-0,92	-0,89	-0,89	0,91	0,97	0,9	0,9	0,86	0,86
		68,6%	9,8%	13,6%	-29,3%	-31,6%		-21,0%	-13,6%	-13,6%	-9,9%	-9,9%		6,6%	-1,1%	-1,1%	-5,5%	-5,5%
Zona 2																		
Δ %	-19,32	-22,53	-21,9	-21,9	-21,9	-21,9	-0,44	-0,08	-0,45	-0,42	-0,41	-0,32	0,19	0	0,3	0,28	0,26	0,18
		-16,6%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%		81,8%	-2,3%	4,5%	6,8%	27,3%		-100,0%	57,9%	47,4%	36,8%	-5,3%
Zona 3																		
Δ %	-22,31	-22,53	-21,9	-21,9	-21,9	-21,9	-0,66	-0,36	-0,51	-0,5	-0,9	-0,91	0,48	0,21	0,37	0,36	0,75	0,76
		-1,0%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%		45,5%	22,7%	24,2%	-36,4%	-37,9%		-56,3%	-22,9%	-25,0%	56,3%	58,3%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,09	σ_{med} (MPa)	0,05
σM (MPa)	-0,57	σM (MPa)	-0,86
M (kNm)	14,25	M (kNm)	140,94

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	167,91	156,39	156,53	150,98	150,86
Zona 2	0	-9,31	-8,71	-8,42	-6,21
Zona 3	7,05	10,99	10,75	20,65	20,87

A7

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB2

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ (MPa)	-0,24	σ (MPa)	-0,015
σ (MPa)	-1,15	σ (MPa)	-2,385
M (kNm)	28,75	M (kNm)	417,46

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	450	424,86	424,86	417,85	417,78
Zona 2	0	-24,78	-23,67	-23,24	-19,44
Zona 3	0	12,24	12,57	27,25	27,24

SOB2 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-11,39	0	-7,02	-6,88	-12,02	-12,21	-2,16	-2,61	-2,48	-2,48	-2,44	-2,44	2,44	2,61	2,45	2,45	2,39	2,38
	100,0%		38,4%	39,6%	-5,5%	-7,2%		-20,8%	-14,8%	-14,8%	-13,0%	-13,0%		7,0%	0,4%	0,4%	-2,0%	-2,5%
Zona 2																		
Δ %	-51,52	-60	-58,3	-58,3	-58,3	-58,3	-1,18	-0,2	-1,19	-1,14	-1,11	-0,92	0,5	0	0,8	0,75	0,72	0,53
	-16,5%		-13,2%	-13,2%	-13,2%	-13,2%		83,1%	-0,8%	3,4%	5,9%	22,0%		-100,0%	60,0%	50,0%	44,0%	6,0%
Zona 3																		
Δ %	-59,5	-60	-58,3	-58,3	-58,3	-58,3	-1,76	-0,2	-0,68	-0,69	-1,81	-1,82	1,28	0	0,29	0,31	1,42	1,43
	-0,8%		2,0%	2,0%	2,0%	2,0%		88,6%	61,4%	60,8%	-2,8%	-3,4%		-100,0%	-77,3%	-75,8%	10,9%	11,7%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,24	σ_{med} (MPa)	0,14
σM (MPa)	-1,52	σM (MPa)	-2,3
M (kNm)	38,00	M (kNm)	376,92

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	450	424,86	424,86	416,08
Zona 2	0	-24,78	-23,67	-22,85
Zona 3	0	12,17	12,51	40,38

SOB2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																									
Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão								Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5							
Zona 1	-11,39	-3,57	-10,27	-9,85	-14,72	-14,99	-2,16	-2,61	-2,44	-2,45	-2,37	-2,37	2,44	2,59	2,4	2,4	2,3	2,3							
Δ %	68,7%	9,8%	13,5%	-29,2%	-31,6%	-31,6%	-20,8%	-13,0%	-13,4%	-9,7%	-9,7%	-9,7%	6,1%	-1,6%	-1,6%	-1,6%	-5,7%	-5,7%							
Zona 2	-51,52	-60,09	-58,39	-58,39	-58,39	-58,39	-1,18	-0,2	-1,19	-1,12	-1,09	-0,86	0,5	0	0,8	0,73	0,7	0,47							
Δ %	-16,6%	-13,3%	-13,3%	-13,3%	-13,3%	-13,3%	83,1%	-0,8%	5,1%	7,6%	27,1%	-27,1%	0,5	-100,0%	60,0%	46,0%	40,0%	-6,0%							
Zona 3	-59,5	-60,09	-58,39	-58,39	-58,39	-58,39	-1,76	-0,95	-1,37	-1,34	-2,4	-2,42	1,28	0,55	0,98	0,95	2,01	2,03							
Δ %	-1,0%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	46,0%	22,2%	23,9%	-36,4%	-36,4%	-37,5%	1,28	-57,0%	-23,4%	-25,8%	57,0%	58,6%							

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,24	σ_{med} (MPa)	0,14
σM (MPa)	-1,52	σM (MPa)	-2,3
M (kNm)	38,00	M (kNm)	376,92

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	447,76	417,05	417,4	402,67
Zona 2	0	-24,82	-23,23	-22,45
Zona 3	18,79	29,31	28,66	55,07

A8

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS PARA A SOB3

SOB3 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-2,38	0	-1,76	-1,72	-2,4	-2,43	-0,6	-0,64	-0,61	-0,61	-0,6	-0,6	0,59	0,64	0,6	0,6	0,59	0,59
	100,0%		26,1%	27,7%	-0,8%	-2,1%		-6,7%	-1,7%	-1,7%	0,0%	0,0%		8,5%	1,7%	1,7%	0,0%	0,0%
Zona 2																		
Δ %	-12,85	-15	-14,58	-14,57	-14,58	-14,57	-0,29	-0,05	-0,3	-0,29	-0,28	-0,24	0,13	0	0,2	0,19	0,18	0,15
	-16,7%		-13,5%	-13,4%	-13,5%	-13,4%		82,8%	-3,4%	0,0%	3,4%	17,2%		-100,0%	53,8%	46,2%	38,5%	15,4%
Zona 3																		
Δ %	-14,85	-15	-14,58	-14,57	-14,58	-14,57	-0,35	-0,05	-0,17	-0,17	-0,32	-0,32	0,23	0	0,07	0,08	0,22	0,22
	-1,0%		1,8%	1,9%	1,8%	1,9%		85,7%	51,4%	51,4%	8,6%	8,6%		-100,0%	-69,6%	-65,2%	-4,3%	-4,3%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	-0,06	σ _{med} (MPa)	-0,005
σ _M (MPa)	-0,29	σ _M (MPa)	-0,595
M (kNm)	7,25	M (kNm)	104,15

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	112,5	106,21	106,22	104,46	104,44
Zona 2	0	-6,19	-5,92	-5,81	-4,86
Zona 3	0	3,06	3,14	6,81	6,81

SOB3 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																							
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão												Tensões (MPa) - Tração					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5					
Zona 1	-2,85	0	-1,76	-1,72	-3,01	-3,05	-0,54	-0,65	-0,62	-0,62	-0,61	-0,61	0,61	0,65	0,61	0,61	0,6	0,6					
Δ %	100,0%	38,2%	39,6%	-5,6%	-7,0%			-20,4%	-14,8%	-14,8%	-13,0%	-13,0%		6,6%	0,0%	0,0%	-1,6%	-1,6%					
Zona 2	-12,88	-15	-14,58	-14,58	-14,58	-14,58	-0,29	-0,05	-0,3	-0,29	-0,28	-0,23	0,12	0	0,2	0,19	0,18	0,13					
Δ %	-16,5%	-13,2%	-13,2%	-13,2%	-13,2%			82,8%	-3,4%	0,0%	3,4%	20,7%		-100,0%	66,7%	58,3%	50,0%	8,3%					
Zona 3	-14,88	-15	-14,58	-14,58	-14,58	-14,58	-0,44	-0,05	-0,17	-0,17	-0,45	-0,46	0,32	0	0,07	0,08	0,36	0,36					
Δ %	-0,8%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%			88,6%	61,4%	61,4%	-2,3%	-4,5%		-100,0%	-78,1%	-75,0%	12,5%	12,5%					

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,06	σ _{med} (MPa)	0,035
σ _M (MPa)	-0,38	σ _M (MPa)	-0,575
M (kNm)	9,50	M (kNm)	94,23

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	112,5	106,22	106,22	104,02	103,99
Zona 2	0	-6,19	-5,92	-5,71	-4,52
Zona 3	0	3,04	3,13	10,1	10,17

SOB3 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																							
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão												Tensões (MPa) - Tração					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5					
Zona 1	-2,85	-0,89	-2,57	-2,46	-3,68	-3,75	-0,54	-0,65	-0,61	-0,61	-0,59	-0,59	0,61	0,65	0,6	0,6	0,58	0,57					
Δ %	68,8%	9,8%	13,7%	-29,1%	-31,6%		-20,4%	-13,0%	-13,0%	-13,0%	-9,3%	-9,3%	6,6%	6,6%	-1,6%	-1,6%	-4,9%	-6,6%					
Zona 2	-12,88	-15,02	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-0,29	-0,05	-0,3	-0,28	-0,27	-0,21	0,12	0	0,2	0,18	0,18	0,12					
Δ %	-16,6%	-13,4%	-13,4%	-13,4%	-13,4%		82,8%	-3,4%	3,4%	6,9%	27,6%		0,12	-100,0%	66,7%	50,0%	50,0%	0,0%					
Zona 3	-14,88	-15,02	-14,6	-14,6	-14,6	-14,6	-0,44	-0,24	-0,34	-0,34	-0,6	-0,61	0,32	0,14	0,24	0,24	0,5	0,51					
Δ %	-0,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%		45,5%	22,7%	22,7%	-36,4%	-36,4%	-38,6%	0,32	-56,3%	-25,0%	-25,0%	56,3%	59,4%					

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,06	σ _{med} (MPa)	0,035
σ _M (MPa)	-0,38	σ _M (MPa)	-0,575
M (kNm)	9,50	M (kNm)	94,23

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	111,94	104,26	104,35	100,66	100,57
Zona 2	0	-6,2	-5,81	-5,61	-4,14
Zona 3	4,7	7,33	7,16	13,77	13,91

A9

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO1+

VENTO1+ - Pórticos com Vigas de Seção Constante																							
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão												Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5					
Zona 1	16,97	0	12,57	12,3	17,05	17,23	-4,14	-4,5	-4,22	-4,22	-4,14	-4,14	4,21	4,5	4,27	4,27	4,21	4,21					
Δ %		-100,0%	-25,9%	-27,5%	0,5%	1,5%		-8,7%	-1,9%	-1,9%	0,0%	0,0%		6,9%	1,4%	1,4%	0,0%	0,0%					
Zona 2	94,6	111,23	106,08	106,1	106,1	106,1	-0,89	0	-1,4	-1,32	-1,29	-0,95	2,07	0,32	2,11	2,03	2	1,65					
Δ %		17,6%	12,1%	12,2%	12,2%	12,2%		100,0%	-57,3%	-48,3%	-44,9%	-6,7%		-84,5%	1,9%	-1,9%	-3,4%	-20,3%					
Zona 3	108,78	111,23	106,08	106,1	106,1	106,1	-5,02	-2,8	-3,65	-3,68	-4,71	-4,71	5,9	3,54	4,36	4,39	5,41	5,41					
Δ %		2,3%	-2,5%	-2,5%	-2,5%	-2,5%		44,2%	27,3%	26,7%	6,2%	6,2%		-40,0%	-26,1%	-25,6%	-8,3%	-8,3%					

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-789,41	-744,3	-744,31	-731,87	-731,73
Zona 2	-1,21	43,38	41,91	41,15	32,51
Zona 3	-79,22	-100,21	-100,8	-126,51	-126,47

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ_{med} (MPa)	0,44	σ_{med} (MPa)	0,035
σM (MPa)	5,46	σM (MPa)	4,18
M (kNm)	-136,5	M (kNm)	-730,77

VENTO1+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	20,22	0	12,54	12,29	21,3	21,6	-4,26	-4,58	-4,29	-4,18	-4,18	-4,18	3,78	4,58	4,35	4,35	4,28	4,28
		-100,0%	-39,0%	-39,2%	5,3%	6,8%		-7,5%	-0,7%	-0,7%	1,9%	1,9%		21,2%	15,1%	15,1%	13,2%	13,2%
Zona 2																		
Δ %	94,86	111,28	106,13	106,13	106,13	106,13	-0,82	0	-1,4	-1,32	-1,27	-0,85	2,06	0,32	2,11	2,03	1,97	1,56
		17,3%	11,9%	11,9%	11,9%	11,9%		100,0%	-70,7%	-61,0%	-54,9%	-3,7%		-84,5%	2,4%	-1,5%	-4,4%	-24,3%
Zona 3																		
Δ %	109	111,28	106,13	106,13	106,13	106,13	-5,67	-2,8	-3,65	-3,67	-5,63	-5,65	6,55	3,54	4,36	4,38	6,34	6,35
		2,1%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%		50,6%	35,6%	35,3%	0,7%	0,4%		-46,0%	-33,4%	-33,1%	-3,2%	-3,1%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	0,44	σmed (MPa)	-0,24
σM (MPa)	6,11	σM (MPa)	4,02
M (kNm)	-152,75	M (kNm)	-658,79

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-789,44	-744,32	-744,32	-728,77	-728,53
Zona 2	-1,21	43,9	41,93	40,48	30,1
Zona 3	-79,2	-100,07	-100,69	-149,54	-150,02

VENTO1+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		6,27	18,24	17,49	26,02	26,5		-4,54	-4,19	-4,2	-4,03	-4,02		4,57	4,28	4,28	4,15	4,15
Δ %	20,22	-69,0%	-9,8%	-13,5%	28,7%	31,1%	-4,26	-6,6%	1,6%	1,4%	5,4%	5,6%	3,78	20,9%	13,2%	13,2%	9,8%	9,8%
Zona 2		111,45	106,3	106,3	106,3	106,3		0	-1,4	-1,29	-1,24	-0,79		0,32	2,11	2	1,95	1,44
Δ %	94,86	17,5%	12,1%	12,1%	12,1%	12,1%	-0,82	100,0%	-70,7%	-57,3%	-51,2%	3,7%	2,06	-84,5%	2,4%	-2,9%	-5,3%	-30,1%
Zona 3		111,45	106,3	106,3	106,3	106,3		-4,12	-4,85	-4,8	-6,66	-6,7		4,86	5,56	5,51	7,36	7,4
Δ %	109	2,2%	-2,5%	-2,5%	-2,5%	-2,5%	-5,67	27,3%	14,5%	15,3%	-17,5%	-18,2%	6,55	-25,8%	-15,1%	-15,9%	12,4%	13,0%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	0,44	σmed (MPa)	-0,24
σM (MPa)	6,11	σM (MPa)	4,02
M (kNm)	-152,75	M (kNm)	-658,79

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-785,1	-730,45	-731,06	-705	-704,25
Zona 2	-1,21	43,97	41,16	39,79	27,48
Zona 3	-112,19	-130,1	-128,97	-175,25	-176,26

A10

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO2+

VENTO2+ - Pórticos com Vigas de Seção Constante																							
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão												Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5					
Zona 1																							
Δ %	8,82	0	6,54	6,4	8,85	8,95	-2,16	-2,34	-2,2	-2,2	-2,16	-2,15	2,19	2,34	2,22	2,22	2,19	2,19					
		-100,0%	-25,9%	-27,4%	0,3%	1,5%		-8,3%	-1,9%	0,0%	0,5%			6,8%	1,4%	1,4%	0,0%	0,0%					
Zona 2																							
Δ %	72,2	86,02	81,61	81,64	81,64	81,64	-0,71	0	-1,07	-1,03	-1,01	-0,79	1,66	0,33	1,61	1,57	1,55	1,34					
		19,1%	13,0%	13,1%	13,1%	13,1%		100,0%	-50,7%	-45,1%	-42,3%	-11,3%		-80,1%	-3,0%	-5,4%	-6,6%	-19,3%					
Zona 3																							
Δ %	84,06	86,02	81,61	81,64	81,64	81,64	-3,67	-2,88	-2,88	-2,9	-3,43	-3,43	4,36	3,46	3,43	3,44	3,97	3,97					
		2,3%	-2,9%	-2,9%	-2,9%	-2,9%		21,5%	21,5%	21,0%	6,5%	6,5%		-20,6%	-21,3%	-21,1%	-8,9%	-8,9%					

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-411,21	-387,64	-387,71	-381,25	-381,18
Zona 2	-1,21	33,48	32,46	32,07	26,66
Zona 3	-79,21	-78,9	-79,21	-92,49	-92,47

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,45
y (m)	-0,725
I (m4)	0,1269
A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	0,015
σ _M (MPa)	2,18
M (kNm)	-380,70

Pilar - zona 3	
b (m)	0,6
h (m)	0,5
y (m)	-0,25
I (m4)	0,00625
A (m2)	0,3
σ _{med} (MPa)	0,345
σ _M (MPa)	4,015
M (kNm)	-100,375

VENTO2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	10,53	0	6,53	6,39	11,04	11,21	-2,22	-2,39	-2,23	-2,23	-2,18	-2,18	1,97	2,39	2,27	2,27	2,23	2,23
Δ %	-100,0%	-86,08	-38,0%	-39,3%	4,8%	6,5%	-7,7%	-7,7%	-0,5%	-0,5%	1,8%	1,8%	21,3%	15,2%	15,2%	15,2%	13,2%	13,2%
Zona 2	72,83	86,08	81,67	81,67	81,67	81,67	-0,71	0	-1,07	-1,03	-1	-0,75	1,67	0,24	1,61	1,57	1,54	1,29
Δ %	18,2%	18,2%	12,1%	12,1%	12,1%	12,1%	-0,71	100,0%	-50,7%	-45,1%	-40,8%	-5,6%	-85,6%	-3,6%	-3,6%	-6,0%	-7,8%	-22,8%
Zona 3	84,24	86,08	81,67	81,67	81,67	81,67	-4	-2,88	-2,88	-2,89	-3,9	-3,91	4,68	3,45	3,43	3,44	4,45	4,46
Δ %	2,2%	2,2%	-3,1%	-3,1%	-3,1%	-3,1%	-4	28,0%	28,0%	27,8%	2,5%	2,3%	-26,3%	-26,7%	-26,7%	-26,5%	-4,9%	-4,7%

Pilar - zona 3			Viga - zona 1		
b (m)	0,6		b (m)	0,6	
h (m)	0,5		h (m)	1,65	
y (m)	-0,25		y (m)	-0,825	
I (m4)	0,00625		I (m4)	0,1352	
A (m2)	0,3		A (m2)	0,4136	
σ_{med} (MPa)	0,34		σ_{med} (MPa)	-0,125	
σM (MPa)	4,34		σM (MPa)	2,10	
M (kNm)	-108,50		M (kNm)	-343,33	

VENTO2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	10,53	4,68	10,87	10,48	14,88	15,12	-2,22	-2,36	-2,18	-2,18	-2,1	-2,09	1,97	2,39	2,23	2,24	2,17	2,17
		-55,6%	3,2%	-0,5%	41,3%	43,6%		-6,3%	1,8%	1,8%	5,4%	5,9%		21,3%	13,2%	13,7%	10,2%	10,2%
Zona 2																		
Δ %	72,83	86,2	81,8	81,8	81,8	81,8	-0,71	0	-1,07	-1,01	-0,98	-0,69	1,67	0,24	1,61	1,56	1,53	1,24
		18,4%	12,3%	12,3%	12,3%	12,3%		100,0%	-50,7%	-42,3%	-38,0%	2,8%		-85,6%	-3,6%	-6,6%	-8,4%	-25,7%
Zona 3																		
Δ %	84,24	86,2	81,8	81,8	81,8	81,8	-4	-3,56	-3,5	-3,48	-4,43	-4,45	4,68	4,14	4,05	4,02	4,98	5
		2,3%	-2,9%	-2,9%	-2,9%	-2,9%		11,0%	12,5%	13,0%	-10,8%	-11,3%		-11,5%	-13,5%	-14,1%	6,4%	6,8%

Pilar - zona 3			Viga - zona 1		
b (m)	0,6		b (m)	0,6	
h (m)	0,5		h (m)	1,65	
y (m)	-0,25		y (m)	-0,825	
I (m4)	0,00625		I (m4)	0,1352	
A (m2)	0,3		A (m2)	0,4136	
σ_{med} (MPa)	0,34		σ_{med} (MPa)	-0,125	
σ_{M} (MPa)	4,34		σ_{M} (MPa)	2,10	
M (kNm)	-108,50		M (kNm)	-343,33	

A11

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO1-

VENTO1 - - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-12,33	-7,41	-6,92	-5,07	-5,22	-1,61	-1,7	-1,59	-1,59	-1,61	-1,61	1,59	1,65	1,56	1,56	1,59	1,59
Δ %	-4,82	-155,8%	-53,7%	-43,6%	-5,2%	-8,3%	-5,6%	-5,6%	1,2%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%	-1,9%	-1,9%	0,0%	0,0%
Zona 2		45,23	41,95	41,97	41,97	41,97	-0,43	0	-0,48	-0,52	-0,51	-0,44	0,94	0,24	0,76	0,8	0,79	0,72
Δ %	37,08	22,0%	13,1%	13,2%	13,2%	13,2%	-0,43	100,0%	-11,6%	-20,9%	-18,6%	-2,3%	0,94	-74,5%	-19,1%	-14,9%	-16,0%	-23,4%
Zona 3		45,23	41,95	41,97	41,97	41,97	-4,84	-3,61	-3,92	-3,98	-4,38	-4,36	5,2	3,91	4,2	4,26	4,66	4,64
Δ %	43,52	3,9%	-3,6%	-3,6%	-3,6%	-3,6%	-4,84	25,4%	19,0%	17,8%	9,5%	9,9%	5,2	-24,8%	-19,2%	-18,1%	-10,4%	-10,8%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	0,18	σ _{med} (MPa)	-0,01
σ _M (MPa)	5,02	σ _M (MPa)	1,60
M (kNm)	-125,5	M (kNm)	-280,06

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-294,41	-276,96	-276,97	-280,67	-280,77
Zona 2	-2,37	15,45	16,54	16,24	14,47
Zona 3	-94,07	-101,62	-103,06	-113,08	-112,6

VENTO1- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-3,57	-12,21	-7,39	-6,91	-3,33	-3,41	-1,67	-1,74	-1,63	-1,62	-1,63	-1,63	1,42	1,68	1,59	1,59	1,61	1,61
Δ %		-242,0%	-107,0%	-93,6%	6,7%	4,5%		-4,2%	2,4%	3,0%	2,4%	2,4%		18,3%	12,0%	12,0%	13,4%	13,4%
Zona 2	37,18	45,28	42	42	42	42	-0,42	0	-0,48	-0,52	-0,5	-0,52	0,93	0,24	0,76	0,8	0,78	0,8
Δ %		21,8%	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%		100,0%	-14,3%	-23,8%	-19,0%	-23,8%		-74,2%	-18,3%	-14,0%	-16,1%	-14,0%
Zona 3	43,6	45,28	42	42	42	42	-5,09	-3,62	-3,93	-3,98	-4,76	-4,75	5,46	3,92	4,21	4,26	5,04	5,03
Δ %		3,9%	-3,7%	-3,7%	-3,7%	-3,7%		28,9%	22,8%	21,8%	6,5%	6,7%		-28,2%	-22,9%	-22,0%	-7,7%	-7,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,185	σ _{med} (MPa)	-0,125
σ _M (MPa)	5,275	σ _M (MPa)	1,55
M (kNm)	-131,88	M (kNm)	-253,19

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-294,44	-276,98	-276,98	-279,41
Zona 2	-2,32	15,45	16,55	15,97
Zona 3	-94,18	-101,68	-103,12	-122,52

VENTO1- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração			
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-3,57	-9,78	-5,19	-4,9	-1,35	-1,36	-1,67	-1,78	-1,65	-1,65	-1,63	-1,63	1,42	1,73	1,62	1,62	1,62	1,62
Δ %		-173,9%	-45,4%	-37,3%	62,2%	61,9%		-6,6%	1,2%	1,2%	2,4%	2,4%		21,8%	14,1%	14,1%	14,1%	14,1%
Zona 2	37,18	43,35	42,07	42,07	42,07	42,07	-0,42	0	-0,48	-0,51	-0,49	-0,52	0,93	0,25	0,76	0,79	0,77	0,8
Δ %		16,6%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%		100,0%	-14,3%	-21,4%	-16,7%	-23,8%		-73,1%	-18,3%	-15,1%	-17,2%	-14,0%
Zona 3	43,6	45,35	42,07	42,07	42,07	42,07	-5,09	-4,12	-4,39	-4,42	-5,19	-5,19	5,46	4,42	4,67	4,7	5,47	5,47
Δ %		4,0%	-3,5%	-3,5%	-3,5%	-3,5%		19,1%	13,8%	13,2%	-2,0%	-2,0%		-19,0%	-14,5%	-13,9%	0,2%	0,2%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,185	σ _{med} (MPa)	-0,125
σ _M (MPa)	5,275	σ _M (MPa)	1,55
M (kNm)	-131,88	M (kNm)	-253,19

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-302,99	-281,71	-281,47	-279,55
Zona 2	-2,36	15,47	16,25	15,68
Zona 3	-106,82	-113,16	-113,92	-133,2

A12

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO VENTO2-

VENTO2 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-12,97	-12,23	-13,42	-12,82	-13,26	-13,5	-0,43	-0,99	-0,48	-0,48	-0,43	-0,43	0,37	0,94	0,43	0,43	0,37	0,37
	5,7%	5,7%	-3,5%	1,2%	-2,2%	-4,1%		-130,2%	-11,6%	-11,6%	0,0%	0,0%		154,1%	16,2%	16,2%	0,0%	0,0%
Zona 2																		
Δ %	15,18	20,02	17,48	14,51	17,51	17,51	-0,29	0	-0,14	-0,23	-0,23	-0,23	0,53	0,16	0,26	0,34	0,34	0,35
		31,9%	15,2%	-4,4%	15,3%	15,3%		100,0%	51,7%	20,7%	20,7%	20,7%		-69,8%	-50,9%	-35,8%	-35,8%	-34,0%
Zona 3																		
Δ %	18,8	20,02	17,48	14,51	17,51	17,51	-3,49	-3,7	-3,15	-3,2	-3,1	-3,09	3,66	3,83	3,27	3,32	3,22	3,2
	6,5%	6,5%	-7,0%	-22,8%	-6,9%	-6,9%		-6,0%	9,7%	8,3%	11,2%	11,5%		4,6%	-10,7%	-9,3%	-12,0%	-12,6%

Momento Fletor (kNm)									
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5				
Zona 1	83,78	79,7	79,63	69,95	69,78				
Zona 2	-2,32	5,14	7,13	7,2	7,29				
Zona 3	-94,07	-80,31	-81,47	-79,07	-78,59				

Viga - zona 1									
	b (m)	h (m)	y (m)	I (m4)	A (m2)	σ_{med} (MPa)	σM (MPa)	M (kNm)	
	0,6	1,45	-0,725	0,1269	0,4873	-0,03	-0,4	70,01	

Pilar - zona 3									
	b (m)	h (m)	y (m)	I (m4)	A (m2)	σ_{med} (MPa)	σM (MPa)	M (kNm)	
	0,6	0,5	-0,25	0,00625	0,3	0,085	3,575	-89,375	

VENTO2- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-13,26	-12,21	-13,41	-12,8	-13,59	-13,83	-0,39	-0,51	-0,49	-0,49	-0,44	-0,44	0,37	0,46	0,43	0,43	0,37	0,37
Δ %		7,9%	-1,1%	3,5%	-2,5%	-4,3%		-30,8%	-25,6%	-25,6%	-12,8%	-12,8%		24,3%	16,2%	16,2%	0,0%	0,0%
Zona 2	15,17	20,08	17,54	17,54	17,54	17,54	-0,3	-0,03	-0,15	-0,23	-0,23	-0,24	0,54	0,16	0,26	0,34	0,35	0,35
Δ %		32,4%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%		90,0%	50,0%	23,3%	23,3%	20,0%		-70,4%	-51,9%	-37,0%	-35,2%	-35,2%
Zona 3	18,84	20,08	17,54	17,54	14,54	17,54	-3,42	-3,7	-3,16	-3,2	-3,03	-3,01	3,59	3,83	3,28	3,32	3,15	3,13
Δ %		6,6%	-6,9%	-6,9%	-22,8%	-6,9%		-8,2%	7,6%	6,4%	11,4%	12,0%		6,7%	-8,6%	-7,5%	-12,3%	-12,8%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	0,085	σ_{med} (MPa)	-0,01
σ_M (MPa)	3,505	σ_M (MPa)	-0,38
M (kNm)	-87,63	M (kNm)	62,27

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	83,63	79,56	79,56	69,65	69,47
Zona 2	-2,37	5,09	7,14	7,27	7,34
Zona 3	-94,18	-80,43	-81,58	-77,31	-76,82

VENTO2- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-13,26	-11,38 14,2%	-12,56 5,3%	-11,91 10,2%	-12,49 5,8%	-12,74 3,9%	-0,39	-0,45 -15,4%	-0,43 -10,3%	-0,43 -10,3%	-0,37 5,1%	-0,37 5,1%	0,37	0,4 8,1%	0,37 0,0%	0,37 0,0%	0,31 -16,2%	0,3 -18,9%
Zona 2																		
Δ %	15,17	20,1 32,5%	17,56 15,8%	17,56 15,8%	17,56 15,8%	17,56 15,8%	-0,3	-0,03 90,0%	-0,15 50,0%	-0,23 23,3%	-0,24 20,0%	-0,24 20,0%	0,54	0,16 -70,4%	0,27 -50,0%	0,35 -35,2%	0,35 -35,2%	0,36 -33,3%
Zona 3																		
Δ %	18,84	20,1 6,7%	17,56 -6,8%	17,56 -6,8%	17,56 -6,8%	17,56 -6,8%	-3,42	-3,57 -4,4%	-3,04 11,1%	-3,09 9,6%	-2,96 13,5%	-2,94 14,0%	3,59	3,7 3,1%	3,15 -12,3%	3,21 -10,6%	3,08 -14,2%	3,06 -14,8%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	0,085	σ_{med} (MPa)	-0,01
σ_M (MPa)	3,505	σ_M (MPa)	-0,38
M (kNm)	-87,63	M (kNm)	62,27

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	73,16	68,15	68,7	58,06	57,67
Zona 2	-2,31	5,17	7,3	7,41	7,42
Zona 3	-90,86	-77,39	-78,7	-75,54	-75,04

A13

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1

ULS_SOB1 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-54,87	0	-40,18	-39,34	-54,74	-56,84	-13,67	-14,59	-13,86	-13,85	-13,66	-13,65	13,45	14,59	13,69	13,69	13,43	13,42
	100,0%		26,8%	28,3%	0,2%	-3,6%		-6,7%	-1,4%	-1,3%	0,1%	0,1%		8,5%	1,8%	1,8%	-0,1%	-0,2%
Zona 2																		
Δ %	-309,2	-348,69	-341,61	-341,61	-341,61	-359,66	-6,86	83,1%	-6,8	-6,54	-6,45	-5,82	2,89	0	4,52	4,27	4,17	3,43
	-12,8%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-16,3%			0,9%	4,7%	6,0%	15,2%		-100,0%	56,4%	47,8%	44,3%	18,7%
Zona 3																		
Δ %	-404,8	-401,95	-394,86	-394,86	-394,86	-408,37	-8,19	-1,34	-4,11	-4,19	-7,52	-7,6	4,94	0	1,48	1,56	4,89	4,95
	0,7%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	-0,9%		83,6%	49,8%	48,8%	8,2%	7,2%		-100,0%	-70,0%	-68,4%	-1,0%	0,2%

A14

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V1+

ULS SOB1+V1+ - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração			
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-39,6	0	-29,02	-28,27	-39,39	-41,33	-9,88	-10,54	-10,01	-10,01	-9,87	-9,87	9,72	10,54	9,9	9,9	9,71	9,7
	100,0%		26,7%	28,6%	0,5%	-4,4%		-6,7%	-1,3%	-1,3%	0,1%	0,1%		8,4%	1,9%	1,9%	-0,1%	-0,2%
Zona 2																		
Δ %	-224,06	-248,58	-246,14	-246,11	-246,11	-264,17	-5	-0,87	-4,9	-4,72	-4,65	-4,34	2,13	0	3,26	3,08	3	2,5
	-10,9%	-10,9%	-9,9%	-9,8%	-9,8%	-17,9%		82,6%	2,0%	5,6%	7,0%	13,2%		-100,0%	53,1%	44,6%	40,8%	17,4%
Zona 3																		
Δ %	-306,9	-301,84	-299,39	-299,37	-299,37	-312,87	-2,88	-3,86	-1,81	-1,76	-2,64	-2,8	0,42	1,84	0	0	0,66	0,71
	1,6%	1,6%	2,4%	2,5%	2,5%	-1,9%		-34,0%	37,2%	38,9%	8,3%	2,8%		338,1%	-100,0%	-100,0%	57,1%	69,0%

Pilar - zona 3									
b (m)	0,6								
h (m)	0,5								
y (m)	-0,25								
I (m4)	0,00625								
A (m2)	0,3								
σ_{med} (MPa)	-1,23								
σ_M (MPa)	-1,65								
M (kNm)	41,25								

Viga - zona 1									
b (m)	0,6								
h (m)	1,45								
y (m)	-0,725								
I (m4)	0,1269								
A (m2)	0,4873								
σ_{med} (MPa)	-0,08								
σ_M (MPa)	-9,8								
M (kNm)	1715,34								

Momento Fletor (kNm)									
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5				
Zona 1	1848,5	1746,13	1746,13	1717,37	1715,96				
Zona 2	-1,09	-101,96	-97,41	-95,63	-86,38				
Zona 3	-71,24	-20,29	-18,93	41,31	43,93				

A15

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V2+

ULS SOB1+V2+ - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-46,93	0	-34,3	-33,58	-46,77	-48,78	-11,69	-12,48	-11,86	-11,85	-11,69	-11,68
Δ %	100,0%	100,0%	26,9%	28,4%	0,3%	-3,9%	-6,8%	-6,8%	-1,5%	-1,4%	0,0%	0,1%
Zona 2	-243,77	-271,28	-268,16	-268,13	-268,13	-286,19	-5,37	-0,95	-5,35	-5,13	-5,05	-4,62
Δ %	-11,3%	-11,3%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-17,4%	82,3%	82,3%	0,4%	4,5%	6,0%	14,0%
Zona 3	-329,15	-324,53	-321,41	-321,39	-321,39	-334,89	-4,27	-3,93	-1,12	1,07	-3,95	-4,1
Δ %	1,4%	1,4%	2,4%	2,4%	2,4%	-1,7%	8,0%	8,0%	73,8%	125,1%	7,5%	4,0%

ULS SOB1+V2+ - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-46,93	0	-34,3	-33,58	-46,77	-48,78	-11,69	-12,48	-11,86	-11,85	-11,69	-11,68
Δ %	100,0%	100,0%	26,9%	28,4%	0,3%	-3,9%	-6,8%	-6,8%	-1,5%	-1,4%	0,0%	0,1%
Zona 2	-243,77	-271,28	-268,16	-268,13	-268,13	-286,19	-5,37	-0,95	-5,35	-5,13	-5,05	-4,62
Δ %	-11,3%	-11,3%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-17,4%	82,3%	82,3%	0,4%	4,5%	6,0%	14,0%
Zona 3	-329,15	-324,53	-321,41	-321,39	-321,39	-334,89	-4,27	-3,93	-1,12	1,07	-3,95	-4,1
Δ %	1,4%	1,4%	2,4%	2,4%	2,4%	-1,7%	8,0%	8,0%	73,8%	125,1%	7,5%	4,0%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ_{med} (MPa)	-1,32	σ_{med} (MPa)	-0,09
σM (MPa)	-2,95	σM (MPa)	-11,6
M (kNm)	73,75	M (kNm)	2030,40

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2188,88	2067,12	2067,07	2032,93
Zona 2	-1,09	-111,32	-105,92	-103,8
Zona 3	-71,23	-1,11	0,5	71,98

ULS SOB1+V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-42,07	0	-25,45	-24,93	-44,24	-46,42	-8,23	-9,97	-9,49	-9,35	-9,35	-9,35	9,31	9,97	9,37	9,37	9,13	9,12
Zona 2																		
Δ %	-177,81	-195,39	-195,26	-195,26	-195,26	-213,31	-3,81	-0,69	-3,86	-3,7	-3,58	-3,19	1,55	0	2,56	2,4	2,28	1,77
Zona 3																		
Δ %	-252,71	-248,64	-248,51	-248,51	-248,51	-262,01	-4	-3,68	-1,5	-1,45	-4,4	-4,59	1,98	2,02	0	0	2,74	2,84
		1,6%	1,7%	1,7%	1,7%	-3,7%		8,0%	62,5%	63,8%	-10,0%	-14,8%	-14,8%	2,0%	-100,0%	-100,0%	38,4%	43,4%

Pilar - zona 3					Viga - zona 1				
b (m)	0,6				b (m)	0,6			
h (m)	0,5				h (m)	1,65			
y (m)	-0,25				y (m)	-0,825			
I (m4)	0,00625				I (m4)	0,1352			
A (m2)	0,3				A (m2)	0,4136			
σ_{med} (MPa)	-1,01				σ_{med} (MPa)	0,54			
σ_{M} (MPa)	-2,99				σ_{M} (MPa)	-8,77			
M (kNm)	74,75				M (kNm)	1437,22			

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1731,66	1625,01	1625,01	1592,71	1591,12
Zona 2	-1,09	-80,33	-76,33	-73,23	-61,97
Zona 3	-71,28	-16,68	-15,43	89,25	92,84

ULS_SOB1+V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-42,07	-12,15	-36,48	-34,9	-53,18	-55,66	-8,23	-9,95	-9,35	-9,36	-9,08	-9,06	9,31	9,89	9,18	9,19	8,82	8,8
		71,1%	13,3%	17,0%	-26,4%	-32,3%		-20,9%	-13,6%	-13,7%	-10,3%	-10,1%		6,2%	-1,4%	-1,3%	-5,3%	-5,5%
Zona 2																		
Δ %	-177,81	-195,68	-195,55	-195,55	-195,55	-213,61	-3,81	-0,7	-3,87	-3,64	-3,52	-2,96	1,55	0	2,57	2,33	2,22	1,54
		-10,1%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-20,1%		81,6%	-1,6%	4,5%	7,6%	22,3%		-100,0%	65,8%	50,3%	43,2%	-0,6%
Zona 3																		
Δ %	-252,71	-248,93	-248,81	-248,81	-248,81	-262,31	-4	-0,85	-2,76	-2,65	6,63	6,85	1,98	0	1,1	1	4,97	5,11
		1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	-3,8%		78,8%	31,0%	33,8%	265,8%	-71,3%		-100,0%	-44,4%	-49,5%	151,0%	158,1%

Pilar - zona 3					Viga - zona 1				
b (m)	0,6				b (m)	0,6			
h (m)	0,5				h (m)	1,65			
y (m)	-0,25				y (m)	-0,825			
I (m4)	0,00625				I (m4)	0,1352			
A (m2)	0,3				A (m2)	0,4136			
σ_{med} (MPa)	-1,01				σ_{med} (MPa)	0,54			
σ_{M} (MPa)	-2,99				σ_{M} (MPa)	-8,77			
M (kNm)	74,75				M (kNm)	1437,22			

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1708,98	1596,43	1597,73	1542,82	1538,95
Zona 2	-1,09	-80,46	-74,65	-71,71	-56,27
Zona 3	-0,39	48,15	45,63	144,89	149,49

A16

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V1-

ULS_SOB1+V1 - Pórticos com Vigas de Secção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ	-59,21	-11,02	-46,85	-45,57	-59,3	-61,53	-12,24	-13,1	-12,45	-12,45	-12,23	-12,22	12,00	13,06	12,26	12,26	11,98	11,97
	81,4%		20,9%	23,0%	-0,2%	-3,9%		-7,0%	-1,7%	-1,7%	0,1%	0,2%		8,8%	2,2%	2,2%	-0,2%	-0,2%
Zona 2																		
Δ	-275,84	-307,98	-303,85	-303,83	-303,83	-321,89	-6,02	-1,11	-6,12	-5,82	-5,73	-5,18	2,5	0	4,09	3,8	3,71	3,03
	-11,7%		-10,2%	-10,1%	-10,1%	-16,7%		81,6%	-1,7%	3,3%	4,8%	14,0%		-100,0%	63,6%	52,0%	48,4%	21,2%
Zona 3																		
Δ	-365,63	-361,24	-357,11	-357,08	-357,08	-370,59	-3,51	-4,59	-2,05	-2,01	-3,33	-3,49	0,58	2,18	0	0	0,95	1,02
	1,2%		2,3%	2,3%	2,3%	-1,4%		-30,8%	41,6%	42,7%	5,1%	0,6%		275,9%	-100,0%	-100,0%	63,8%	75,9%

Pilar - zona 3					Viga - zona 1				
b (m)	0,6				b (m)	0,6			
h (m)	0,5				h (m)	1,45			
y (m)	-0,25				y (m)	-0,725			
I (m4)	0,00625				I (m4)	0,1269			
A (m2)	0,3				A (m2)	0,4873			
σmed (MPa)	-1,465				σmed (MPa)	-0,12			
σM(MPa)	-2,045				σM(MPa)	-12,12			
M (kNm)	51,13				M (kNm)	2121,42			

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2293,99	2166,73	2166,74	2123,46	2121,82
Zona 2	-2,17	-127,57	-120,25	-118,05	-102,61
Zona 3	-84,61	-21,53	-20,73	53,44	56,42

ULS_SOB1+V1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-54,76	-10,99	-37,98	-36,9	-57,17	-59,58	-8,72	-10,6	-10,1	-10,1	-9,9	-9,61	9,80	10,55	9,92	9,92	9,63	9,61
	79,9%	79,9%	30,6%	32,6%	-4,4%	-8,8%		-21,6%	-15,8%	-15,8%	-13,5%	-10,2%		7,7%	1,2%	1,2%	-1,7%	-1,9%
Zona 2																		
Δ %	-209,91	-232,11	-230,96	-230,96	-230,96	-249,01	-4,48	-8,6	-4,3	-4,4	-4,27	-3,74	1,8	0	3,09	2,86	2,73	2,08
	-10,6%	-10,6%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-18,6%		80,8%	-6,3%	-1,8%	4,7%	16,5%		-100,0%	71,7%	58,9%	51,7%	15,6%
Zona 3																		
Δ %	-289,28	-285,36	-284,21	-284,21	-284,21	-297,71	-3,3	-4,34	-2,31	-2,2	-3,86	-4,07	0,99	2,44	0,56	0,46	1,97	2,09
	1,4%	1,4%	1,8%	1,8%	1,8%	-2,9%		-31,5%	30,0%	33,3%	-17,0%	-23,3%		146,5%	-43,4%	-53,5%	99,0%	111,1%

Pilar - zona 3				Viga - zona 1			
b (m)	0,6	b (m)	0,6				
h (m)	0,5	h (m)	1,65				
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825				
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352				
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136				
σ_{med} (MPa)	-1,155	σ_{med} (MPa)	0,54				
σ (MPa)	-2,145	σ (MPa)	-9,26				
M (kNm)	53,63	M (kNm)	1517,52				

Momento Flector (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1822,66	1724,73	1724,73	1687	1681,24
Zona 2	-2,13	-96,59	-90,67	-87,42	-72,71
Zona 3	-84,77	-37,24	-37	72,89	76,93

ULS_SOB1+V1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-25,16	-50,93	-48,74	-67,78	-70,5	-8,72	-10,53	-9,9	-9,91	-9,58	-9,56	9,80	10,41	9,66	9,67	9,25	9,22
Δ %		54,1%	7,0%	11,0%	-23,8%	-28,7%		-20,8%	-13,5%	-13,6%	-9,9%	-9,6%		6,2%	-1,4%	-1,3%	-5,6%	-5,9%
Zona 2		-232,45	-231,31	-231,31	-231,31	-249,37	-4,48	-0,85	-4,64	-4,33	-4,2	-3,5	1,8	0	3,1	2,79	2,66	1,84
Δ %		-10,7%	-10,2%	-10,2%	-10,2%	-18,8%		81,0%	-3,6%	3,3%	6,3%	21,9%		-100,0%	72,2%	55,0%	47,8%	2,2%
Zona 3		-285,7	-284,56	-284,56	-284,56	-298,07	-3,3	-1,35	-2,2	-2,05	-6,18	-6,43	0,99	0	0,3	0,15	4,29	4,44
Δ %		1,2%	1,6%	1,6%	1,6%	-3,0%		59,1%	33,3%	37,9%	-87,3%	-94,8%		-100,0%	-69,7%	-84,8%	333,3%	348,5%

Pilar - zona 3				Viga - zona 1			
b (m)			0,6	b (m)			0,6
h (m)			0,5	h (m)			1,65
y (m)			-0,25	y (m)			-0,825
I (m4)			0,00625	I (m4)			0,1352
A (m2)			0,3	A (m2)			0,4136
σ_{med} (MPa)			-1,155	σ_{med} (MPa)			0,54
σ (MPa)			-2,145	σ (MPa)			-9,26
M (kNm)			53,63	M (kNm)			1517,52

A17

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB1+V2-

ULS_SOB1+V2 - Pórticos com Vigas de Secção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-66,54	-11,02	-52,28	-50,88	-66,67	-68,99	-14,05	-15,1	-14,35	-14,34	-14,1	-14,09	13,78	15,06	14,13	14,13	13,82	13,81
		83,4%	21,4%	23,5%	-0,2%	-3,7%		-7,5%	-2,1%	-2,1%	-0,4%	-0,3%		9,3%	2,5%	2,5%	0,3%	0,2%
Zona 2																		
Δ %	-295,54	-330,68	-325,88	-325,85	-325,85	-343,91	-6,39	-1,19	-6,56	-6,24	-6,14	-5,46	2,62	0	4,39	4,06	3,96	3,17
		-11,9%	-10,3%	-10,3%	-10,3%	-16,4%		81,4%	-2,7%	2,3%	3,9%	14,6%		-100,0%	67,6%	55,0%	51,1%	21,0%
Zona 3																		
Δ %	-387,88	-383,93	-379,13	-379,1	-379,1	-379,1	-4,9	-4,66	-1,36	-1,33	-4,63	-4,79	1,79	2,1	0	0	2,1	2,17
		1,0%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%		4,9%	72,2%	72,9%	5,5%	2,2%		17,3%	-100,0%	-100,0%	17,3%	21,2%

Momento Fletor (kNm)									
Tipo 1					Tipo 2				
Tipo 3					Tipo 4				
Tipo 5					Tipo 6				
Zona 1	2644,74	2496,45	2497,39	2448,71	2443,03				
Zona 2	-2,13	-136,93	-128,76	-126,22	-107,87				
Zona 3	-84,6	-2,38	-1,54	84,06	87,02				

Viga - zona 1									
b (m)	0,6								
h (m)	1,45								
y (m)	-0,725								
I (m4)	0,1269								
A (m2)	0,4873								
σmed (MPa)	-0,135								
σM(MPa)	-13,915								
M (kNm)	2435,60								

Pilar - zona 3									
b (m)	0,6								
h (m)	0,5								
y (m)	-0,25								
I (m4)	0,00625								
A (m2)	0,3								
σmed (MPa)	-1,555								
σM(MPa)	-3,345								
M (kNm)	83,63								

ULS_SOB1+V2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-63,48	-10,99	-43,39	-42,2	-66,4	-68,96	-10,35	-12,58	-11,97	-11,97	-11,75	-11,74	11,64	12,52	11,77	11,77	11,43	11,41
Δ %		82,7%	31,6%	33,5%	-4,6%	-8,6%		-21,5%	-15,7%	-15,7%	-13,5%	-13,4%		7,6%	1,1%	1,1%	-1,8%	-2,0%
Zona 2	-229,71	-254,79	-252,97	-252,97	-252,97	-271,03	-4,83	-0,93	-5,08	-4,81	-4,65	-3,98	1,91	0	3,39	3,12	2,97	2,17
Δ %		-10,9%	-10,1%	-10,1%	-10,1%	-18,0%		80,7%	-5,2%	0,4%	3,7%	17,6%		-100,0%	77,5%	63,4%	55,5%	13,6%
Zona 3	-311,57	-308,04	-306,23	-306,23	-306,23	-319,73	-4,98	-4,42	-1,75	-1,73	-5,56	-5,78	2,49	2,36	0	0	3,52	3,65
Δ %		1,1%	1,7%	1,7%	1,7%	-2,6%		11,2%	64,9%	65,3%	-11,6%	-16,1%		-5,2%	-100,0%	-100,0%	41,4%	46,6%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,245	σ _{med} (MPa)	0,645
σ _M (MPa)	-3,735	σ _M (MPa)	-10,995
M (kNm)	93,38	M (kNm)	1801,85

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	2174,26	2045,62	1997,14	1995,28	
Zona 2	-2,17	-105,95	-99,18	-95,29	-76,91
Zona 3	-84,77	-18,13	-17,62	113,57	117,83

ULS_SOB1+V2- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)									Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-63,48	-26,6	-57,57	-55,05	-77,81	-80,74	-10,35	-12,5	-11,75	-11,75	-11,36	-11,34	11,64	12,37	11,47	11,49	10,99	10,95
		58,1%	9,3%	13,3%	-22,6%	-27,2%	-4,83	-20,8%	-13,5%	-13,5%	-9,8%	-9,6%	6,3%	-1,5%	-1,3%	-5,6%	-5,9%	
Zona 2																		
Δ %	-229,71	-255,17	-253,36	-253,36	-253,36	-271,42	-4,83	-0,94	-5,09	-4,73	-4,58	-3,7	1,91	0	3,4	3,04	2,89	1,89
		-11,1%	-10,3%	-10,3%	-10,3%	-18,2%	-4,83	80,5%	-5,4%	2,1%	5,2%	23,4%	-3,7	-100,0%	78,0%	59,2%	51,3%	-1,0%
Zona 3																		
Δ %	-311,57	-308,42	-306,61	-306,61	-360,61	-320,12	-4,98	-1,21	-3,56	-3,39	-8,33	-8,6	2,49	0	1,51	1,34	6,29	6,46
	1,0%	1,6%	1,6%	1,6%	-15,7%	-2,7%	-4,98	75,7%	28,5%	31,9%	-67,3%	-72,7%	2,49	-100,0%	-39,4%	-46,2%	152,6%	159,4%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,245	σ _{med} (MPa)	0,645
σ _M (MPa)	-3,735	σ _M (MPa)	-10,995
M (kNm)	93,38	M (kNm)	1801,85

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	2143,23	2000,29	1925,74	1921,18	
Zona 2	-2,17	-106,12	-97,06	-93,4	-69,84
Zona 3	4,45	63,4	59,17	182,75	188,27

A18

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2

Pilar - zona 3			Viga - zona 1		
b (m)	0.6		b (m)	0.6	
h (m)	0.5		h (m)	1.45	
y (m)	-0.25		y (m)	-0.725	
I (m4)	0.00625		I (m4)	0.1289	
A (m2)	0.3		A (m2)	0.4873	
σ_{med} (MPa)	-1.85		σ_{med} (MPa)	-0.125	
σM (MPa)	-7.64		σM (MPa)	-15.795	
M (kNm)	191		M (kNm)	2764.67	

ULS SOB2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
		Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-62,23	0	-37,91	-37,13	-64,45	-67,96	-12,02	-14,58	-13,86	-13,86	-13,65	-13,64	13,59	14,56	13,67	13,68	13,33	13,31
Δ %	100,0%	39,1%	40,3%	-3,6%	-3,6%	-9,2%		-21,3%	-15,3%	-15,3%	-13,6%	-13,5%		7,1%	0,6%	0,7%	-1,9%	-2,1%
Zona 2	-291,65	-329,11	-323,41	-323,41	-323,41	-341,47	-6,42	-1,1	-6,43	-6,19	-6,01	-5,21	2,65	0	4,27	4,03	3,85	2,93
Δ %	-12,8%	-10,9%	-10,9%	-10,9%	-10,9%	-17,1%		82,9%	-0,2%	3,6%	6,4%	18,8%		-100,0%	61,1%	52,1%	45,3%	10,6%
Zona 3	-384,31	-382,36	-376,67	-376,67	-376,67	-390,17	-9,86	-1,27	-3,88	-3,96	-10,1	-10,3	6,77	0	1,37	1,45	7,59	7,7
Δ %	0,5%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	-1,5%		87,1%	60,6%	59,8%	-2,4%	-4,5%		-100,0%	-79,8%	-78,6%	12,1%	13,7%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,545	σ _{med} (MPa)	0,785
σ _M (MPa)	-8,315	σ _M (MPa)	-12,805
M (kNm)	207,88	M (kNm)	2098,47

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2509,53	2372,32	2372,32	2324,54
Zona 2	0	-133,72	-127,76	-123,21
Zona 3	0	65,67	67,53	221,02

ULS_SOB2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)									Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ	-62,23	-19,7	-55,89	-53,56	-80,37	-83,73	-12,02	-14,54	-13,63	-13,66	-13,26	-13,24	13,59	14,44	13,38	13,4	12,87	12,83
	68,3%	10,2%	13,9%	13,9%	-29,1%	-34,5%		-21,0%	-13,4%	-13,6%	-10,3%	-10,1%		6,3%	-1,5%	-1,4%	-5,3%	-5,6%
Zona 2																		
Δ	-291,65	-329,6	-323,91	-323,91	-323,91	-341,97	-6,42	-1,1	-6,44	-6,09	-5,92	-4,88	2,65	0	4,28	3,93	3,76	2,6
	-13,0%	-11,1%	-11,1%	-11,1%	-11,1%	-17,3%		82,9%	-0,3%	5,1%	7,8%	24,0%		-100,0%	61,5%	48,3%	41,9%	-1,9%
Zona 3																		
Δ	-384,31	-382,85	-377,17	-377,17	-377,17	-390,67	-9,86	-5,43	-7,68	-7,53	-13,35	-13,62	6,77	2,88	5,16	5,02	10,84	11,02
	0,4%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	-1,7%		44,9%	22,1%	23,6%	-35,4%	-38,1%		-57,5%	-23,8%	-25,8%	60,1%	62,8%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,545	σ _{med} (MPa)	0,785
σ _M (MPa)	-8,315	σ _M (MPa)	-12,805
M (kNm)	207,88	M (kNm)	2098,47

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2497,19	2329,93	2331,86	2250,95
Zona 2	0	-133,93	-125,32	-121,01
Zona 3	103,84	160,52	156,86	302,36

A19

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V1+

ULS_SOB2+V1+- Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-48,54	0	-35,47	-34,73	-48,39	-50,43	-12,13	-12,94	-12,3	-12,3	-12,12	-12,12	11,94	12,94	12,15	12,15	11,92	11,91
	100,0%	100,0%	26,9%	28,5%	0,3%	-3,9%		-6,7%	-1,4%	-1,4%	0,1%	0,1%		8,4%	1,8%	1,8%	-0,2%	-0,3%
Zona 2																		
Δ %	-272,23	-304,83	-300,79	-300,77	-300,77	-318,83	-6,1	-1,06	-6,01	-5,79	-5,7	-5,25	2,6	0	4	3,78	3,69	3,12
	-12,0%	-12,0%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-17,1%		82,6%	1,5%	5,1%	6,6%	13,9%		-100,0%	53,8%	45,4%	41,9%	20,0%
Zona 3																		
Δ %	-362,57	-358,09	-354,05	-354,02	-354,02	-367,53	-4,18	-4,04	-1,53	-1,47	-3,86	-4	1,27	1,66	0	0	1,5	1,55
	1,2%	1,2%	2,3%	2,4%	2,4%	-1,4%		3,3%	63,4%	64,8%	7,7%	4,3%		30,7%	-100,0%	-100,0%	18,1%	22,0%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σmed (MPa)	-1,455	σmed (MPa)	-0,095
σM(MPa)	-2,725	σM(MPa)	-12,035
M (kNm)	68,13	M (kNm)	2106,54

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2270,37	2144,43	2144,44	2109,11	2107,63
Zona 2	-1,09	-125,19	-119,6	-117,41	-104,61
Zona 3	-71,23	-8,81	-7,15	66,91	69,46

ULS_SOB2+V1+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-44,03	0	-26,62	-26,07	-46,28	-48,49	-8,62	-21,1%	-10,44	-9,94	-9,79	-9,79	9,75	10,44	9,81	9,82	9,57	9,56
		100,0%	39,5%	40,8%	-5,1%	-10,1%			-21,1%	-15,3%	-13,6%	-13,6%		7,1%	0,6%	0,7%	-1,8%	-1,9%
Zona 2																		
Δ %	-206,3	-228,96	-227,9	-227,9	-227,9	-245,95	-4,56	-81	-4,53	-4,36	-4,23	-3,81	1,9	0	3,01	2,84	2,71	2,17
		-11,0%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-19,2%		82,2%	0,7%	4,4%	7,2%	16,4%		-100,0%	58,4%	49,5%	42,6%	14,2%
Zona 3																		
Δ %	-286,21	-282,21	-281,15	-281,15	-281,15	-294,65	-3,97	-3,79	-1,91	-1,86	-4,39	-4,59	1,67	1,91	0,04	0,01	2,52	2,62
		1,4%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%		4,5%	51,9%	53,1%	-10,6%	-15,6%		14,4%	-97,6%	-99,4%	50,9%	56,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,15	σ _{med} (MPa)	0,565
σ _M (MPa)	-2,82	σ _M (MPa)	-9,185
M (kNm)	70,50	M (kNm)	1505,23

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1799,04	1702,43	1702,43	1668,64	1667,03
Zona 2	-1,09	-94,21	-90,02	-86,78	-74,7
Zona 3	-71,28	-24,39	-23,09	-86,43	90,07

ULS_SOB2+V1+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-44,03	-14,06	-39,48	-37,82	-56,95	-59,48	-8,62	-10,42	-9,8	-9,8	-9,52	-9,5	9,75	10,35	9,61	9,62	9,24	9,21
		68,1%	10,3%	14,1%	-29,3%	-35,1%		-20,9%	-13,7%	-13,7%	-10,4%	-10,2%		6,2%	-1,4%	-1,3%	-5,2%	-5,5%
Zona 2																		
Δ %	-206,3	-229,3	-228,25	-228,25	-228,25	-246,3	-4,56	-0,81	-4,54	-4,29	-4,17	-3,57	1,9	0	3,01	2,77	2,65	1,93
		-11,1%	-10,6%	-10,6%	-10,6%	-19,4%		82,2%	0,4%	5,9%	8,6%	21,7%		-100,0%	58,4%	45,8%	39,5%	1,6%
Zona 3																		
Δ %	-286,21	-282,55	-281,5	-281,5	-281,5	-295	-3,97	-1,06	-2,68	-2,57	-6,72	-6,96	1,67	0	0,8	0,69	4,85	4,99
		1,3%	1,6%	1,6%	1,6%	-3,1%		73,3%	32,5%	35,3%	-69,3%	-75,3%		-100,0%	-52,1%	-58,7%	190,4%	198,8%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,15	σ _{med} (MPa)	0,565
σ _M (MPa)	-2,82	σ _M (MPa)	-9,185
M (kNm)	70,50	M (kNm)	1505,23

Momento Fletor (kNm)				
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 5
Zona 1	1790,25	1672,53	1673,9	1616,45
Zona 2	-1,09	-94,35	-88,27	-85,2
Zona 3	2,87	43,43	40,79	144,63

A20

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V2+

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ_m (MPa)	-1,545	σ_{md} (MPa)	-0,115
σ (MPa)	-4,025	σM (MPa)	-13,835
M (kNm)	100,63	M (kNm)	2421,60

Momento Fletor (kNm)					
	Typo 1	Typo 2	Typo 3	Typo 4	Typo 5
Zona 1	2621,21	2474,19	2474,16	2433,45	2432,92
Zona 2	-1,09	-134,55	-128,11	-125,59	-109,87
Zona 3	-71,29	10,37	12,28	97,52	100,07

ULS_SOB2+V2+ - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ	-52,75	0	-32,03	-31,38	-55,51	-57,87	-10,25	-12,41	-11,82	-11,82	-11,64	-11,64	11,59	12,41	11,66	11,66	11,37	11,36
	100,0%	100,0%	39,3%	40,5%	-5,2%	-9,7%	-9,7%	-21,1%	-15,3%	-15,3%	-13,6%	-13,6%	-13,6%	7,1%	0,6%	0,6%	-1,9%	-2,0%
Zona 2																		
Δ	-226,1	-251,64	-249,91	-249,91	-249,91	-267,97	-4,92	-0,88	-4,98	-4,77	-4,62	-4,05	2,01	0	3,31	3,11	2,95	2,26
	-11,3%	-11,3%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-18,5%	82,1%	-0,88	-1,2%	3,0%	6,1%	17,7%	-100,0%	-100,0%	64,7%	54,7%	46,8%	12,4%
Zona 3																		
Δ	-308,49	-304,89	-303,16	-303,16	-303,16	-316,67	-5,65	-3,87	-1,22	-1,16	-6,1	-6,29	3,17	1,83	0	0	4,07	4,18
	1,2%	1,2%	1,7%	1,7%	1,7%	-2,7%	-5,6%	31,5%	78,4%	79,5%	-8,0%	-11,3%	-42,3%	-42,3%	-100,0%	-100,0%	28,4%	31,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,24	σ _{med} (MPa)	0,67
σ _M (MPa)	-4,41	σ _M (MPa)	-10,92
M (kNm)	110,25	M (kNm)	1789,56

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2150,79	2023,31	1982,79	1971,07
Zona 2	-1,09	-103,56	-98,53	-94,55
Zona 3	-71,28	-5,27	-3,7	127,11

ULS_SOB2+V2+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-52,75	-15,49	-46,11	-44,13	-66,98	-69,72	-10,25	-12,39	-11,64	-11,65	-11,3	-11,29	11,59	12,31	11,42	11,44	10,98	10,95
		70,6%	12,6%	16,3%	-27,0%	-32,2%		-20,9%	-13,6%	-13,7%	-10,2%	-10,1%		6,2%	-1,5%	-1,3%	-5,3%	-5,5%
Zona 2																		
Δ %	-226,1	-252,02	-250,3	-250,3	-250,3	-268,35	-4,92	-0,88	-4,98	-4,69	-4,54	-3,77	2,01	0	3,31	3,02	2,88	1,98
		-11,57%	-10,7%	-10,7%	-10,7%	-18,7%		82,1%	-1,2%	4,7%	7,7%	23,4%		-100,0%	64,7%	50,2%	43,3%	-1,5%
Zona 3																		
Δ %	-308,49	-305,27	-303,55	-303,55	-303,55	-317,05	-5,65	-1,71	-4,04	-3,91	-8,87	9,12	3,17	0	2,01	1,89	6,85	7,01
		1,0%	1,6%	1,6%	1,6%	-2,8%		69,7%	28,5%	30,8%	-57,0%	261,4%		-100,0%	-36,6%	-40,4%	116,1%	121,1%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,24	σ _{med} (MPa)	0,67
σ _M (MPa)	-4,41	σ _M (MPa)	-10,92
M (kNm)	110,25	M (kNm)	1789,56

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2128,75	1987,41	1989,05	1920,28
Zona 2	-1,09	-103,73	-96,43	-92,76
Zona 3	17,23	75,63	72,49	196,52

A21

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V1-

ULS_SOB2+V1 - - Pórticos com Vigas de Secção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-68,15	-11,02	-53,45	-52,03	-68,3	-70,63	-14,49	-15,51	-14,73	-14,73	-14,48	-14,47	14,22	8,7%	2,0%	2,1%	2,0%	-0,3%
Zona 2																		
Δ %	-324,01	-364,23	-358,51	-358,49	-358,49	-376,54	-7,12	-1,3	-7,23	-6,89	-6,79	-6,09	2,98	0	4,84	4,5	4,4	3,58
Zona 3																		
Δ %	-421,31	-417,49	-411,76	-411,74	-411,74	-425,25	-4,81	-4,78	-1,78	-1,74	-4,53	-4,7	1,43	1,99	0	0	1,79	1,86
Δ %		0,9%	2,3%	2,3%	2,3%	-0,9%		0,6%	63,0%	63,8%	5,8%	2,3%		39,2%	-100,0%	-100,0%	25,2%	30,1%

Pilar - zona 3	
b (m)	0.6
h (m)	0.5
y (m)	-0.25
l (m4)	0.00625
A (m2)	0.3
σ_{med} (MPa)	-1.69
σ (MPa)	-3.12
M (kNm)	78

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,45
y (m)	-0,725
I (m ⁴)	0,1269
A (m ²)	0,4873
σ (MPa)	-0,135
σ (MPa)	-14,355
M (kNm)	2512,62

Momento Fletor (kNm)					
	Tiplo 1	Tiplo 2	Tiplo 3	Tiplo 4	Tiplo 5
Zona 1	2715,87	2565,03	2565,05	2515,19	2513,49
Zona 2	-0,49	-150,8	-142,44	-139,83	-120,84
Zona 3	-84,6	-10,08	-9,18	78,99	81,95

ULS_SOB2+V1 - - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-65,44	0	-44,56	-43,35	-68,44	-71,03	-10,74	-13,05	-12,43	-12,42	-12,19	-12,19	12,09	7,5%	1,0%	1,0%	-1,9%	-2,0%
	100,0%	100,0%	31,9%	33,8%	-4,6%	-8,5%		-21,5%	-15,7%	-15,6%	-13,5%	-13,5%						
Zona 2																		
Δ %	-258,2	-288,36	-285,61	-285,61	-285,61	-303,67	-5,58	-1,04	-5,74	-5,47	-5,31	-4,6	2,27	0	3,84	3,56	3,4	2,57
	-11,7%	-10,6%	-10,6%	-10,6%	-10,6%	-17,6%		81,4%	-2,9%	2,0%	4,8%	17,6%		-100,0%	69,2%	56,8%	49,8%	13,2%
Zona 3																		
Δ %	-345,06	-341,61	-338,87	-338,87	-338,87	-352,37	-4,95	-4,53	-2,16	-2,14	-5,56	-5,78	2,19	2,25	0,1	0	3,3	3,43
	1,0%	1,0%	1,8%	1,8%	1,8%	-2,1%		8,5%	56,4%	56,8%	-12,3%	-16,8%		2,7%	-95,4%	-100,0%	50,7%	56,6%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	-1,38	σmed (MPa)	0,675
σM (MPa)	-3,57	σM (MPa)	-11,415
M (kNm)	89,25	M (kNm)	1870,68

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2244,54	2123,04	2123,04	2073,08	2071,19
Zona 2	-2,17	-119,82	-112,86	-108,84	-89,65
Zona 3	-84,77	-25,83	-25,27	110,75	115,06

ULS SOB2+V1 -- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-28,51	-60,75	-57,97	-81,58	-84,56		-12,98	-12,2	-12,2	-11,8	-11,78		12,84	11,9	11,92	11,4	11,37
Δ %	-65,44	56,4%	7,2%	11,4%	-24,7%	-29,2%		-20,9%	-13,6%	-13,6%	-9,9%	-9,7%		6,2%	-1,6%	-1,4%	-5,7%	-6,0%
Zona 2		-288,79	-286,05	-286,05	-386,05	-304,11		-1,05	-5,75	-5,38	-5,23	-4,31		0	3,85	3,47	3,32	2,28
Δ %	-258,2	-11,8%	-10,8%	-10,8%	-49,5%	-17,8%		81,2%	-3,0%	3,6%	6,3%	22,8%		-100,0%	69,6%	52,9%	46,3%	0,4%
Zona 3		-342,04	-339,31	-339,31	-339,31	-352,81		-1,45	-3,48	-3,3	-8,43	-8,7		0	1,22	1,04	6,17	6,35
Δ %	-345,06	0,9%	1,7%	1,7%	1,7%	-2,2%		70,7%	29,7%	33,3%	-70,3%	-75,8%		-100,0%	-44,3%	-52,5%	181,7%	190,0%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σmed (MPa)	-1,38	σmed (MPa)	0,675
σM (MPa)	-3,57	σM (MPa)	-11,415
M (kNm)	89,25	M (kNm)	1870,68

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2224,55	2076,39	2078,54	1999,38	1995,29
Zona 2	-2,17	-120,01	-110,69	-106,89	-82,33
Zona 3	7,7	58,68	54,34	182,49	188,11

A22

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB2+V2-

ULS SOB2+V2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-74,16	-10,99	-49,98	-48,65	-77,68	-80,41	-12,37	-15,03	-14,3	-14,3	-14,04	-14,04	13,93	14,97	14,06	14,06	13,66	13,65
		85,2%	32,6%	34,4%	-4,7%	-8,4%		-21,5%	-15,6%	-15,6%	-13,5%	-13,5%		7,5%	0,9%	0,9%	-1,9%	-2,0%
Zona 2																		
Δ %	-278	-311,04	-307,67	-307,67	-307,63	-325,69	-5,93	0	-6,19	-5,88	-5,69	-4,84	2,38	2,17	4,14	3,83	3,64	2,67
		-11,9%	-10,7%	-10,7%	-10,7%	-17,2%		100,0%	-4,4%	0,8%	4,0%	18,4%		-8,8%	73,9%	60,9%	52,9%	12,2%
Zona 3																		
Δ %	-367,35	-369,29	-360,88	-360,88	-360,88	-374,39	-6,63	-4,6	-1,47	-1,44	-7,26	-7,49	3,69	2,18	0	0	4,85	4,99
		-0,5%	1,8%	1,8%	1,8%	-1,9%		30,6%	77,8%	78,3%	-9,5%	-13,0%		-40,9%	-100,0%	-100,0%	31,4%	35,2%

Pilar - zona 3					Viga - zona 1				
b (m)	0,6				b (m)	0,6			
h (m)	0,5				h (m)	1,65			
y (m)	-0,25				y (m)	-0,825			
I (m4)	0,00625				I (m4)	0,1352			
A (m2)	0,3				A (m2)	0,4136			
σ _{med} (MPa)	-1,47				σ _{med} (MPa)	0,78			
σ _M (MPa)	-5,16				σ _M (MPa)	-13,15			
M (kNm)	129,00				M (kNm)	2155,01			

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2593,88	2443,93	2443,93	2387,22	2385,23
Zona 2	-2,17	-129,18	-121,37	-116,71	-93,85
Zona 3	-84,77	-6,72	-5,89	151,43	155,95

ULS SOB2+V2- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-29,94	-67,2	-64,28	-91,61	-94,74	-12,37	-14,94	-14,04	-14,05	-13,59	-13,57	13,93	14,8	13,71	13,73	13,14	13,11
Δ %		59,6%	9,4%	13,3%	-23,5%	-27,8%		-20,8%	-13,5%	-13,6%	-9,9%	-9,7%		6,2%	-1,6%	-1,4%	-5,7%	-5,9%
Zona 2		-311,51	-308,11	-308,11	-308,11	-326,16	-5,93	-1,13	-6,2	-5,78	-5,61	-4,5	2,38	0	4,15	3,73	3,55	2,33
Δ %		-12,1%	-10,8%	-10,8%	-10,8%	-17,3%		80,9%	-4,6%	2,5%	5,4%	24,1%		-100,0%	74,4%	56,7%	49,2%	-2,1%
Zona 3		-364,76	-361,36	-361,36	-361,36	-374,86	-6,63	-2,1	-4,84	-4,65	-10,58	-10,87	3,69	0	2,43	2,24	8,17	8,37
Δ %		0,7%	1,6%	1,6%	1,6%	-2,0%		68,3%	27,0%	29,9%	-59,6%	-64,0%		-100,0%	-34,1%	-39,3%	121,4%	126,8%

Pilar - zona 3					Viga - zona 1				
b (m)	0,6				b (m)	0,6			
h (m)	0,5				h (m)	1,65			
y (m)	-0,25				y (m)	-0,825			
I (m4)	0,00625				I (m4)	0,1352			
A (m2)	0,3				A (m2)	0,4136			
σ _{med} (MPa)	-1,47				σ _{med} (MPa)	0,78			
σ _M (MPa)	-5,16				σ _M (MPa)	-13,15			
M (kNm)	129,00				M (kNm)	2155,01			

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2563	2391,27	2393,68	2303,2	2298,24
Zona 2	-2,17	-129,38	-118,84	-114,45	-85,37
Zona 3	22,06	90,87	86,04	234,37	240,44

A23

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3

ULS SOB3 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1																		
Δ %	-58,15	0	-38,86	-38,05	-52,94	-55,02	-13,22	-14,11	-13,4	-13,4	-13,21	-13,2	13,00	14,11	13,24	13,24	12,98	
		100,0%	33,2%	34,6%	9,0%	5,4%		-6,7%	-1,4%	-1,4%	0,1%	0,2%		8,5%	1,8%	1,8%	-0,1%	
Zona 2																		
Δ %	-299,57	-337,44	-330,68	-330,68	-330,68	-348,73	-6,64	-1,12	-6,57	-6,33	-6,23	-5,64	2,79	0	4,37	4,13	4,03	
		-12,6%	-10,4%	-10,4%	-10,4%	-16,4%		83,1%	1,1%	4,7%	6,2%	15,1%		-100,0%	56,6%	48,0%	44,4%	
Zona 3																		
Δ %	-393,67	-390,7	-383,93	-383,93	-383,93	-397,43	-7,93	-1,3	-3,98	-4,06	-7,28	-7,43	4,77	0	1,42	1,5	4,72	
		0,8%	2,5%	2,5%	2,5%	-1,0%		83,6%	49,8%	48,8%	8,2%	6,3%		-100,0%	-70,2%	-68,6%	-1,0%	
																	0,2%	

Pilar - zona 3		Pilar - zona 2	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
x (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1269
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4873
σ_{med} (MPa)	-1,88	σ_{med} (MPa)	-0,11
σ_{M} (MPa)	-6,35	σ_{M} (MPa)	-13,11
M (kNm)	158,75	M (kNm)	2294,70

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,45
y (m)	-0,725
I (m ⁴)	0,1269
A (m ²)	0,4873
σ_{med} (MPa)	-0,11
σ_{M} (MPa)	-13,11
M (kNm)	2294,70

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2474,59	2336,33	2336,35	2297,71	2296,19
Zona 2	0	-136,8	-130,7	-128,31	-111,99
Zona 3	0	67,6	69,42	150,11	152,65

VENTIO14+ - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	20,22	0	12,54	12,29	21,3	21,6	-3,39	-4,58	-4,29	-4,29	-4,18	-4,18
Δ %	-100,0%	-38,0%	-39,2%	5,2%	6,8%	6,8%	-35,1%	-35,1%	-26,5%	-26,5%	-23,3%	-23,3%
Zona 2	94,86	111,28	106,13	106,13	106,13	106,13	-0,82	0	-1,4	-1,32	-1,27	-0,85
Δ %	17,3%	11,9%	11,9%	11,9%	11,9%	11,9%	100,0%	100,0%	-70,7%	-61,0%	-54,9%	-3,7%
Zona 3	109	111,28	106,13	106,13	106,13	106,13	-5,67	-2,8	-3,65	-3,67	-5,63	-5,65
Δ %	2,1%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	50,6%	50,6%	35,6%	35,3%	0,7%	0,4%

Pilar - zona 3		Pilar - zona 2		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,28	σ _{med} (MPa)	-0,42	σ _{med} (MPa)	-9,06
σ _M (MPa)	-6,61	σ _M (MPa)	-9,06	σ _M (MPa)	-9,06
M (kNm)	165,25	M (kNm)	-89,75	M (kNm)	1484,74

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	2003,28	1894,35	1894,35	1856,45	1854,77
Zona 2	0	-105,84	-101,12	-97,51	-81,43
Zona 3	0	51,98	53,45	175,58	179,34

ULS_SOB3 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-49,41	-15,69	-44,34	-42,48	-63,81	-66,46	-9,48	-11,61	-10,9	-10,91	-10,59	-10,57
Δ %	68,2%	10,3%	14,0%	-29,1%	-34,5%	-34,5%	-22,5%	-22,5%	-15,0%	-15,1%	-11,7%	-11,5%
Zona 2	-233,7	-262	-258,22	-258,22	-258,22	-258,22	-5,09	-0,87	-5,1	-4,83	-4,69	-3,91
Δ %	-12,1%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	-10,5%	82,9%	82,9%	-0,2%	5,1%	7,9%	23,2%
Zona 3	-317,37	-315,25	-311,47	-311,47	-311,47	-311,47	-7,89	-4,36	-6,14	-6,02	-10,65	-10,9
Δ %	0,7%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	44,7%	44,7%	22,2%	23,7%	-35,0%	-38,1%

Tensões (MPa) - Tração

Pilar - zona 3		Pilar - zona 2		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-1,28	σ _{med} (MPa)	-0,42	σ _{med} (MPa)	-9,06
σ _M (MPa)	-6,61	σ _M (MPa)	-9,06	σ _M (MPa)	-9,06
M (kNm)	165,25	M (kNm)	-89,75	M (kNm)	1484,74

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	1993,46	1860,75	1862,28	1798	1794,23
Zona 2	0	-106,01	-99,18	-95,75	-74,85
Zona 3	82,7	127,55	124,63	240,41	245,37

A24

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V1+

ULS SOB3+V1+ - Pórticos com Vigas de Secção Constante																
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão									
MEF		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Tensões (MPa) - Tração		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	Δ %	-41,42	0	-27,55	-26,98	-37,59	-39,51	-9,43	-10,06	-9,56	-9,42	-9,42	9,28	10,06	9,44	9,27
Zona 2	Δ %	-214,43	-237,33	-235,21	-235,18	-235,18	-253,24	-4,78	-0,83	-4,68	-4,5	-4,43	2,03	0	3,11	2,87
Zona 3	Δ %	-295,76	-290,59	-288,46	-288,44	-288,44	-301,94	-2,62	-3,82	-1,86	-2,41	-2,56	0,25	1,88	0	0,49
		1,7%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	-2,1%	-45,8%	29,0%	30,9%	8,0%	2,3%	652,0%	-100,0%	-100,0%	96,0%

Pilar - zona 3							Viga - zona 1						
b (m)	0,6						b (m)	0,6					
h (m)	0,5						h (m)	1,45					
y (m)	-0,25						y (m)	-0,725					
I (m4)	0,00625						I (m4)	0,1269					
A (m2)	0,3						A (m2)	0,4873					
σmed (MPa)	-1,185						σmed (MPa)	-0,075					
σM(MPa)	-1,435						σM(MPa)	-9,355					
M (kNm)	35,88						M (kNm)	1637,45					

Momento Fletor (kNm)						
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5		
Zona 1	1764,13	1666,47	1666,47	1639,03	1637,63	
Zona 2	-1,09	-97,31	-92,97	-91,27	-82,73	
Zona 3	-71,24	-22,59	-21,29	36,25	38,82	

ULS SOB3+V1+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-31,21	0	-18,72	-18,33	-32,75	-34,76	-6,2	-7,5	-7,15	-7,15	-7,05	-7,04	7,01	7,5	7,06	7,06	6,89	6,87
	100,0%		40,0%	41,3%	-4,9%	-11,4%		-21,0%	-15,3%	-15,3%	-13,7%	-13,5%		7,0%	0,7%	0,7%	-1,7%	-2,0%
Zona 2																		
Δ %	-148,35	-161,46	-162,31	-162,31	-162,31	-180,37	-3,24	-0,58	-3,19	-3,08	-2,98	-2,78	1,35	0	2,11	1,99	1,9	1,57
		-8,8%	-9,4%	-9,4%	-9,4%	-21,6%		82,1%	1,5%	4,9%	8,0%	14,2%		-100,0%	56,3%	47,4%	40,7%	16,3%
Zona 3																		
Δ %	-219,27	-214,71	-215,56	-215,56	-215,56	-229,07	-1,99	-3,57	-2,24	-2,21	-2,36	-2,54	0,23	2,14	0,8	0,77	0,92	1,01
		2,1%	1,7%	1,7%	1,7%	-4,5%		-79,4%	-12,6%	-11,1%	-18,6%	-27,6%		830,4%	247,8%	234,8%	300,0%	339,1%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,88	σ _{med} (MPa)	0,405
σ _M (MPa)	-1,11	σ _M (MPa)	-6,605
M (kNm)	27,75	M (kNm)	1082,42

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	1292,79	1224,46	1224,46	1200,55	1199,09
Zona 2	-1,09	-66,33	-63,39	61,07	54,37
Zona 3	-71,28	-38,08	-37,16	40,99	44,33

ULS_SOB3+V1+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)									Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-31,21	-10,05	-27,92	-26,74	-40,4	-42,62	-6,2	-7,49	-7,05	-7,05	-6,85	-6,83	7,01	7,44	6,92	6,92	6,65	6,63
		67,8%	10,5%	14,3%	-29,4%	-36,6%		-20,8%	-13,7%	-13,7%	-10,5%	-10,2%		6,1%	-1,3%	-1,3%	-5,1%	-5,4%
Zona 2																		
Δ %	-148,35	-161,7	-162,55	-162,55	-162,55	-180,61	-3,24	-0,58	-3,2	-3,03	-2,94	-2,61	1,35	0	2,12	1,94	1,86	1,4
		-9,0%	-9,6%	-9,6%	-9,6%	-21,7%		82,1%	1,2%	6,5%	9,3%	19,4%		-100,0%	57,0%	43,7%	37,8%	3,7%
Zona 3																		
Δ %	-219,27	-214,95	-215,81	-215,81	-215,81	-229,31	-1,99	-1,45	-1,14	-1,06	-4,03	-4,23	0,23	0	0	0	2,59	2,7
		2,0%	1,6%	1,6%	1,6%	-4,6%		27,1%	42,7%	46,7%	-102,5%	-112,6%		-100,0%	-100,0%	-100,0%	1026,1%	1073,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,88	σ _{med} (MPa)	0,405
σ _M (MPa)	-1,11	σ _M (MPa)	-6,605
M (kNm)	27,75	M (kNm)	1082,42

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	1286,52	1203,35	1204,32	1163,5	1160,28
Zona 2	-1,09	-66,44	-62,14	-59,94	-50,12
Zona 3	-18,27	10,46	8,55	82,68	86,73

A25

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V2+

ULS SOB3+V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-49,95	0	-32,98	-32,29	-44,97	-46,96	-11,24	-12,07	-11,47	-11,46	-11,3	-11,3	11,06	12,07	11,33	11,37	11,12	11,11
	100,0%	100,0%	34,0%	35,4%	10,0%	6,0%		-7,4%	-2,0%	-2,0%	-0,5%	-0,5%		9,1%	2,4%	2,8%	0,5%	0,5%
Zona 2																		
Δ %	-234,14	-260,03	-257,23	-257,2	-257,2	-275,26	-5,14	-0,91	-5,12	-4,92	-4,84	-4,44	2,15	0	3,41	3,2	3,12	2,6
	-11,1%	-9,9%	-9,8%	-9,8%	-9,8%	-17,6%		82,3%	0,4%	4,3%	5,8%	13,6%		-100,0%	58,6%	48,8%	45,1%	20,9%
Zona 3																		
Δ %	-318,01	-313,28	-310,48	-310,46	-310,46	-323,96	-4,01	-3,89	-1,17	1,11	-3,71	-3,86	1,46	1,81	0	0	1,64	1,7
	1,5%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	-1,9%		3,0%	70,8%	127,7%	7,5%	3,7%		24,0%	-100,0%	-100,0%	12,3%	16,4%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ_{med} (MPa)	-1,275	σ_{med} (MPa)	-0,09
σM (MPa)	-2,735	σM (MPa)	-11,15
M (kNm)	68,38	M (kNm)	1951,63

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2117,27	1999,27	1999,21	1966,38	1965,08
Zona 2	-1,09	-106,67	-101,48	-99,44	-87,99
Zona 3	-71,23	-3,41	-1,86	66,87	69,43

ULS SOB3+V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-39,93	0	-24,13	-23,64	-41,99	-44,13	-7,83	-9,48	-9,03	-9,02	-8,89	-8,89	8,85	9,48	8,91	8,91	8,69	8,67
	100,0%		39,6%	40,8%	-5,2%	-10,5%		-21,1%	-15,3%	-15,2%	-13,5%	-13,5%		7,1%	0,7%	0,7%	-1,8%	-2,0%
Zona 2																		
Δ %	-168,15	-184,14	-184,32	-184,32	-184,32	-202,38	-3,59	-0,66	-3,64	-3,49	-3,37	-3,02	1,45	0	2,41	2,26	2,14	1,67
	-9,5%	-9,6%	-9,6%	-9,6%	-9,6%	-20,4%		81,6%	-1,4%	2,8%	6,1%	15,9%		-100,0%	66,2%	55,9%	47,6%	15,2%
Zona 3																		
Δ %	-241,55	-237,39	-237,58	-237,58	-237,58	-251,08	-3,67	-3,64	-1,55	-1,5	-4,06	-4,25	1,74	2,06	0	0	2,48	2,57
	1,7%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	-3,9%		0,8%	57,8%	59,1%	-10,6%	-15,8%		18,4%	-100,0%	-100,0%	42,5%	47,7%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,965	σ _{med} (MPa)	0,51
σ _M (MPa)	-2,705	σ _M (MPa)	-8,34
M (kNm)	67,63	M (kNm)	1366,7

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	1633,06	1545,35	1545,35	1514,7	1513,13
Zona 2	-1,09	-75,69	-71,9	-68,95	-58,58
Zona 3	-71,28	-18,96	-17,78	81,68	85,22

ULS_SOB3+V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)									Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-39,93	-11,48	-34,56	-33,05	-50,42	-52,85	-7,83	-9,46	-8,89	-8,9	-8,64	-8,62	8,85	9,4	8,73	8,74	8,39	8,36
		71,2%	13,4%	17,2%	-26,3%	-32,4%		-20,8%	-13,5%	-13,7%	-10,3%	-10,1%		6,2%	-1,4%	-1,2%	-5,2%	-5,5%
Zona 2																		
Δ %	-168,15	-184,41	184,6	184,6	184,6	202,66	-3,59	-1,14	-3,65	-3,43	-3,32	-2,8	1,45	0	2,42	2,2	2,08	1,45
		-9,7%	209,8%	209,8%	209,8%	220,5%		68,2%	-1,7%	4,5%	7,5%	22,0%		-100,0%	66,9%	51,7%	43,4%	0,0%
Zona 3																		
Δ %	-241,55	-237,67	-237,86	-237,86	-237,86	-251,36	-3,67	-0,95	-2,5	-2,4	-6,18	-6,4	1,74	0	0,91	0,82	4,59	4,72
	1,6%	1,6%	1,5%	1,5%	1,5%	-4,1%		74,1%	31,9%	34,6%	-68,4%	-74,4%		-100,0%	-47,7%	-52,9%	163,8%	171,3%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,965	σ _{med} (MPa)	0,51
σ _M (MPa)	-2,705	σ _M (MPa)	-8,34
M (kNm)	67,63	M (kNm)	1366,75

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	1625,02	1518,23	1519,47	1467,33	1463,54
Zona 2	-1,09	-75,81	-70,29	-67,5	-53,16
Zona 3	-3,91	42,66	40,26	134,57	139,06

A26

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V1-

ULS SOB3+V1 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ	-61,92	-11,13	-45,53	-44,28	-57,5	-59,71	-11,79	-12,62	-11,99	-11,99	-11,78	-11,77	11,51	12,57	11,81	11,81	11,54	11,53
%	82,0%	26,5%	28,5%	7,1%	7,1%	3,6%	-7,0%	-7,0%	-1,7%	-1,7%	0,1%	0,2%		9,2%	2,6%	2,6%	0,3%	0,2%
Zona 2																		
Δ	-266,2	-296,73	-292,92	-292,9	-292,9	-310,96	-5,8	-1,07	-5,89	-5,61	-5,52	-5	2,41	0	3,94	3,66	3,57	2,92
%	-11,5%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-16,8%	81,6%	-1,6%	-1,6%	3,3%	4,8%	13,8%		-100,0%	63,5%	51,9%	48,1%	21,2%
Zona 3																		
Δ	-354,5	-349,99	-346,18	-346,15	-346,15	-359,66	-3,25	-4,55	-2,11	-2,08	-3,09	-3,25	0,41	2,22	0	0	0,78	0,85
%	1,3%	2,3%	2,4%	2,4%	2,4%	-1,5%	-40,0%	-40,0%	35,1%	36,0%	4,9%	0,0%		441,5%	-100,0%	-100,0%	90,2%	107,3%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	-1,42	σ _{med} (MPa)	-0,14
σ _M (MPa)	-1,83	σ _M (MPa)	-11,65
M (kNm)	45,75	M (kNm)	2039,15

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2209,62	2087,07	2087,08	2045,11
Zona 2	-0,5	-122,93	-115,81	-113,69
Zona 3	-84,61	-23,61	-22,67	48,33

ULS_SOB3+V1- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração								
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-52,62	-10,99	-36,66	-35,61	-54,92	-57,29	-8,32	-10,11	-9,63	-9,45	-9,44	-9,44	9,35	7,6%	9,46	9,46	9,1	9,16
		79,1%	30,3%	32,3%	-4,4%	-8,9%		-21,5%	-15,7%	-13,6%	-13,5%				1,2%	1,2%	-2,7%	-2,0%
Zona 2																		
Δ %	-200,25	-220,86	-220,03	-220,03	-220,03	-238,08	-4,26	-0,82	-4,41	-4,18	-4,06	-3,57	1,71	0	2,94	2,72	2,59	1,98
		-10,3%	-9,9%	-9,9%	-9,9%	-18,9%		80,8%	-3,5%	1,9%	4,7%	16,2%		-100,0%	71,9%	59,1%	51,5%	15,8%
Zona 3																		
Δ %	-278,12	-274,11	-273,28	-273,28	-273,28	-286,78	-2,97	-4,3	-2,49	-2,48	-3,52	-3,73	0,75	2,48	0,67	0,67	1,7	1,82
		1,4%	1,7%	1,7%	1,7%	-3,1%		-44,8%	16,2%	16,5%	-18,5%	-25,6%		230,7%	-10,7%	-10,7%	126,7%	142,7%

Pilar - zona 3			Viga - zona 1		
b (m)	0.6		b (m)	0.6	
h (m)	0.5		h (m)	1.65	
y (m)	-0.25		y (m)	-0.825	
I (m4)	0.00625		I (m4)	0.1352	
A (m2)	0.3		A (m2)	0.4136	
σ_{med} (MPa)	-1.11		σ_{med} (MPa)	0.515	
σ_{M} (MPa)	-1.86		σ_{M} (MPa)	-8.835	
M (kNm)	46.50		M (kNm)	1447.87	

ULS_SOB3+V1 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-52,62	-24,5	-49,01	-46,89	-65,02	-67,69	-8,32	-10,04	-9,44	-9,45	-9,13	-9,11	9,35	9,93	9,21	9,22	8,82	8,79
Δ %		53,4%	6,9%	10,9%	-23,6%	-28,6%		-20,7%	-13,5%	-13,6%	-9,7%	-9,5%		6,2%	-1,5%	-1,4%	-5,7%	-6,0%
Zona 2	-200,25	-221,18	-220,36	-220,36	-220,36	-238,42	-4,26	-0,82	-4,42	-4,12	-4	-3,34	1,71	0	2,95	2,65	2,53	1,75
Δ %		-10,5%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-19,1%		80,8%	-3,8%	3,3%	6,1%	21,6%		-100,0%	72,5%	55,0%	48,0%	2,3%
Zona 3	-278,12	-274,44	-273,61	-273,61	-273,61	-287,12	-2,97	-1,45	-1,94	-1,8	-5,73	-5,98	0,75	0	0,12	0	3,91	4,06
Δ %		1,3%	1,6%	1,6%	1,6%	-3,2%		51,2%	34,7%	39,4%	-92,9%	-101,3%		-100,0%	-84,0%	-100,0%	421,3%	441,3%

Pilar - zona 3				Viga - zona 1			
b (m)	0,6	b (m)	0,6				
h (m)	0,5	h (m)	1,65				
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825				
l (m4)	0,00625	l (m4)	0,1352				
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136				
σ_{med} (MPa)	-1,11	σ_{med} (MPa)	0,515				
σ (MPa)	-1,86	σ (MPa)	-8,835				
M (kNm)	46,50	M (kNm)	1447,87				

Momento Flector (kNm)						
Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4
Tipo 5						
Zona 1	1720,83	1607,21	1608,96	1546,43	1534,52	
Zona 2	-2,17	-92,09	-84,55	-81,64	-63,69	
Zona 3	-13,44	25,71	22,1	120,54	125,51	

A27

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_SOB3+V2-

Uls_SOB3+V2 - Pórticos com Vigas de Secção Constante																
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Tração									
							Tensões (MPa) - Compressão									
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Zona 1																
Δ %	-69,94	-11,02	-50,96	-49,59	-64,87	-67,17	-13,6	-14,62	-13,89	-13,89	-13,65	-13,64	13,34	14,58	13,68	13,37
Zona 2																
Δ %	-285,91	-319,43	-314,95	-314,92	-314,92	-332,98	-6,17	-2,09	-6,34	-6,02	-5,92	-5,28	2,53	0	4,24	3,92
Zona 3																
Δ %	-376,75	-372,68	-368,2	-368,17	-368,17	-381,68	-4,64	-4,63	-1,41	-1,38	-4,39	-4,55	1,62	2,14	0	1,93
		1,1%	2,3%	2,3%	2,3%	-1,3%		0,2%	69,6%	70,3%	5,4%	1,9%		32,1%	-100,0%	19,1%
																23,5%

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2560,68	2417,03	2416,95	2369,59	2369
Zona 2	-2,09	-132,29	-124,32	-121,87	-104,22
Zona 3	-84,6	-4,68	-3,9	78,95	81,91

Pilar - zona 3					
	b (m)	h (m)	y (m)	I (m4)	A (m2)
	0,6	0,6	1,45	-0,725	0,1269
	0,5	0,5	-0,725	0,1269	0,4873
	-0,25				-0,13
	0,00625				-13,47
	0,3				2357,71
	-1,51				
	-3,13				
	78,25				

Viga - zona 1					
	b (m)	h (m)	y (m)	I (m4)	A (m2)
	0,6	0,6	1,45	-0,725	0,1269
	0,5	0,5	-0,725	0,1269	0,4873
	-0,25				-0,13
	0,00625				-13,47
	0,3				2357,71
	-1,51				
	-3,13				
	78,25				

ULS_SOB3+V2 - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-10,99	-42,07	-40,91	-64,15	-66,67	-9,95	-12,09	-11,51	-11,51	-11,29	-11,29	11,19	12,03	11,31	11,31	10,98	10,96
Δ %		82,1%	31,4%	33,3%	-4,6%	-8,7%		-21,5%	-15,7%	-15,7%	-13,5%	-13,5%		7,5%	1,1%	1,1%	-1,9%	-2,1%
Zona 2		-243,54	-242,04	-242,04	-242,04	-260,1	-4,61	-0,9	-4,86	-4,6	-4,45	-3,81	1,82	0	3,25	2,98	2,83	2,07
Δ %		-10,7%	-10,0%	-10,0%	-10,0%	-18,2%		80,5%	-5,4%	0,2%	3,5%	17,4%		-100,0%	78,6%	63,7%	55,5%	13,7%
Zona 3		-296,79	-295,29	-295,29	-295,29	-308,8	-4,66	-4,38	-1,8	-1,78	-5,22	-5,44	2,25	2,4	0	0	3,26	3,38
Δ %		1,2%	1,7%	1,7%	1,7%	-2,8%		6,0%	61,4%	61,8%	-12,0%	-16,7%		6,7%	-100,0%	-100,0%	44,9%	50,2%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-1,205	σ_{med} (MPa)	0,62
σM (MPa)	-3,455	σM (MPa)	-10,57
M (kNm)	86,38	M (kNm)	1732,20

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2090,44	1965,96	1919,13	1917,29
Zona 2	-2,17	-101,3	-94,74	-73,53
Zona 3	-84,77	-20,41	-19,97	106

ULS_SOB3+V2- - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-25,93	-55,64	-53,2	-75,05	-77,93	-9,95	-12,01	-11,29	-11,29	-10,92	-10,9	11,19	11,89	11,02	11,04	10,55	10,52
Δ %		57,7%	9,3%	13,3%	-22,3%	-27,0%		-20,7%	-13,5%	-13,5%	-9,7%	-9,5%		6,3%	-1,5%	-1,3%	-5,7%	-6,0%
Zona 2		-243,9	-242,41	-242,41	-242,41	-260,47	-4,61	-0,9	-4,87	-4,52	-4,38	-3,54	1,82	0	3,25	2,9	2,76	1,8
Δ %		-10,8%	-10,2%	-10,2%	-10,2%	-18,4%		80,5%	-5,6%	2,0%	5,0%	23,2%		-100,0%	78,6%	59,3%	51,6%	-1,1%
Zona 3		-297,16	-295,67	-295,67	-295,67	-309,17	-4,66	-1,03	-3,3	-3,14	-7,88	-8,14	2,25	0	1,33	1,17	5,91	6,08
Δ %		1,1%	1,6%	1,6%	1,6%	-2,9%		77,9%	29,2%	32,6%	-69,1%	-74,7%		-100,0%	-40,9%	-48,0%	162,7%	170,2%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-1,205	σ_{med} (MPa)	0,62
σM (MPa)	-3,455	σM (MPa)	-10,57
M (kNm)	86,38	M (kNm)	1732,20

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2059,28	1922,09	1924,11	1850,25
Zona 2	-2,17	-101,46	-92,71	-89,19
Zona 3	0,92	57,9	53,8	172,42

A28

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_v1+

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,45
y (m)	-0,25	y (m)	-0,725
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1269
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4873
σ_m (MPa)	-0,83	σ_{med} (MPa)	-0,05
σ'_m (MPa)	2,27	σ'_m (MPa)	-5,95
M (kNm)	-56,75	M (kNm)	1041,46

		Momento Fletor (kNm)				
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		1121,73	1060,57	1060,56	1043,21	1041,92
Zona 2		-1,81	-61,7	-58,95	-57,87	-55,94
Zona 3		-118,78	-87,1	-86,49	-49,87	-47,28

ULS_V1+ - Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																						
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão											Tensões (MPa) - Tração				
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5				
Zona 1																						
Δ %	-14,81	0	-8,56	-8,38	-15,46	-17,2	-3,13	-3,77	-3,61	-3,61	-3,56	-3,56	3,54	3,77	3,57	3,57	3,49	3,47				
	100,0%	42,2%	43,4%	-4,4%	-16,1%		-20,4%	-20,4%	-15,3%	-15,3%	-13,7%	-13,7%		6,5%	0,8%	0,8%	-1,4%	-2,0%				
Zona 2																						
Δ %	-72,14	-72,19	-76,77	-76,77	-76,77	-94,82	-1,56	-0,31	-1,48	-1,43	-1,38	-1,5	0,67	0	0,97	0,92	0,87	0,87				
	-0,1%	-0,1%	-6,4%	-6,4%	-6,4%	-31,4%	80,1%	80,1%	5,1%	8,3%	11,5%	3,8%		-100,0%	44,8%	37,3%	29,9%	29,9%				
Zona 3																						
Δ %	-131,55	-125,44	-130,02	-130,02	-130,02	-143,53	-3,65	-5,17	-4,54	-4,52	-2,99	-2,92	2,6	4,33	3,67	3,66	2,12	1,96				
	4,6%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	-9,1%	-41,6%	-41,6%	-24,4%	-23,8%	18,1%	20,0%		66,5%	41,2%	40,8%	-18,5%	-24,6%				

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,525	σ _{med} (MPa)	0,205
σ _M (MPa)	3,125	σ _M (MPa)	-3,335
M (kNm)	-78,13	M (kNm)	546,54

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	650,37	618,54	618,54	607,25	605,99
Zona 2	-1,81	-30,7	-29,36	-28,22	-29,53
Zona 3	-118,8	-102,69	-102,27	-63,88	-60,93

ULS_V1+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo Inclinado)																							
		Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração					
		MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5				
Zona 1																							
Δ %		-14,81	-4,95	-13,12	-12,55	-19,27	-21,09	-3,13	-3,77	-3,56	-3,57	-3,47	-3,46	3,54	3,74	3,5	3,5	3,37	3,35				
		66,6%	66,6%	11,4%	15,3%	-30,1%	-42,4%		-20,4%	-13,7%	-14,1%	-10,9%	-10,5%		5,6%	-1,1%	-1,1%	-4,8%	-5,4%				
Zona 2																							
Δ %		-72,14	-72,29	-76,88	-76,88	-76,88	-94,93	-1,56	-0,31	-1,49	-1,41	-1,36	-1,41	0,67	0	0,97	0,89	0,85	0,78				
		-0,2%	-0,2%	-6,6%	-6,6%	-6,6%	-31,6%		80,1%	4,5%	9,6%	12,8%	9,6%		-100,0%	44,8%	32,8%	26,9%	16,4%				
Zona 3																							
Δ %		-131,55	-125,55	-130,13	-130,13	-130,13	-143,63	-3,65	-4,12	-3,58	-3,62	-2,16	-2,07	2,6	3,29	2,71	2,75	1,29	1,12				
		4,6%	4,6%	1,1%	1,1%	1,1%	-9,2%		-12,9%	1,9%	0,8%	40,8%	43,3%		26,5%	4,2%	5,8%	-50,4%	-56,9%				

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m4)	0,00625	I (m4)	0,1352
A (m2)	0,3	A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	-0,525	σ _{med} (MPa)	0,205
σ _M (MPa)	3,125	σ _M (MPa)	-3,335
M (kNm)	-78,13	M (kNm)	546,54

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	
Zona 1	647,32	608,69	609,16	589,52	586,78
Zona 2	-1,81	-30,75	-28,73	-27,65	-27,42
Zona 3	-92,64	-78,59	-79,57	-43,12	-39,9

A29

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V2+

ULS_V2+ - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-36,27	0	-26,42	-25,86	-36,06	-37,95	-9,03	-9,63	-9,15	-9,15	-9,02	-9,02	8,88	9,63	9,04	9,04	8,87	8,86
	100,0%		27,2%	28,7%	0,6%	-4,6%		-6,6%	-1,3%	-1,3%	0,1%	0,1%		8,4%	1,8%	1,8%	-0,1%	-0,2%
Zona 2																		
Δ %	-171,25	-185,91	-186,4	-186,36	-186,36	-204,41	-3,7	-0,69	-3,71	-3,55	-3,48	-3,27	1,54	0	2,47	2,3	2,24	1,91
	-8,6%	-8,6%	-8,8%	-8,8%	-8,8%	-19,4%		81,4%	-0,3%	4,1%	5,9%	11,6%		-100,0%	60,4%	49,4%	45,5%	24,0%
Zona 3																		
Δ %	-245,31	-239,17	-239,66	-239,61	-239,61	-253,12	-1,08	-5,55	-3,01	-2,96	-0,85	-0,99	0	3,95	1,41	1,37	0	0
	2,5%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	-3,2%		-413,9%	-178,7%	-174,1%	21,3%	8,3%		-	-	-	-	-

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,45
y (m)	-0,725
I (m4)	0,1269
A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	-0,075
σ _M (MPa)	-8,955
M (kNm)	1567,43

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1689,03	1595,55	1595,46	1569,14	1567,75
Zona 2	-1,81	-77,3	-73,13	-71,49	-64,71
Zona 3	-118,76	-55,34	-54,1	2,11	3,94

ULS V2+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo horizontal)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão						Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	-29,34	0	-17,58	-17,22	-30,85	-32,83	-5,84	-7,06	-6,74	-6,73	-6,64	-6,63	6,60	7,06	6,65	6,65	6,49	6,47
Δ %	100,0%	100,0%	40,1%	41,3%	-5,1%	-11,9%		-20,9%	-15,4%	-15,2%	-13,7%	-13,5%		7,0%	0,8%	0,8%	-1,7%	-2,0%
Zona 2	-105,14	-109,99	-113,46	-113,46	-113,46	-131,52	-2,15	-0,44	-2,23	-2,12	-2,03	-1,9	0,84	0	1,47	1,36	1,28	1,02
Δ %	-4,6%	-4,6%	-7,9%	-7,9%	-7,9%	-25,1%		79,5%	-3,7%	1,4%	5,6%	11,6%		-100,0%	75,0%	61,9%	52,4%	21,4%
Zona 3	-168,69	-163,25	-166,71	-166,71	-166,71	-180,22	-1,14	-5,3	-3,39	-3,35	-0,71	-0,89	0	4,21	2,28	2,24	0	0
Δ %	3,2%	3,2%	1,2%	1,2%	1,2%	-6,8%		-364,9%	-197,4%	-193,9%	37,7%	21,9%		-	-	-	-	-

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,65
y (m)	-0,825
I (m4)	0,1352
A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,38
σ _M (MPa)	-6,22
M (kNm)	1019,33

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1217,49	1153,35	1130,83	1129,39
Zona 2	-1,81	-46,3	-43,53	-41,34
Zona 3	-118,8	-70,82	-69,96	3,93

ULS_V2+- Pórticos com Vigas de Seção Variável (eixo inclinado)																		
Esforço Axial (kN)						Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																		
Δ %	-29,34	-7,33	-24,18	-23,07	-35,98	-38,16	-5,84	-7,05	-6,64	-6,64	-6,45	-6,43	6,60	7,01	6,52	6,53	6,27	6,25
		75,0%	17,6%	21,4%	-22,6%	-30,1%		-20,7%	-13,7%	-13,7%	-10,4%	-10,1%		6,2%	-1,2%	-1,1%	-5,0%	-5,3%
Zona 2																		
Δ %	-105,14	-110,16	-113,63	-113,63	-113,63	-131,68	-2,15	-0,44	-2,23	-2,07	-1,99	-1,74	0,84	0	1,48	1,31	1,23	0,86
		-4,8%	-8,1%	-8,1%	-8,1%	-25,2%		79,5%	-3,7%	3,7%	7,4%	19,1%		-100,0%	76,2%	56,0%	46,4%	2,4%
Zona 3																		
Δ %	-168,69	-163,41	-166,88	-166,88	-166,88	-180,39	-1,14	-3,29	-1,55	-1,63	-2,29	-2,49	0	2,2	0,44	0,51	1,18	1,29
		3,1%	1,1%	1,1%	1,1%	-6,9%		-188,6%	-36,0%	-43,0%	-100,9%	-118,4%		-	-	-	-	-

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,65
y (m)	-0,825
I (m4)	0,1352
A (m2)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,38
σ _M (MPa)	-6,22
M (kNm)	1019,33

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1211,51	1133,49	1134,4	1095,89
Zona 2	-1,81	-46,37	-42,32	-40,24
Zona 3	-68,7	-24,93	-26,74	43,36

A30

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V1-

ULS_V1 - - Pórticos com Vigas de Secção Constante																
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão									
	MEF						Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3		Tipo 4		Tipo 5	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Zona 1	-18,45	-47,33	-45,84	-56,94	-59,21	-9,93	-10,67	-10,14	-10,14	-9,92	-9,92	9,70	10,59	9,95	9,95	9,67
Δ %	69,5%	21,8%	24,2%	5,9%	2,1%	-4,8	-7,5%	-2,1%	-2,1%	0,1%	0,1%	0,1%	9,2%	2,6%	2,6%	-0,1%
Zona 2	-247,09	-245,89	-245,85	-245,85	-263,91	-4,8	-0,94	-5	-4,7	-4,63	-4,2	1,96	0	3,36	3,06	2,99
Δ %	-10,0%	-9,4%	-9,4%	-9,4%	-17,5%	-2,83	80,4%	-4,2%	2,1%	3,5%	12,5%	0	-100,0%	71,4%	56,1%	52,6%
Zona 3	-300,35	-299,14	-299,11	-299,11	-312,61	-2,83	-6,64	-4,57	-4,59	-2,19	-2,1	0,39	4,69	2,58	2,6	0,19
Δ %	1,9%	2,3%	2,3%	2,3%	-2,1%	-134,6%	-134,6%	-61,5%	-62,2%	22,6%	25,8%	0,39	1102,6%	561,5%	566,7%	-51,3%
																-100,0%

Momento Fletor (kNm)					
Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Zona 1	1864,22	1761,57	1761,58	1720,01	1718,36
Zona 2	-2,5	-104,39	-97,01	-95,23	-82,99
Zona 3	-141,06	-89,42	-89,88	-29,73	-26,46

Viga - zona 1					
b (m)	0,6				
h (m)	1,45				
y (m)	-0,725				
I (m4)	0,1269				
A (m2)	0,4873				
σ_{med} (MPa)	-0,115				
σ_N(MPa)	-9,815				
M (kNm)	1717,96				

Pilar - zona 3					
b (m)	0,6				
h (m)	0,5				
y (m)	-0,25				
I (m4)	0,00625				
A (m2)	0,3				
σ_{med} (MPa)	-1,22				
σ_N(MPa)	1,61				
M (kNm)	-40,25				

ULS V1 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração		
MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 5
Zona 1	-18,31	-38,46	-37,17	-52,41	-54,76	-6,66	-8,13	-7,75	-7,56	-7,56	-7,56	7,29
Δ %	63,7%	23,8%	26,4%	-3,8%	-8,5%		-22,1%	-16,4%	-13,5%	-13,5%	-13,5%	-1,9%
Zona 2	-171,19	-172,96	-172,96	-172,96	-191,02	-3,25	-0,72	-3,51	-3,27	-3,18	-2,81	1,54
Δ %	-7,9%	-9,0%	-9,0%	-9,0%	-20,4%		77,8%	-8,0%	-0,6%	2,2%	13,5%	21,3%
Zona 3	-224,44	-226,22	-226,22	-226,22	-239,72	-2,78	-6,4	-4,96	-4,99	-1,69	-1,57	0,03
Δ %	2,3%	1,5%	1,5%	1,5%	-4,4%		-130,2%	-78,4%	-79,5%	39,2%	43,5%	-96,9%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,91	σ_{med} (MPa)	0,385
σM (MPa)	1,87	σM (MPa)	-7,045
M (kNm)	-46,75	M (kNm)	1154,5

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1392,87	1319,56	1319,56	1281,31
Zona 2	-3,62	-73,39	-67,43	-64,98
Zona 3	-141,28	-105,09	-105,91	-23,34

ULS V1 - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração		
MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 5
Zona 1	-29,03	-48,27	-46,14	-60,31	-62,89	-6,66	-8,03	-7,55	-7,56	-7,27	-7,25	6,95
Δ %	42,5%	4,4%	8,6%	-19,4%	-24,6%		-20,6%	-13,4%	-13,5%	-9,2%	-8,9%	-6,5%
Zona 2	-171,44	-173,22	-173,22	-173,22	-191,28	-3,25	-0,72	-3,52	-3,22	-3,13	-2,64	1,36
Δ %	-8,1%	-9,2%	-9,2%	-9,2%	-20,6%		77,8%	-8,3%	0,9%	3,7%	18,8%	7,1%
Zona 3	-224,7	-226,48	-226,48	-226,48	-239,98	-2,78	-4,13	-2,88	-3,03	-1,55	-1,79	0,19
Δ %	2,2%	1,4%	1,4%	1,4%	-4,5%		-48,6%	-3,6%	-9,0%	44,2%	35,6%	-80,2%

Pilar - zona 3		Viga - zona 1	
b (m)	0,6	b (m)	0,6
h (m)	0,5	h (m)	1,65
y (m)	-0,25	y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,00625	I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,3	A (m ²)	0,4136
σ_{med} (MPa)	-0,91	σ_{med} (MPa)	0,385
σM (MPa)	1,87	σM (MPa)	-7,045
M (kNm)	-46,75	M (kNm)	1154,53

Momento Fletor (kNm)				
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	1371,19	1281,79	1283,55	1227,73
Zona 2	-3,62	-73,5	-66,09	-63,81
Zona 3	-84,58	-53,18	-57	19,97

A31

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DA COMBINAÇÃO ULS_V2-

ULS_V2 - Pórticos com Vigas de Seção Constante																		
Esforço Axial (kN)							Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		-18,36	-56,38	-54,7	-69,23	-71,63	-12,96	-13,9	-13,21	-13,2	-12,95	-12,94		13,82	12,98	12,98	12,66	12,65
Δ %	-68,96	73,4%	18,2%	20,7%	-0,4%	-3,9%		-7,3%	-1,9%	-1,9%	0,1%	0,2%	12,68	9,0%	2,4%	2,4%	-0,2%	-0,2%
Zona 2		-284,91	-282,6	-282,55	-282,55	-300,61	-5,41	-1,06	-5,74	-5,39	-5,3	-4,67	2,16	0	3,86	3,51	3,41	2,67
Δ %	-257,53	-10,6%	-9,7%	-9,7%	-9,7%	-16,7%		80,4%	-6,1%	0,4%	2,0%	13,7%		-100,0%	78,7%	62,5%	57,9%	23,6%
Zona 3		-338,17	-335,85	-335,81	-335,81	-349,31	-1,93	-6,77	-3,42	-3,42	-1,97	-2,15	0	4,51	1,18	1,18	0	0
Δ %	-343,2	1,5%	2,1%	2,2%	2,2%	-1,8%		-250,8%	-77,2%	-77,2%	-2,1%	-11,4%		-	-	-	-	-

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,45
y (m)	-0,725
I (m4)	0,1269
A (m2)	0,4873
σ _{med} (MPa)	-0,14
σ _M (MPa)	-12,82
M (kNm)	2243,94

Momento Fletor (kNm)					
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1	2431,52	2296,56	2296,48	2245,94	2244,19
Zona 2	-2,56	-119,99	-111,19	-108,86	-91,76
Zona 3	-141,05	-57,46	-57,49	25,06	26,71

		Esforço Axial (kN)					Tensões (MPa) - Compressão					Tensões (MPa) - Tração							
		MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1																			
Δ	%	-65,03	-18,31	-47,48	-46,01	-67,79	-70,39	-9,37	-11,42	-10,88	-10,87	-10,64	-10,63	10,50	11,33	10,65	10,65	10,31	10,29
			71,8%	27,0%	29,2%	-4,2%	-8,2%		-21,9%	-16,1%	-16,0%	-13,6%	-13,4%		7,9%	1,4%	1,4%	-1,8%	-2,0%
Zona 2																			
Δ	%	-191,63	-208,99	-209,66	-209,66	-209,66	-227,71	-3,85	-0,84	-4,26	-3,96	-3,82	-3,22	1,45	0	2,86	2,57	2,43	1,7
			-9,1%	-9,4%	-9,4%	-9,4%	-18,8%		78,2%	-10,6%	-2,9%	0,8%	16,4%		-100,0%	97,2%	77,2%	67,6%	17,2%
Zona 3																			
Δ	%	-266,79	-262,25	-262,91	-262,91	-262,91	-276,41	-1,84	-6,53	-3,81	-3,82	-2,26	-2,25	0	4,78	2,05	2,07	0,66	0,56
			1,7%	1,5%	1,5%	1,5%	-3,6%		-254,9%	-107,1%	-107,6%	-22,8%	-22,3%		-	-	-	-	-

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,65
y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,565
σ _M (MPa)	-9,935
M (kNm)	1628,14

		Momento Fletor (kNm)				
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		1959,99	1854,37	1854,37	1804,88	1802,99
Zona 2		-3,62	-88,99	-81,6	-78,11	-61,46
Zona 3		-141,28	-73,23	-73,61	44,47	48,86

		Esforço Axial (kN)										Tensões (MPa) - Compressão										Tensões (MPa) - Tração				
		MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5							
Zona 1																										
Δ	%	-65,03	-31,42	-59,33	-56,65	-77,03	-79,95	-9,37	-11,31	-10,63	-10,63	-10,25	-10,23	10,50	11,15	10,34	10,36	9,88	9,84							
			51,7%	8,8%	12,9%	-18,5%	-22,9%		-20,7%	-13,4%	-13,4%	-9,4%	-9,2%		6,2%	-1,5%	-1,3%	-5,9%	-6,3%							
Zona 2																										
Δ	%	-191,63	-209,31	-209,98	-209,98	-209,98	-228,03	-3,85	-0,84	-4,26	-3,89	-3,76	-2,96	1,45	0	2,87	2,49	2,36	1,44							
			-9,2%	-9,6%	-9,6%	-9,6%	-19,0%		78,2%	-10,6%	-1,0%	2,3%	23,1%		-100,0%	97,9%	71,7%	62,8%	-0,7%							
Zona 3																										
Δ	%	-266,79	-262,56	-263,23	-263,23	-263,23	-276,73	-1,84	-3,3	-0,9	-1,04	-5,14	-5,4	0	1,55	0	0	3,38	3,56							
			1,6%	1,3%	1,3%	1,3%	-3,7%		-79,3%	51,1%	43,5%	-179,3%	-193,5%		-	-	-	-	-							

Viga - zona 1	
b (m)	0,6
h (m)	1,65
y (m)	-0,825
I (m ⁴)	0,1352
A (m ²)	0,4136
σ _{med} (MPa)	0,565
σ _M (MPa)	-9,935
M (kNm)	1628,14

		Momento Fletor (kNm)				
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 1		1933,26	1806,59	1808,8	1734,11	1729,55
Zona 2		-3,62	-89,12	-79,68	-76,4	-55,11
Zona 3		-60,64	0,48	-4,16	106,45	111,95

A32

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DAS COMBINAÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA TIPO1

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	55,3	61,8	61,2	60,8	55,7	49,5
Δ %	-	-	-	-	-	-	11,8%	10,7%	9,9%	0,7%	-10,5%	
Zona 3	88,15	91,13	91,26	87,48	87,86	91,59	-	-	-	-	-	-
Δ %		3,4%	3,5%	-0,8%	-0,3%	3,9%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	54,8	61,8	61,1	60,7	55,2	49,1
Δ %	-	-	-	-	-	-	12,8%	11,5%	10,8%	0,7%	-10,4%	
Zona 3	88,15	91,13	87,87	84,19	84,56	88,26	-	-	-	-	-	-
Δ %		3,4%	-0,3%	-4,5%	-4,1%	0,1%	-	-	-	-	-	-

0.3*X 1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	13,8	18,5	18,4	18,1	13,5	11,9
Δ %		34,1%	33,3%	31,2%	-2,2%	-13,8%

0.3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	12	18,6	18,4	18	12	10,5
Δ %		55,0%	34,4%	32,6%	0,0%	-12,5%

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)⌘							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	39,3	52,9	52,6	52,2	44,2	39,7
Δ %	-	-	-	-	-	-	34,6%	33,8%	32,8%	12,5%	1,0%	
Zona 3	76,42	78,6	79,53	76,35	76,3	80,15	-	-	-	-	-	-
Δ %		2,9%	4,1%	-0,1%	-0,2%	4,9%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)⌘							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	38,7	52,9	52,6	52,2	43,6	39,2
Δ %	-	-	-	-	-	-	36,7%	35,9%	34,9%	12,7%	1,3%	
Zona 3	76,42	78,6	75,69	72,55	72,69	76,54	-	-	-	-	-	-
Δ %		2,9%	-1,0%	-5,1%	-4,9%	0,2%	-	-	-	-	-	-

0.3*X 1* - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	8,3	15,9	15,8	15,5	8,3	7,4
Δ %		91,6%	90,4%	86,7%	0,0%	-10,8%

0.3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	6,5	15,9	15,8	15,5	6,4	5,7
Δ %		144,6%	143,1%	138,5%	-1,5%	-12,3%

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	39,3	47,7	47,9	47,7	40,1	43,2
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	21,4%	21,9%	21,4%	2,0%	9,9%
Zona 3	76,42	78,71	79,86	76,68	76,59	80,46	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	3,0%	4,5%	0,3%	0,2%	5,3%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	38,7	47,3	47,5	47,4	39,2	42,3
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	22,2%	22,7%	22,5%	1,3%	9,3%
Zona 3	76,42	78,58	75,98	72,82	72,97	76,79	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	2,8%	-0,6%	-4,7%	-4,5%	0,5%	-	-	-	-	-	-

0.3*X 1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	8,3	11,1	11,5	11,4	4,5	5,3
Δ %	-	33,7%	38,6%	37,3%	-45,8%	-36,1%

0.3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	6,5	9,9	10,3	10,2	1,6	2,3
Δ %	-	52,3%	58,5%	56,9%	-75,4%	-64,6%

A33

FOLHAS DE CÁLCULO COM OS RESULTADOS DAS COMBINAÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA TIPO2

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Força de Corte Basal (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	23,1	28,7	28,5	28,1	23	20,3
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	24,2%	23,4%	21,6%	-0,4%	-12,1%
Zona 3	41,23	42,56	44,22	42,44	42,62	44,35	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	3,2%	7,3%	2,9%	3,4%	7,6%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3* - Pórticos com Vigas de Secção Constante												
Força de Corte Basal (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	22,6	28,7	28,4	28,1	22,6	20
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	27,0%	25,7%	24,3%	0,0%	-11,5%
Zona 3	41,22	42,56	39,34	37,71	37,88	39,58	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	3,3%	-4,6%	-8,5%	-8,1%	-4,0%	-	-	-	-	-	-

0.3*X 1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	4	8,6	8,6	8,3	3,6	3
Δ %	-	115,0%	115,0%	107,5%	-10,0%	-25,0%

0.3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Constante						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	2,5	8,6	8,5	8,2	2,3	1,8
Δ %	-	244,0%	240,0%	228,0%	-8,0%	-28,0%

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	15,1	24,6	24,5	24,2	16,2	14,5
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	62,9%	62,3%	60,3%	7,3%	-4,0%
Zona 3	35,79	36,77	38,95	37,48	37,36	39,13	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	2,7%	8,8%	4,7%	4,4%	9,3%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	14,6	24,6	24,5	24,2	15,7	14,1
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	68,5%	67,8%	65,8%	7,5%	-3,4%
Zona 3	35,79	36,77	33,43	32,02	32,18	33,94	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	2,7%	-6,6%	-10,5%	-10,1%	-5,2%	-	-	-	-	-	-

.3*X 1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	0,9	7,4	7,4	7,1	-0,7	-0,6
Δ %	-	722,2%	722,2%	688,9%	-177,8%	-166,7%

.3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo horizontal)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-0,6	7,4	7,4	7,1	-1,8	-1,7
Δ %	-	1333,3%	1333,3%	1283,3%	-200,0%	-183,3%

1*X 0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	15,1	19,3	19,7	19,6	12,1	13,4
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	27,8%	30,5%	29,8%	-19,9%	-11,3%
Zona 3	35,79	36,84	39,12	37,65	37,5	39,3	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	2,9%	9,3%	5,2%	4,8%	9,8%	-	-	-	-	-	-

1*X -0.3*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)												
Força de Corte na Base dos Pilares (kN)							Ux (mm)					
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	-	-	-	-	-	-	14,6	19	19,4	19,3	11,3	12,6
Δ %	-	-	-	-	-	-	-	30,1%	32,9%	32,2%	-22,6%	-13,7%
Zona 3	35,79	36,73	33,55	32,11	32,3	34,03	-	-	-	-	-	-
Δ %	-	2,6%	-6,3%	-10,3%	-9,8%	-4,9%	-	-	-	-	-	-

3*X 1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2	1	2,5	3	2,9	-4	-3,8
Δ %	-	150,0%	200,0%	190,0%	-500,0%	-480,0%

3*X -1*Z - Pórticos com Vigas de Secção Variável (eixo inclinado)						
Ux (mm)						
	MEF	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Zona 2		1,5	1,9	1,9	-6,6	-6,4
Δ %	-0,6	350,0%	416,7%	416,7%	-1000,0%	-966,7%