

Influência do Sistema Estrutural na Resistência Sísmica dos Edifícios

Versão final após defesa

Gabrielly Cristina de Souza Carvalho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil: Estruturas e Construção
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Jorge Miguel de Almeida Andrade

Janeiro de 2025

Declaração de Integridade

Eu, Gabrielly Cristina de Souza Carvalho, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12473 de/o Engenharia Civil: Estruturas e Construção da Universidade da Beira Interior – UBI declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 09/01/2025

Gabrielly Cristina de Souza Carvalho

Dedicatória

A Sandra Souza Elizeche, minha mãe, mulher forte, honesta, encantadora e acima de tudo inteligente. A minha maior inspiração que desde sempre me ensinou a importância dos estudos, porque não importa as circunstâncias da vida obter novos conhecimentos e ter uma formação acadêmica sempre será a melhor decisão de nossas vidas, não importa o esforço que isso demande.

A essa mulher que nunca desistiu eu dedico toda a minha vida!

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Jorge Andrade, por toda a ajuda, rigor e disponibilidade prestada ao longo deste projeto acadêmico.

A todos os docentes da Universidade da Beira Interior, os quais contribuíram para o meu progresso e crescimento acadêmico, e a todos os meus amigos, que sempre me apoiaram e motivaram a persistir para conseguir alcançar os meus objetivos. A todos eles deixo o meu eterno obrigado.

Por último, mas os mais importantes, agradeço a minha família que mesmo longe se fizeram presente me apoiando e incentivando, a vocês exponho a minha eterna gratidão.

Resumo

A ação sísmica além de ser uma realidade global que assola inúmeras regiões todo ano, é também responsável por uma parte marcante da história e do desenvolvimento de Portugal, como foi o caso do sismo de 1755, moldando assim, a forma como a sociedade lida com os desafios sísmicos e impulsionando o desenvolvimento de uma abordagem mais ativa em termos de prevenção tanto para garantir a estabilidade das estruturas como para preservar a vida humana.

Este trabalho tem como objetivo principal a elaboração de um documento de aplicação prática sobre a influência dos sistemas de contraventamento em estruturas metálicas quando sujeitas a ações horizontais, mais especificamente no caso da ação sísmica. Deste modo considerou-se os procedimentos descritos no Eurocódigo 8 [3], tanto para a definição da ação sísmica, como para a verificação da capacidade dos elementos estruturais. Com este intuito foram considerados vários casos de estudo baseados no dimensionamento de pórticos idênticos, mas com diferentes sistemas resistentes a ações horizontais, contraventamento em X, V ou V invertido e com ligações viga-pilar resistentes a momentos.

Para a análise dos diversos casos de estudo foram realizadas simulações numéricas, tanto estáticas como dinâmicas. De modo a otimizar o processo de dimensionamento dos elementos estruturais recorreu-se à utilização do programa de cálculo automático TRICALC, sendo, deste modo, apresentados modelos estruturais mais eficientes para cada situação estudada.

No final são apresentadas algumas conclusões que podem vir a ser consideradas como base para a escolha de um sistema estrutural eficiente para uma dada situação de projeto.

Palavras-chave

Estrutura Metálica; Pórticos; Sistemas de Contraventamento; Ação Sísmica; Eurocódigo 8.

Abstract

Seismic action, in addition to being a global reality that devastates countless regions every year, is also responsible for a significant part of Portugal's history and development, as was the case with the 1755 earthquake, thus shaping the way society deals with it. seismic challenges and driving the development of a more active approach in terms of prevention both to ensure the stability of structures and to preserve human life.

The main objective of this work is to prepare a practical application document on the influence of bracing systems on metal structures when subjected to horizontal actions, more specifically in the case of seismic action. In this way, the procedures described in Eurocode 8 [3] were considered, both for defining the seismic action and for verifying the capacity of the structural elements. For this purpose, several case studies were considered based on the design of identical frames, but with different systems resistant to horizontal actions, X, V or inverted V bracing and with beam-column connections resistant to moments.

To analyse the various case studies, numerical simulations were carried out, both static and dynamic. In order to optimize the process of dimensioning the structural elements, the automatic calculation program TRICALC was used, thus presenting more efficient structural models for each situation studied.

Finally, some conclusions are presented that can be considered as a basis for choosing an efficient structural system for a given design situation.

Keywords

Steel Structure; Frames; Bracing Systems; Seismic Action; Eurocode 8.

Índice

Dedicatória	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Palavras-chave	vii
Abstract	ix
Keywords	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xiv
Índice de Quadros	xvi
Lista de Acrónimos	xviii
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos e Justificação do Tema Proposto.....	2
1.3. Organização do Trabalho.....	2
Capítulo 2	0
2. Sistemas estruturais para resistir a ações horizontais	0
2.1. Introdução.....	0
2.2. Regulamentação europeia – Eurocódigo 8.....	0
2.2.1. Princípios básicos.....	0
2.2.2. Definição da ação sísmica.....	2
2.2.3. Considerações sobre o comportamento dissipativo – Coeficiente de comportamento.....	7
2.2.4. Regras específicas para estruturas metálicas.....	10
2.2.4.1. Tipos de estruturas.....	11
2.2.4.2. Pórticos Simples.....	13
2.2.4.3. Pórticos com contraventamento centrado.....	16
2.3. Conclusão.....	20

Capítulo 3	21
3. Análise do comportamento sísmico	21
3.1. Introdução	21
3.2. Definição do caso de estudo	22
3.2.1. Dimensionamento para ações verticais	22
3.2.2. Dimensionamento para ação sísmica.....	24
3.3. Dimensionamento dos casos de estudo	25
3.3.1. Introdução.....	25
3.3.2. Sistema em pórtico simples	25
3.3.2.1. Pórtico simples de um vão (P01a).....	26
3.3.2.2. Pórtico simples de dois vãos consecutivos (P01b).....	27
3.3.2.3. Pórtico simples de dois vãos não consecutivos (P01c)	28
3.3.3. Sistema contraventado em X (P02).....	29
3.3.4. Sistema contraventado em diagonal (P03).....	30
3.3.5. Sistema contraventado em V (P04).....	32
3.3.6. Análise de resultados e conclusões.....	33
Capítulo 4	0
4. Considerações Finais	0
4.1. Conclusões	0
4.2. Propostas para trabalhos futuros	0
Referências	2

Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa de distribuição de risco sísmico no Mundo (6).....	3
Figura 2 - Zonamento sísmico da NP EN 1998. (7).....	4
Figura 3 - Forma do espectro de resposta elástica	6
Figura 4 - Representação do espectro de resposta elástico e de cálculo com diferentes coeficientes de comportamento (8).....	10
Figura 5 - Pórticos simples	11
Figura 6 - Pórticos simples	11
Figura 7 - Pórtico com contraventamentos diagonais centrados.....	11
Figura 8 - Pórtico com contraventamentos diagonais centrados.....	12
Figura 9 - Pórtico com contraventamento em V centrados	12
Figura 10 - Pórtico com contraventamento em V centrados.....	12
Figura 11 - Pórticos com contraventamentos excêntricos.....	12
Figura 12 - Pórticos com contraventamentos excêntricos	12
Figura 13 - Pêndulo Invertido	12
Figura 14 - Pêndulo Invertido.....	12
Figura 15 - Estruturas com núcleos ou paredes de betão.....	12
Figura 16 - Estruturas com núcleos ou paredes de betão	12
Figura 17 - Pórtico simples associado a contraventamento centrado	13
Figura 18 - Pórtico simples associado a contraventamento centrado.....	13
Figura 19 - Pórtico simples associado a enchimentos.....	13
Figura 20 - Pórtico simples associado a enchimentos	13
Figura 21 - Planta dos pisos do edifício.....	22
Figura 22 - Planta do edifício / Definição dos pórticos estudados	23
Figura 23 - Pórtico base - ações verticais.....	24
Figura 24 – PO1 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência).....	26
Figura 25 – PO1a – dimensionamento à ação sísmica	27
Figura 26 – PO1b – dimensionamento à ação sísmica.....	27
Figura 27 – PO1c – dimensionamento à ação sísmica	28
Figura 28 – PO2 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)	29
Figura 29 – PO2 – dimensionamento à ação sísmica	30
Figura 30 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)	31
Figura 31 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica.....	31
Figura 32 – PO4 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)	32
Figura 33 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica	33

Índice de Quadros

Quadro 1 - Aceleração máxima de referência (a_{gR})	4
Quadro 2 - Tipos de terreno considerados no EC8 (3)	5
Quadro 3 - Coeficiente de comportamento previstos no EC8.....	8
Quadro 4 - Coeficiente de comportamento para estruturas regulares em altura	9
Quadro 5 - Definição das ações verticais	23
Quadro 6 - Secções consideradas - ações verticais	24
Quadro 7 – PO1 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)	26
Quadro 8 – PO1a – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada)	27
Quadro 9 – PO1b – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada)	28
Quadro 10 – PO1c – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada).....	28
Quadro 11 – PO2 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada.....	29
Quadro 12 – PO2 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada	30
Quadro 13 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada.....	31
Quadro 14 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada.....	32
Quadro 15 – PO4 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada.....	33
Quadro 16 – PO3 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada	33
Quadro 17 - Comparação de resultados	34

Lista de Acrónimos

AISC	American Institute of Steel Construction
EC8	Eurocódigo 8
ELU	Estado Limite Último
MRF	Moment Resisting Frame
NP	Norma Portuguesa

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Tema

Um sismo ocorre quando há uma rutura súbita (ou deslizamento) ao longo de uma falha ou fratura geológica, resultando em vibrações que se propagam em todas as direções. Essas ruturas são causadas pelo acúmulo de tensões no interior da Terra, especialmente relacionadas ao movimento das placas tectónicas.

Como tem sido comprovado ao longo da história, as perdas humanas, sociais e económicas causadas por sismos intensos devem-se, em grande parte, ao dano excessivo nas construções e ao colapso de edifícios (1).

A história sísmica de Portugal é marcada por eventos notáveis, sendo o terremoto de 1755 um dos mais memoráveis, em 1 de novembro daquele ano, um sismo de magnitude de aproximadamente 9.0 atingiu a região de Lisboa, seguido por um tsunami e incêndios que resultaram em grande destruição e perda de vidas. Este evento reveste-se de elevado interesse, não só para Portugal, como para o Mundo, tendo servido de charneira no pensamento crítico sobre estes assuntos, eventos sísmicos. Dado que foi por esta altura que se começou a estudar mais aprofundadamente a origem destes eventos e a considerar a possibilidade de desenvolver/criar estruturas que poderiam vir a resistir a sismos.

Mais recentemente, durante os sismos de Northridge na Califórnia em 1994 e em Kobe no Japão em 1995, foi avaliado o desempenho de estruturas metálicas submetidas a este tipo de ação, onde foi verificado que as estruturas mais afetadas foram as estruturas metálicas porticadas de ligações rígidas (Moment Resisting Frame, MRF) notou-se uma rotura frágil das ligações viga-coluna cujo comportamento contribuiu para a aprendizagem sobre este tipo de estruturas.

Diante de fatos como estes, os esforços para melhorar a segurança sísmica levaram ao desenvolvimento de normas e regulamentos específicos para estruturas metálicas em áreas propensas a sismos. Organizações como o American Institute of Steel Construction (AISC) nos Estados Unidos e o Comité Europeu de Normalização (CEN) na Europa estabeleceram diretrizes para o projeto de estruturas metálicas resistentes a sismos.

A compreensão da ação sísmica é fundamental para o desenvolvimento dos códigos e normas de construção que visam aumentar a segurança e a resiliência das estruturas em áreas propensas a atividades sísmicas, além de evitar custos elevados para

requalificação de estruturas e demais infraestruturas danificadas, garantindo a maior segurança para a sociedade.

1.2. Objetivos e Justificação do Tema Proposto

O principal objetivo deste trabalho consiste em efetuar um estudo sobre a influência de diversos sistemas de contraventamento no desempenho de estruturas metálicas quando sujeitas à ação sísmica, dando indicações sobre qual, ou quais, os sistemas mais eficientes consoante o tipo de estrutura e de ação sísmica. De modo a atingir os objetivos propostos realizaram-se diversas simulações computacionais, onde se pode verificar a influência do sistema de contraventamento no que respeita ao comportamento sísmico das estruturas consideradas.

Com este intuito foram considerados vários casos de estudo baseados no dimensionamento de pórticos metálicos com diferentes sistemas resistentes a ações horizontais, desde contraventamentos em X, V ou Y a ligações viga-pilar resistentes a momentos.

Este trabalho também tem como objetivo analisar a aplicabilidade do Eurocódigo 8 (2), por forma a estimar que as diretrizes garantam que as estruturas metálicas sejam projetadas e construídas de acordo com os mais altos padrões de segurança sísmica. O EC8 tem como premissa estabelecer diretrizes que visam preservar vidas humanas, limitar danos e manter operacionais estruturas cruciais para a proteção civil.

Na parte final desta dissertação são apresentadas diversas sugestões de modo a ajudar na escolha/definição do sistema mais eficiente a adotar pelo engenheiro estrutural.

1.3. Organização do Trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos, referências bibliográficas e anexos.

Neste primeiro capítulo apresenta-se um enquadramento do tema, definem-se os objetivos desta dissertação e a apresentasse a organização do trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada uma análise da regulamentação em vigor assim como os princípios básicos de cálculo e considerações sobre o comportamento

dissipativo. Neste capítulo pretende-se avaliar os tipos de estruturas resistentes a ações horizontais, assim como, elucidar sobre quais as ações sísmicas a considerar.

No capítulo 3 é realizada a análise dos casos de estudo propostos. Neste capítulo efetua-se o dimensionamento de diversos pórticos metálicos sujeitos, tanto à ações gravíticas, como sísmicas. Para tal efetuaram-se diversas análises estáticas e dinâmicas utilizando o software de cálculo estrutural TRICALC.

Por fim, no quarto capítulo são apresentadas as conclusões finais deste estudo e algumas propostas para trabalhos futuros possíveis de desenvolver no âmbito deste tema.

Capítulo 2

2. Sistemas estruturais para resistir a ações horizontais

2.1. Introdução

Qualquer sistema estrutural deve proporcionar a estabilidade e a resistência necessária para suportar as ações que irá estar exposto durante a sua vida útil. Estas ações tanto podem ser verticais de origem gravítica, como horizontais originadas por sismos e ou vento, podendo elas atuar simultaneamente ou não (2).

De forma a conferir, não só resistência, mas também um melhor desempenho frente a ações horizontais, muitas vezes, os sistemas estruturais são complementados com sistemas auxiliares denominados de contraventamentos. Estes sistemas permitem aligeirar parte da estrutura ficando eles com o ónus de dar resistência e sustentabilidade face às ações horizontais.

Em áreas sísmicas ou sujeitas a ventos intensos, as estruturas devem ser projetadas para suportar essas forças laterais, além do peso próprio da construção e das cargas verticais. Para que isso seja possível, é fundamental a existência de normas que visem garantir que as estruturas sejam projetadas e construídas com a máxima resistência e segurança.

Neste capítulo é realizado uma análise do Eurocódigo 8 que aborda as regras para dimensionamento sísmico de edifícios de aço. É exposto não só o objetivo principal desta norma como também os princípios básicos e as especificações para alguns tipos de estruturas metálicas.

2.2. Regulamentação europeia – Eurocódigo 8

2.2.1. Princípios básicos

De acordo com a regulamentação para o dimensionamento estrutural vigente na Europa, qualquer construção que venha a ser executada numa zona considerada sísmica deve ter em consideração o preconizado no Eurocódigo 8, EC8. Esta norma tem por finalidade garantir, que em casos de ocorrências de sismos, a vida humana seja protegida e os danos causados nas estruturas sejam minimizados de modo que estas, após a ocorrência do evento sísmico, possam continuar operacionais.

Devido a que a aplicação dos Eurocódigos abrange uma vasta área geográfica, na definição de ações diretamente relacionadas com a localização, tais como a ação da neve, do vento, dos sismos, etc., os Eurocódigos apresentam critérios gerais remetendo para

os Anexos Nacionais as especificidades de cada zona geográfica, ou país. Se analisarmos a situação da ação sísmica esta diferenciação é facilmente compreendida pela localização dos países em placas tectónicas diferentes e em zonas distintas na mesma placa tectónica, ou seja, cada país está sujeito a eventos sísmicos de origem diferente e diferentes intensidades e magnitudes.

De forma a colmatar esta questão, o EC8, apresenta os parâmetros de determinação nacional a serem seguidos por cada país europeu. No que diz respeito a Portugal, o Anexo Nacional estipula que em casos da exigência de não colapso o valor recomendado para casos de edifícios correntes é de 10% de probabilidade de ocorrer um sismo em 50 anos e com um período de retorno de 475 anos, já em casos de exigência de limitação de danos esse valor é de 10% de probabilidade em 10 anos com um período de retorno de 95 anos. Indicando que em Portugal seja realizado a análise para dois tipos de sismos, Sismo do Tipo 1 e Sismo do Tipo 2 (4).

O desempenho da estrutura e os critérios de conformidade a serem considerados, segundo o EC8, tem de ser executados com base em determinados requisitos básicos, tal como, o requisito de não ocorrência de colapso que garante a integridade e a capacidade resistente residual da estrutura, o requisito de limitação de danos que se fundamenta no conceito de limitação das deformações, ou seja, os deslocamentos máximos entre pisos, soluções estruturais simples e regulares em planta e altura, resistência e rigidez adequadas quanto em ações verticais quanto nas horizontais, resistência e rigidez à torção, diafragmas rígidos no plano, fundações com rigidez adequada à transmissão uniforme ao terreno.

Por fim e não menos importante, o EC8 elucida os princípios de segurança a serem considerados durante o projeto de estruturas em zonas sísmicas, não só para estruturas metálicas, mas também para as estruturas constituídas por outros materiais.

A verificação aos Estados Limites Últimos é fundamento essencial na execução do projeto estrutural, assegurando que o sistema estrutural tenha a resistência e a capacidade de dissipação de energia prevista. Admitindo-se que a capacidade resistente máxima pode ser atingida em algumas secções. Consequentemente, nessas secções deixa de ser válido o comportamento linear sendo, assim, necessário considerar o comportamento não-linear da estrutura. No entanto, quando se considera que o comportamento de algumas secções pode ser não-linear é necessário que se verifique que nessas secções exista ductilidade adequada ao comportamento previsto. Por outro lado é essencial que se garanta que o sistema estrutural se encontre dimensionado de modo a permitir desenvolver esses mecanismos resistentes (4).

2.2.2. Definição da ação sísmica

Os sismos, usualmente, são originados por movimentos de rotura de uma falha ativa na litosfera. Este movimento súbito produz uma série de ondas elásticas que se propagam nas camadas superiores do globo terrestre. Quando estas ondas atingem as fundações das estruturas, sujeitam-nas a um movimento oscilatório, que pode ser, mais ou menos violento e com aceleração variável no tempo e com uma duração relativamente curta (5). Considerando a Teoria das Placas Tectónicas, a crosta terrestre está dividida em placas que se tendem a mover-se, originando deste modo tensões de contacto entre elas. Considerando o movimento relativo entre as placas tectónicas, definiram-se três tipos de limites ou fronteiras entre placas tectónicas:

- Limite destrutivo ou convergente – zonas em que as fronteiras tectónicas têm um movimento relativo de convergência, dando origem a zonas de subducção que são particularmente propensas à ocorrência de sismos fortes, como é o caso do “Anel de Fogo do Pacífico”:
- Limite conservativo ou transformante – nestas zonas as placas deslocam-se paralelamente uma em relação à outra, ou seja, têm um deslocamento relativo horizontal entre elas, originando sismos relativamente fortes devido principalmente às tensões de corte originadas pelo atrito entre as placas. Um exemplo deste tipo de limite é a “Falha de Santo André na Califórnia, Estados Unidos.
- Limite divergente ou construtivo – onde as placas tendem a afastarem-se uma da outra originando o aparecimento de nova crosta. Nestas zonas aparecem os “rifts” e estão associadas à atividade vulcânica.

A localização de cada país nas placas tectónicas, define o tipo de sismo que esse país ou região está exposto.

Em termos da regulamentação considerada para lidar com esta questão, uma das formas de traduzir a ação sísmica é através de espetros de resposta elástica de aceleração à superfície do terreno, representando tanto a componente horizontal como a vertical do movimento do solo, sendo esta a forma preconizada no EC8.

No âmbito do EC8, e salvo indicação em contrário pelo Anexo Nacional do país, devem ser considerados dois tipos de ação sísmica: Tipo 1, resultante de um sismo com epicentro em uma zona oceânica distante da estrutura; e Tipo 2, resultante de um sismo com epicentro em uma zona continental mais próxima da estrutura.

A dimensão de um sismo pode ser dada pela sua magnitude, sendo esta uma medida quantitativa ligada ao momento sísmico de um evento (a função da área do terremoto, a distância média do deslizamento da falha e uma constante determinada pelo tipo de rocha local) em oposição às amplitudes das ondas sísmicas de um sismógrafo. Este método de classificação de terremotos foi desenvolvido na década de 1970 por Hiroo Kanamori e Thomas C. Hanks, e mede de forma confiável os maiores terremotos com uma magnitude superior a oito.

Em todo o mundo, os sismos são medidos por uma série de sismógrafos, que fazem parte da Rede Sismográfica Global. Os cientistas usam três sismógrafos para registar um evento. Esta é uma técnica denominada de triangulação; mede mais precisamente o epicentro de um sismo. Na Figura 1, apresenta-se o mapa de distribuição de risco sísmico no Mundo.

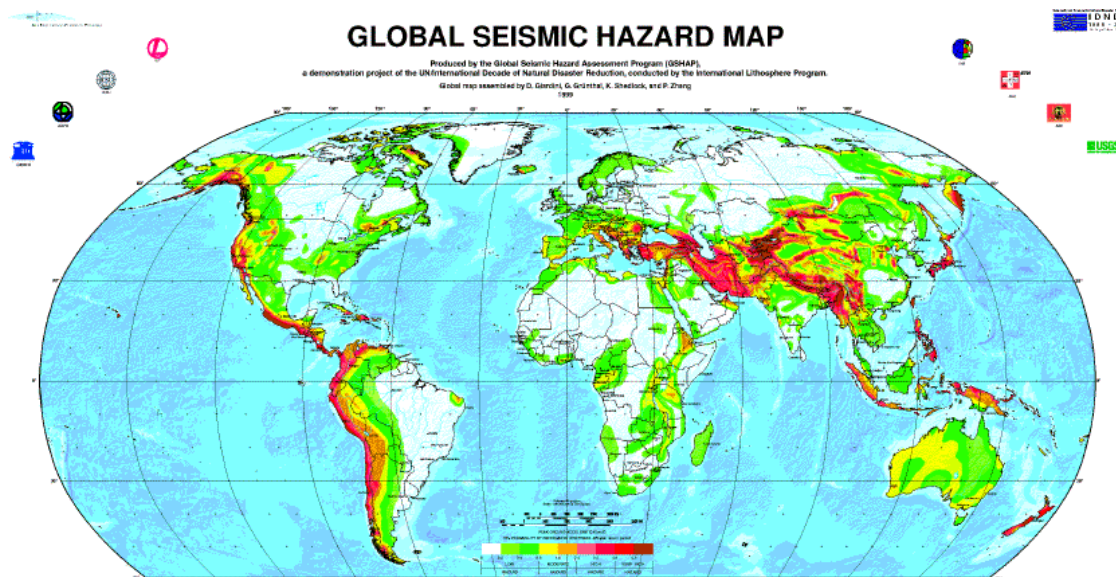


Figura 1 - Mapa de distribuição de risco sísmico no Mundo (6).

Relativamente a Portugal, o Anexo Nacional do EC8 prevê o zonamento sísmico de Portugal para um duplo cenário de ação sísmica. No caso do sismo afastado (sismo Tipo 1) estão previstas 5 zonas distintas, enquanto no caso do sismo próximo (Tipo 2) estão definidas apenas 3 zonas, como se pode verificar na Figura 2 para o caso de Portugal Continental

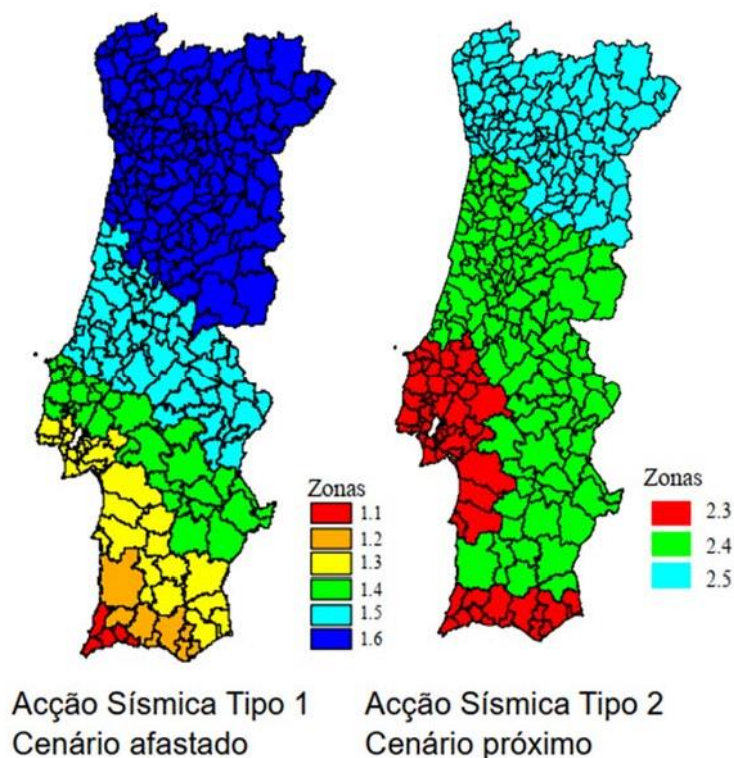


Figura 2 - Zonamento sísmico da NP EN 1998. (7)

O anexo nacional define ainda quais são os valores da aceleração máxima de referência a_{gR} a considerar para as diferentes zonas, Quadro 1.

Quadro 1 - Aceleração máxima de referência (a_{gR})

Ação Sísmica Tipo 1		Ação Sísmica Tipo 2	
(Magnitude elevada > 5,5)		(Magnitude moderada < 5,5)	
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	-	-

Um dos fatores com maior relevância na definição da ação sísmica regulamentar, considerando o prescrito no EC8, é o tipo de terreno onde se situa a estrutura. No EC8 estão previstos sete tipos de terreno que devem ser avaliados antes de se iniciar o projeto de estruturas. Para cada tipo de terreno é definida uma descrição do perfil estratigráfico

e os valores a serem considerados para a velocidade média das ondas de corte, $v_{s,30}$, e de N_{SPT} , Quadro 2.

Quadro 2 - Tipos de terreno considerados no EC8 (3)

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 compacta 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			

De acordo com o EC8, o movimento sísmico num dado ponto da superfície do terreno é representado através de um espectro de resposta elástica da aceleração à superfície do terreno indicado como “espectro de resposta elástica”. Sendo possível definir as componentes horizontal e vertical da ação sísmica através da sua representação gráfica, Figura 3.

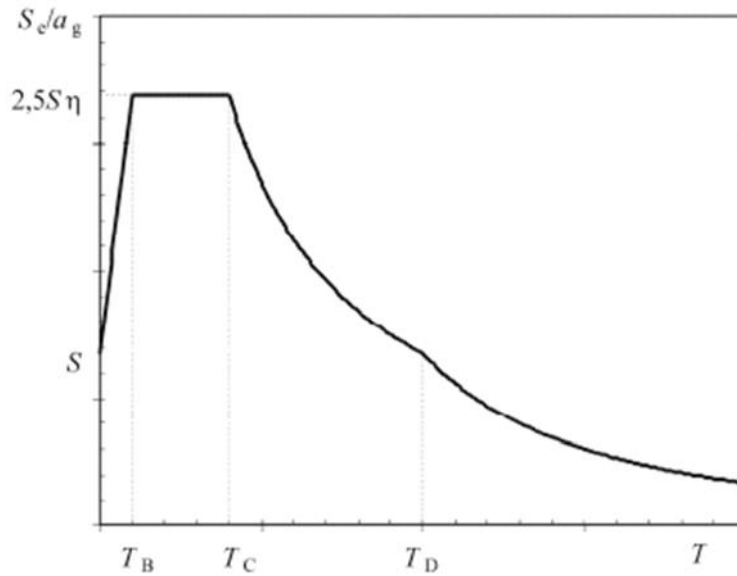


Figura 3 - Forma do espectro de resposta elástica

O espectro de resposta elástico horizontal é definido pelas seguintes equações:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g * S * \left[1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 2.5 - 1) \right] \quad (1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 \quad (2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 * \frac{T_C}{T} \quad (3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g * S * \eta * 2.5 * \frac{T_C * T_D}{T^2} \quad (4)$$

Sendo que:

- $S_e(T)$ - Aceleração espectral;
- a_g - Aceleração de pico em rocha;
- S - Fator do solo;
- T - Período de vibração do sistema;
- T_B - Limite inferior do trecho de aceleração constante;
- T_C - Limite superior do trecho de aceleração constante;
- T_D - Valor do período que define o início do trecho de deslocamento constante;
- η - Fator de correção para o amortecimento.

O espectro de resposta elástica $S_e(T)$, para as componentes horizontais, possui definido um coeficiente de amortecimento igual a 5%.

Já o espectro de resposta elástico vertical é definido pelas seguintes equações:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} * \left[1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 3.0 - 1) \right] \quad (5)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} * \eta * 3.0 \quad (6)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T} \right] \quad (7)$$

$$T_D \leq T \leq 4sT_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (8)$$

Sendo que:

- $S_{ve}(T)$ – Aceleração espectral;
- a_{vg} – Aceleração de pico em rocha;
- T – Período de vibração do sistema;
- T_B – Limite inferior do trecho de aceleração constante;
- T_C – Limite superior do trecho de aceleração constante;
- T_D – Valor do período que define o início do trecho de deslocamento constante;
- η – Fator de correção para o amortecimento.

2.2.3. Considerações sobre o comportamento dissipativo – Coeficiente de comportamento

O coeficiente de comportamento q , é um parâmetro utilizado em engenharia estrutural para descrever a capacidade de uma estrutura de resistir a cargas sísmicas e dissipar energia durante um sismo, e reflete a capacidade relativa de uma estrutura de permanecer estável e de absorver energia sem sofrer danos catastróficos.

A correlação entre a resistência estrutural e a capacidade de dissipação de energia é expressa pelo coeficiente de comportamento q , cuja determinação é influenciada pela classe de ductilidade adotada.

O EC 8 expõe que uma estrutura que tem capacidade de resistir as ações sísmicas em regime não linear, pode ser dimensionada para uma força sísmica inferior do que às que corresponderiam a uma resposta elástica linear, sendo denominada como uma estrutura dúctil, esta ductilidade é incluída através do coeficiente de comportamento (q), e este fator depende exclusivamente da capacidade de dissipação de energia e da classe de ductilidade da estrutura.

O coeficiente de comportamento q , é uma aproximação da razão entre as forças sísmicas a que a estrutura ficaria sujeita se a sua resposta fosse completamente elástica, com 5% de amortecimento viscoso, e as forças sísmicas que poderão ser adotadas no projeto, com

um modelo convencional, que continuem a assegurar uma resposta satisfatória da estrutura.

O valor do coeficiente de comportamento está diretamente ligado a ductilidade da estrutura, dado que, quanto maior a ductilidade da estrutura, maior será o valor deste. A regulamentação europeia prevê que poderá ser adotado um valor de $q = 1,5$ e $2,0$ para estruturas de betão e de aço respetivamente. No caso da ação sísmica horizontal em estruturas regulares em altura, o coeficiente de comportamento q é obtido pela seguinte expressão:

$$q = q_o * k_w \geq 1,5 \quad (9)$$

Sendo:

q_o - Valor básico do coeficiente de comportamento, dependendo do tipo de sistema estrutural e da regularidade em altura;

k_w - Fator que reflete o modo de rotura no caso de sistemas estruturais com paredes. Este coeficiente varia entre 0,5 (paredes muito compactas) e 1 (sistemas mistos pórtico-parede).

Existe pré-estabelecido mediante as variedades das classes de ductilidade, e aos princípios de projeto para estruturas dissipativas ou estrutura não dissipativas um intervalo de valores de referência do coeficiente de comportamento q , como demonstra o quadro seguinte.

Consoante as classes de ductilidade e aos princípios de projeto relativo ao comportamento estrutural, estruturas dissipativas ou estrutura não dissipativas, o EC8 apresenta intervalos de valores de referência para o coeficiente de comportamento q , Quadro 3.

Quadro 3 - Coeficiente de comportamento previstos no EC8

Princípio de projeto	Classe de ductilidade estrutural	Intervalos de valores de referência para o coeficiente de comportamento q
Princípio (a): Comportamento estrutural de baixa dissipação	DCL (Baixa)	$\leq 1,5 - 2$
Princípio (b): Comportamento estrutural dissipativo	DCM (Média) DCH (Alta)	≤ 4

Outro fator a ter em consideração na definição do valor do coeficiente de comportamento é o tipo de estrutura, conforme delineado no quadro subsequente.

Quadro 4 - Coeficiente de comportamento para estruturas regulares em altura

Tipo de estrutura	Classe de ductilidade	
	DCM	DCH
(a) – Pórtico Simples	4	5 a_u/a_1
(b) – Pórticos com contraventamento centrados		
Contraventamentos diagonais	4	4
Contraventamento em V	2	2,5
(c) – Pórtico com contraventamentos excêntricos	4	5 a_u/a_1
(d) – Pêndulo invertido	2	2 a_u/a_1
(e) – Estruturas com núcleos ou paredes de betão	Ver a seção 5 do EC8	
(f) – Pórtico simples com contraventamento centrado	4	4 a_u/a_1
(g) – Pórtico simples com preenchimentos		
Enchimentos de betão ou de alvenaria não ligados, em contato com o pórtico	2	2
Enchimento de betão armado ligados	Ver seção 7 do EC8	
Enchimentos isolados de pórticos simples (ver pórticos simples)	4	5 a_u/a_1

Sendo:

a_1 — Valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para se atingir pela primeira vez a resistência plástica em qualquer elemento da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras Ações de cálculo;

a_u — Valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para se formarem rótulas plásticas num número suficiente de secções para que se desenvolva a instabilidade global da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras ações de cálculo.

Refira-se que o espectro de cálculo é um espectro de resposta elástica reduzido pelo coeficiente de comportamento e que deve ser usado unicamente quando o edifício for avaliado através da abordagem deste coeficiente. Na Figura 4 apresentam-se os espectros de resposta elástico e de cálculo para diferentes coeficientes de comportamento.

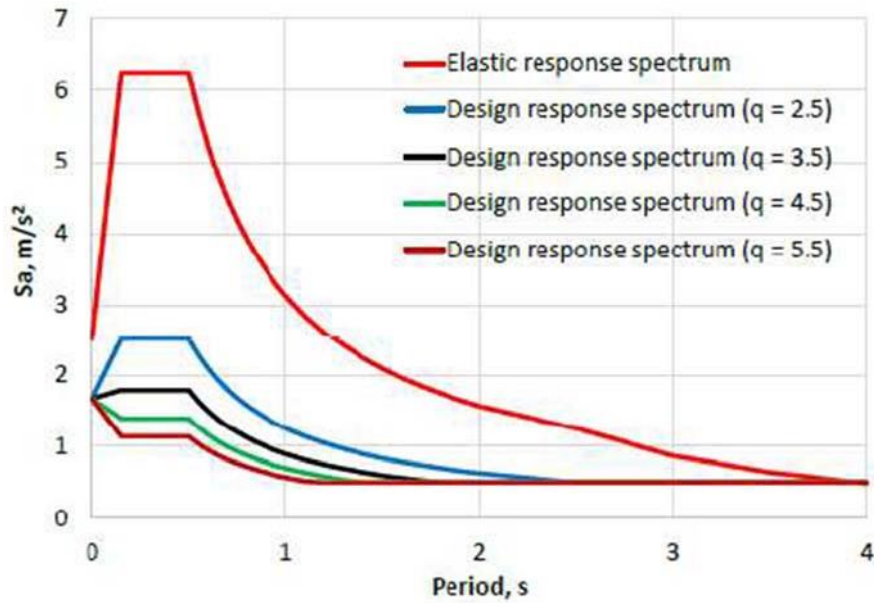


Figura 4 - Representação do espectro de resposta elástico e de cálculo com diferentes coeficientes de comportamento (8).

Como se pode verificar o espectro de resposta de cálculo depende do coeficiente de comportamento, ou seja, é definido em função do nível de ductilidade considerado para a estrutura em causa.

2.2.4. Regras específicas para estruturas metálicas

As estruturas metálicas são projetadas com base na norma NP EN 1993 (Eurocódigo 3, EC3), no entanto, no EC8 são apresentadas regras complementares e específicas para o caso de projetos de estruturas metálicas em zonas sísmicas. Nestes casos o projeto baseia-se em dois princípios básicos:

- o comportamento estrutural de baixa dissipação que representa uma classe de ductilidade estrutural baixa, DCL, estando o valor do coeficiente de comportamento q dentro do intervalo $1,5 - 2$;
- o comportamento estrutural dissipativo que se divide entre a classe de ductilidade estrutural média e alta, DCM e DCH respetivamente, sendo que no caso da classe DCM são considerados valores para o coeficiente de comportamento $q \leq 4$ e para o caso de DCH este valor é unicamente limitado pelos valores representados no Quadro 4.

No projeto de estruturas metálicas, o conceito de "capacity design" é fundamental. Esse conceito estabelece uma ordem hierárquica de plastificação estrutural, permitindo a formação de rótula plásticas em seções que não comprometam o desempenho da estrutura. Este conceito está intrinsecamente ligado à capacidade de dissipação de

energia das estruturas e é obrigatório pelos regulamentos como uma regra essencial para o desempenho sísmico eficaz, especialmente em estruturas sujeitas a solicitações que induzem deformações plásticas. Em termos simplificados, para garantir um desempenho adequado da estrutura durante um sismo, é crucial que ocorra a formação de um mecanismo de falha estável, acompanhado por um comportamento hysterético apropriado no estado limite último, ELU (9).

2.2.4.1. Tipos de estruturas

Os edifícios com estrutura em aço devem ser categorizados com base no comportamento de sua estrutura sismo-resistente primária diante das ações sísmicas. O EC8 fornece orientações específicas para o projeto sísmico de cada tipo de estrutura, levando em conta suas características geométricas, função e resposta dinâmica às ações sísmicas, seguidamente destacam-se os tipos estruturais considerados no EC8:

- Pórticos simples: estruturas nas quais a resistência às forças horizontais é principalmente assegurada por elementos predominantemente em flexão, Figura 6.

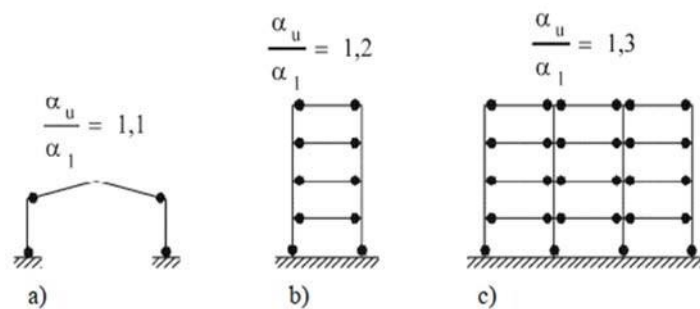


Figura 6 - Pórticos simples

- Pórticos com contraventamento centrado: estruturas nas quais a resistência às forças horizontais é principalmente assegurada por elementos sujeitos a esforços normais centrados, Figura 7, ou em V centrados, Figura 10.

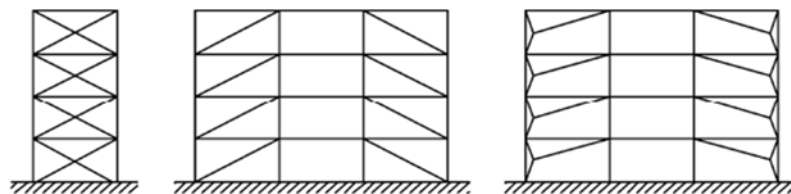


Figura 7 - Pórtico com contraventamentos diagonais centrados

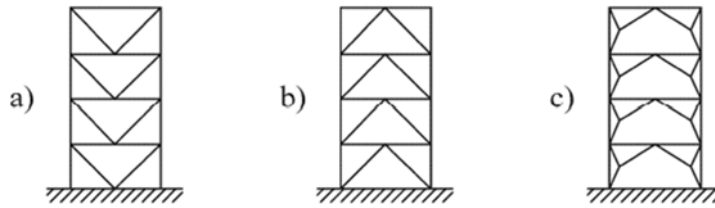


Figura 10 - Pórtico com contraventamento em V centrados

- Pórticos com contraventamento excêntrico: estruturas nas quais a resistência às forças horizontais é principalmente assegurada por elementos sujeitos a cargas axiais, mas em que a excentricidade do sistema é tal que a energia pode ser dissipada nos ligadores sísmicos por flexão ou por corte cíclico, Figura 11.

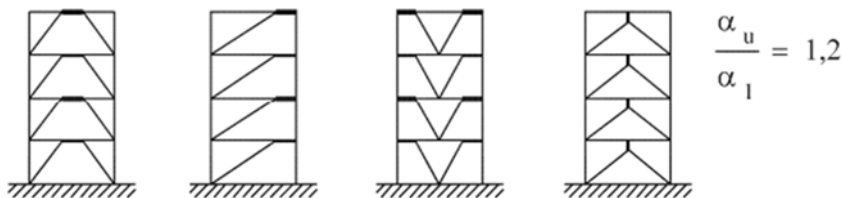


Figura 11 - Pórticos com contraventamentos excêntricos

- Estruturas em pêndulo invertido: estruturas nas quais as zonas dissipativas se localizam na base das colunas, Figura 14.

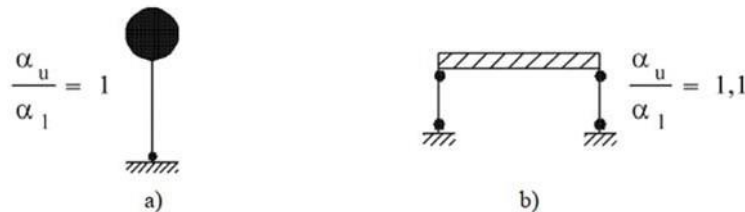


Figura 14 - Pêndulo Invertido

- Estruturas com núcleos de betão ou paredes de betão: estruturas nas quais a resistência às forças horizontais é principalmente assegurada por esses núcleos ou paredes, Figura 16.

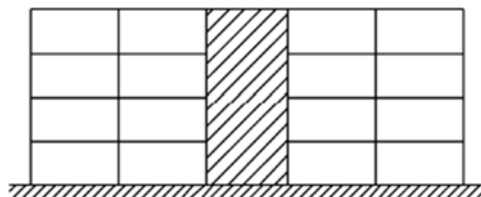


Figura 16 - Estruturas com núcleos ou paredes de betão

- Pórticos simples combinados com contraventamentos centrados, Figura 18.

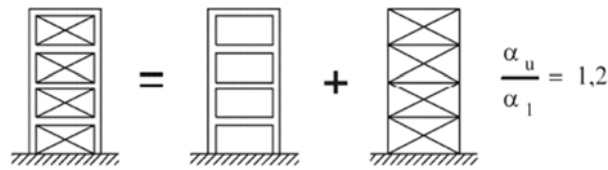


Figura 18 - Pórtico simples associado a contraventamento centrado

- Pórticos simples combinados com enchimentos, Figura 20.

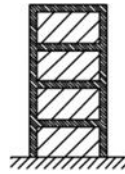


Figura 20 - Pórtico simples associado a enchimentos

A definição correta dos tipos estruturais ajuda a garantir a segurança e estabilidade das estruturas durante e após um sismo. O conhecimento sobre como cada tipo de estrutura responde a cargas sísmicas, é fundamental para que o projeto estrutural contemple as medidas e especificações adequadas para minimizar danos e garantir a integridade estrutural e por consequência garantir a proteção das vidas humanas e dos bens materiais.

2.2.4.2. Pórticos Simples

Os pórticos simples são caracterizados por um grande número de zonas dissipativas, as de ligações na extremidade dos elementos. Nesta tipologia, o tipo de esforço mais condicionante é o momento fletor, desta forma, a energia de dissipação, localizada nas extremidades dos elementos metálicos, surge devido ao comportamento inelástico cíclico do momento fletor (10).

A regulamentação europeia EC8 especifica que nos pórticos simples, as zonas dissipativas deverão localizar-se principalmente nas rótulas plásticas das vigas ou das ligações viga-coluna para que a energia seja dissipada por flexão cíclica. As zonas dissipativas poderão, ainda, estar também localizadas nas colunas, na base do pórtico, no topo das colunas do piso superior dos edifícios com vários pisos, no topo e na base das colunas dos edifícios de um só piso nos quais deverão satisfazer a condição de que o

valor de cálculo do esforço normal (N_{ed}) nas colunas seja equivalente a $\frac{N_{ed}}{N_{pl,Rd}} < 0,3$, onde $N_{pl,Rd}$ é a resistência de cálculo de acordo com a EN 1993.

A fim de assegurar a formação inicial de rótulas plásticas ou zonas de plasticidade nas vigas, denominados como elementos dissipativos primários, ou nas ligações entre as vigas e os pilares, é fundamental aplicar o princípio do "pilar forte/viga fraca". Isso é crucial para prevenir grandes deformações no sistema estrutural e minimizar a ocorrência de efeitos de segunda ordem. Adotar o princípio oposto, "viga forte/pilar fraco", poderia resultar em deformações excessivas no sistema, aumentando o risco de falhas estruturais e comprometendo a estabilidade global da estrutura (11).

As regras de cálculo e construtivas a serem ponderadas ao se executar um projeto de uma estrutura com tipologia "pórticos simples", consiste resumidamente em definições de cálculo para as vigas, colunas e ligações viga-coluna. De modo a verificar que o momento plástico total e a capacidade de rotação nas rótulas plásticas nas vigas não são reduzidos pelas forças de compressão e de corte, através das seguintes equações:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15 \quad (11)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5 \quad (12)$$

Sendo:

$V_{Ed} = V_{Ed,G} + V_{Ed,M}N_{Ed}$ – Valor de cálculo do esforço normal;

M_{Ed} – Valor de cálculo do momento fletor;

V_{Ed} – Valor de cálculo do esforço transversal;

$N_{pl,Rd}, M_{pl,Rd}, V_{pl,Rd}$ – Resistências de cálculo de acordo com a EN 1993;

$V_{Ed} = V_{Ed,G} + V_{Ed,M}$;

$V_{Ed,G}$ – Valor de cálculo do esforço transversal devido às ações não sísmicas;

$V_{Ed,M}$ – Valor de cálculo do esforço transversal devido à aplicação dos momentos plásticos $M_{pl,Rd,A}$ e $M_{pl,Rd,B}$ com sinais opostos nas secções de extremidade A e B da viga.

No dimensionamento de pilares de estruturas metálicas em zonas sísmicas, de acordo com o Eurocódigo 8, é crucial verificar a capacidade de carga à compressão, considerando a combinação mais desfavorável do esforço normal e dos momentos

fletores. Isso significa que devem ser consideradas todas as possíveis combinações de cargas que resultem no maior esforço de compressão no pilar, incluindo os efeitos dos momentos fletores que podem ser induzidos pela ação sísmica. Esta abordagem garante que o pilar seja dimensionado de forma apropriada para suportar todas as cargas atuantes durante um evento sísmico, e deve ser considerada as seguintes equações:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1\gamma_{0V}\Omega N_{Ed,E} \quad (13)$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1\gamma_{0V}\Omega M_{Ed,E} \quad (14)$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1,1\gamma_{0V}\Omega V_{Ed,E} \quad (15)$$

Sendo:

$N_{Ed,G}$ ($M_{Ed,G}$, $V_{Ed,G}$) – Esforço de compressão (respetivamente, momento fletor e esforço transversal) na coluna devido às ações não sísmicas incluídas na combinação de ações para a situação de projeto sísmica;

$N_{Ed,E}$ ($M_{Ed,E}$, $V_{Ed,E}$) – Esforço de compressão (respetivamente, momento fletor e esforço transversal) na coluna devido à ação sísmica de cálculo;

γ_{0V} – Coeficiente de sobrerresistência;

f_i – Valor mínimo de $f_i = M_{pl,Rd,i}/M_{Ed,i}$ de todas as vigas nas quais se situam zonas dissipativas; $M_{Ed,i}$ é o valor de cálculo do momento fletor na viga i na situação de projeto sísmico e $M_{pl,Rd,i}/M_{Ed,i}$ é o momento plástico correspondente.

De acordo com o EC8 se a estrutura for dimensionada para dissipar energia nas vigas, as ligações das vigas aos pilares deverão ser calculadas para o nível exigido de sobrerresistência, considerando o momento resistente $M_{pl,Rd}$ e o esforço transversal ($V_{Ed,G} + V_{Ed,M}$).

Sendo:

$M_{pl,Rd}$ - É o momento resistente plástico, que representa a capacidade da ligação em transmitir momentos plásticos das vigas para as colunas.

$V_{Ed,G} + V_{Ed,M}$ - São os esforços cortantes nas ligações devido às cargas gravitacionais e às cargas induzidas por momentos fletores, respetivamente.

Ao calcular as ligações das vigas aos pilares, é essencial garantir que elas sejam capazes de suportar estes esforços de maneira segura, levando em consideração não apenas a resistência estática, mas também a capacidade de dissipar energia durante um evento sísmico. Isso contribui para a integridade estrutural e a segurança global da edificação, conforme exigido pelo EC8.

2.2.4.3. Pórticos com contraventamento centrado

As estruturas metálicas de pórticos com contraventamento centrado demonstram uma eficácia notável em termos de comportamento sísmico. Esses sistemas estruturais se destacam pela sua considerável rigidez lateral e pela capacidade de suportar amplas deformações inelásticas quando submetidos à ação de sismos. O comportamento desejado para esse tipo de sistema é caracterizado pela plastificação dos contraventamentos devido ao esforço axial, minimizando a ocorrência de plastificação em vigas, pilares e ligações. Esse objetivo é alcançado por meio da aplicação de técnicas de design de capacidade, que asseguram que áreas críticas da estrutura sejam dimensionadas para absorver e/ou dissipar eficazmente as cargas sísmicas, reduzindo assim os riscos de falhas estruturais durante eventos sísmicos (12).

É estabelecido no EC8 que os pórticos com contraventamento centrado devem ser dimensionados de modo que as diagonais sejam os elementos responsáveis pela dissipação de energia. Recomenda-se que esses elementos sejam distribuídos simetricamente para garantir que a estrutura mantenha uma capacidade resistente uniforme, mesmo quando os esforços sísmicos mudam de direção.

De acordo com as disposições regulamentares, a estrutura deve demonstrar, durante inversões de forças, uma coerência nas relações entre carga e deslocamento em cada andar e em ambos os sentidos opostos da direção de contraventamento. Essa exigência é formalizada por meio da equação:

$$\frac{|A^+ - A^-|}{A^+ + A^-} \leq 0,05 \quad (16)$$

Sendo:

$A^+ - A^-$ - Áreas das projeções horizontais das secções transversais das diagonais em tração, quando as ações sísmicas horizontais têm, respetivamente, um sentido positivo e negativo.

A estrutura ao ser sujeita a forças gravíticas é forçada a reagir, sendo somente as vigas e colunas responsáveis por resistirem a este tipo de carga. No entanto, os elementos de contraventamento também devem aderir a um conjunto de diretrizes, incluindo limitações de esbeltez normalizadas e verificação do esforço axial nesses elementos. Além disso, para garantir que a estrutura seja homogeneamente dissipativa nas diagonais, o Eurocódigo 8 exige que a sobrerresistência máxima de todos os elementos de contraventamento seja igual ou inferior a 125% da sobrerresistência mínima. Já ao que

diz respeito as vigas e colunas sujeitas a esforços normais devem obrigatoriamente estar de acordo com as condições de resistência mínima:

$$N_{pl,Rd}(M_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov} \Omega N_{Ed,E} \quad (17)$$

Sendo:

$N_{pl,Rd}(M_{Ed})$ – Valor de cálculo da resistência á encurvadura da viga ou da coluna de acordo com a EN 1993, tendo em conta a interação da resistência á encurvadura com o momento fletor M_{Ed} definido pelo seu valor de cálculo na situação de projeto.

$N_{Ed,G}$ – Esforço normal na viga ou na coluna devido às ações não sísmicas incluídas na combinação de ações para a situação de projeto.

$N_{Ed,E}$ – Esforço normal na viga ou na coluna devido á ação sísmica de cálculo.

γ_{ov} – Coeficiente de sobrerresistencia.

Ω – Valor mínimo de $\Omega_i = N_{pl,Rd,i}/N_{Ed,i}$ em todas as diagonais do sistema de contraventamento, em que $N_{pl,Rd,i}$ é resistência de cálculo da diagonal i .

Os pórticos com contraventamentos centrados representam uma tipologia estrutural amplamente utilizada em estruturas de aço para resistir a forças laterais devidas a ventos e sismos, graças à ação da treliça que caracteriza a resposta estrutural. Este sistema é um dos sistemas de resistência a cargas laterais mais eficientes e comumente usados, especialmente em estruturas localizadas em regiões de alta atividade sísmica (ou zonas de tendência sísmica moderada a alta) (13).

2.2.4.4. Pórticos com contraventamento excêntrico

Pórticos com contraventamento excêntrico são estruturas onde os elementos de contraventamento não estão localizados centralmente ao longo do comprimento do pórtico, mas sim deslocados em relação ao eixo da estrutura. Esses elementos são dimensionados para resistir às forças horizontais induzidas por eventos sísmicos, fornecendo um caminho de carga eficaz e limitando a deformação excessiva da estrutura. A disposição excêntrica dos elementos de contraventamento pode ser adotada por razões de layout do edifício, restrições de espaço ou outras considerações de projeto. No entanto, o projeto desses pórticos geralmente requer uma análise mais detalhada para garantir que a distribuição de carga e a resistência sísmica sejam adequadas em toda a estrutura.

A ideia base por trás do sistema de contraventamento excêntrico é fornecer um mecanismo de escoamento por flexão que permita maior deformação e dissipação de energia na faixa não linear (14).

Os pórticos com contraventamento excêntrico devem ser dimensionados de forma a permitir que os elementos definidos como ligadores sísmicos possam dissipar a energia através da formação de mecanismos plásticos de flexão e/ou corte. O sistema estrutural deve ser configurado para assegurar uma dissipação de energia homogênea em todos os ligadores sísmicos.

No Eurocódigo 8, encontra-se pormenorizado o conceito dos elementos que contém ligadores sísmicos e dos elementos que não contém ligadores sísmicos. Ao se tratar dos elementos que contém ligadores sísmicos é ressaltado que a alma de um ligador deverá ter uma espessura única, sem reforço e sem penetrações, estes ligadores são designados de acordo com o mecanismo plástico desenvolvido, que são:

- Ligadores curtos – Responsáveis por realizar a dissipação da energia através da plastificação por corte, e devem ser ponderados entre duas situações em que o seu comportamento e define sua categoria. Em casos onde nas extremidades dos ligadores é formado momentos iguais ao mesmo tempo a equação a ser considerada é $e < e_1 = 1,6 M_{p,link}/V_{p,link}$, entretanto quando na extremidade do ligador se formar apenas uma única rotula plástica a equação a ser considerada passa a ser $e < e_s = 0,8 (1 + a) M_{p,link}/V_{p,link}$.
- Ligadores longos – Responsáveis por realizar a dissipação da energia através da plastificação por flexão, e devem ser ponderados entre duas situações em que seu comportamento e define sua categoria. Em casos onde nas extremidades dos ligadores é formado momentos iguais ao mesmo tempo a equação a ser considerada é $e < e_L = 3,0 M_{p,link}/V_{p,link}$, entretanto quando na extremidade do ligador se formar apenas uma única rotula plástica a equação a ser considerada passa a ser $e < e_L = 1,5 (1 + a) M_{p,link}/V_{p,link}$.
- Ligadores Médios – Responsáveis pela ação em que o mecanismo envolve a flexão e o corte, e devem ser ponderados entre duas situações em que seu comportamento e define sua categoria. Em casos onde nas extremidades dos ligadores é formado momentos iguais ao mesmo tempo a equação a ser considerada é $e_s < e < e_L$ entretanto quando na extremidade do ligador se formar apenas uma única rotula plástica a equação a ser considerada passa a ser $e_s < e < e_L$.

Contudo, para as secções em I, os valores das resistências de cálculo e os milites das categorias é definido através de:

$$M_{p,link} = f_y b t_f (d - t_f) \quad (18)$$

$$V_{p,link} = \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right) t_w (d - t_f) \quad (19)$$

Um fator relevante no projeto de pórticos com contraventamento excêntrico é a avaliação dos elementos desprovidos de ligadores sísmicos, como os pilares e os elementos diagonais, no caso de uso de ligadores horizontais nas vigas, assim como os elementos das vigas quando ligadores verticais são empregados. Esses elementos devem ser analisados quanto à compressão, levando em conta a combinação mais desfavorável do esforço normal e dos momentos fletores, com base na utilização da seguinte equação:

$$N_{Rd}(M_{Ed}, V_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1,1 \gamma_{ov} \Omega N_{Ed,E} \quad (20)$$

Sendo:

$N_{Rd}(M_{Ed}, V_{Ed})$ – O valor de cálculo da resistência em relação ao esforço normal do pilar ou do elemento diagonal de acordo com a EN 1993, tendo em conta a interação com o momento fletor M_{Ed} e com o esforço transversal V_{Ed} considerados com o seu valor de cálculo na situação sísmica.

$N_{Ed,G}$ – Força de compressão no pilar ou no elemento diagonal devida às ações não sísmicas incluídas na combinação de ações para a situação de projeto sísmica.

$N_{Ed,E}$ – Força de compressão no pilar ou no elemento diagonal devido à ação sísmica de cálculo.

γ_{ov} – Coeficiente de sobrerresistência.

Ω – Coeficiente multiplicador.

Outro elemento de extrema importância a ser considerado é a ligação dos ligadores sísmicos, definidos pelo facto de que caso a estrutura seja projetada para dissipar energia nos ligadores sísmicos, as ligações dos ligadores ou do elemento que contém os ligadores deverão ser calculadas para esforços E_d conforme determinado:

$$E_d \geq E_{d,G} + 1,1 \gamma_{ov} \Omega_1 E_{d,E} \quad (21)$$

Sendo:

$E_{d,G}$ – Efeito da ação na ligação devido às ações não sísmicas incluídas na combinação de ações para a situação de projeto.

$E_{d,E}$ – Efeito na ligação devido à ação sísmica de cálculo.

γ_{ov} – Coeficiente de sobrerresistência.

Ω – Coeficiente de sobrerresistência calculado para o ligador.

2.3. Conclusão

O Eurocódigo 8 estabelece padrões abrangentes e rigorosos para o projeto de estruturas em zonas sísmicas, visando garantir a segurança das edificações e a proteção das vidas humanas em caso de sismos. Ao fornecer diretrizes detalhadas para análise, dimensionamento e pormenorização de estruturas, o Eurocódigo 8 promove uma abordagem holística para a engenharia sísmica, abordando aspectos como a resistência, a ductilidade e a dissipação de energia. Com ênfase na capacidade de resposta sísmica e na redução dos riscos de colapso estrutural, deste modo, o Eurocódigo 8 desempenha um papel fundamental na promoção da resiliência das construções frente a eventos sísmicos, contribuindo assim para a segurança e o bem-estar das comunidades.

Capítulo 3

3. Análise do comportamento sísmico

3.1. Introdução

Para realizar uma análise de comportamento sísmico eficaz é necessário a definição de diversos parâmetros e considerações técnicas, como a elaboração de modelos computacionais que representem, de forma realista, as características físicas do solo, a geometria da estrutura e a distribuição de massas. Para que, deste modo, possa ser efetuada uma simulação, o mais realista possível, do comportamento da estrutura, assim como a sua reação face às diferentes ações.

No presente Capítulo apresenta-se uma análise prática do comportamento de uma estrutura quando sujeita a ações sísmicas. Para a elaboração e comparação da análise anteriormente referida, neste Capítulo, utilizou-se a seguinte metodologia:

- i. Inicialmente definiu-se o caso de estudo base e efetuou-se o seu dimensionamento considerando unicamente a ação de ações gravíticas.
- ii. Seguidamente, e tendo como ponto de partida o caso de estudo base, foram aplicadas as ações horizontais referentes à ação sísmica. Com o intuito de dotar o caso de estudo base da resistência necessária para a nova ação horizontal, ação sísmica, foram considerados 4 tipologias de pórtico resistente: simples, contraventado em X, contraventado em diagonal, contraventado em V.
- iii. Para cada um dos casos de estudo foi analisado o seu comportamento, quer em termos de esforços como de deformação. Foi igualmente analisado o consumo de material em cada um dos casos de estudo de modo a poder-se retirar ilações sobre a viabilidade económica de cada um dos sistemas considerados

De modo a tornar o processo de cálculo e dimensionamento dos diversos casos de estudo analisados mais eficiente recorreu-se à utilização do software de cálculo estrutural TRICALC. Este software permite, além de efetuar análises estáticas de 1ª ordem, efetuar análises dinâmicas e de 2ª ordem do problema considerando a atuação da ação sísmica. Na definição da ação sísmica foram considerados os pressupostos emanados pelo Eurocódigo 8 para o caso português.

3.2. Definição do caso de estudo

O modelo base selecionado para o estudo consiste em uma estrutura metálica de 648 m² de dimensões 24x36m com 4 andares sendo o pé direito do primeiro piso de 4 m e os demais de 3 m totalizando uma altura de 13 m, a estrutura dimensionada possui 6 pórticos espaçados de 6 m na lateral e 5 pórticos espaçados também de 6 m na fachada, conforme a Figura 21.

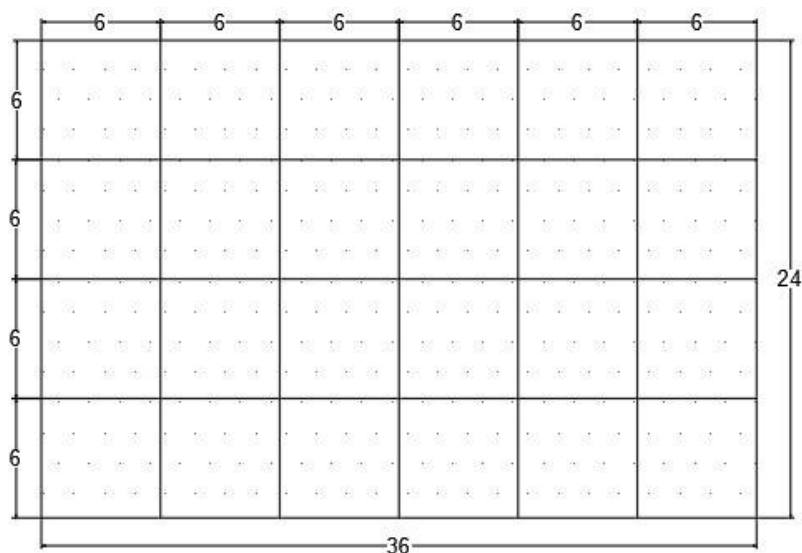


Figura 21 - Planta dos pisos do edifício

A estrutura constituída inicialmente por sapatas isoladas ligadas por vigas de equilíbrio comumente denominado como lintéis de fundação, a ligação entre estes pórticos e feita por um sistema de vigas secundárias, suportando uma laje maciça de 15 cm.

3.2.1. Dimensionamento para ações verticais

Uma das etapas mais importantes no cálculo de uma estrutura é a correta distribuição das ações verticais. Para as ações verticais foram consideradas como cargas permanentes o peso próprio dos elementos estruturais e não estruturais, como revestimentos, paredes divisórias, etc. e cargas variáveis como a sobrecarga devido à utilização, sendo no presente caso escritórios.

A Figura 22 apresentam-se destacado a vermelho e a azul os pórticos considerados como resistentes para o caso das ações horizontais, ação sísmica. Para os propósitos deste trabalho, analisar e comparar sistemas resistentes a ações sísmicas, somente se considerou a ação sísmica segundo a direção XX, pórticos destacados a vermelho, devido que as conclusões seriam sensivelmente as mesmas se analisássemos a direção YY.

Devido à simetria e regularidade da estrutura considerada não se prevê influencia significativa de modos de vibração de torção.

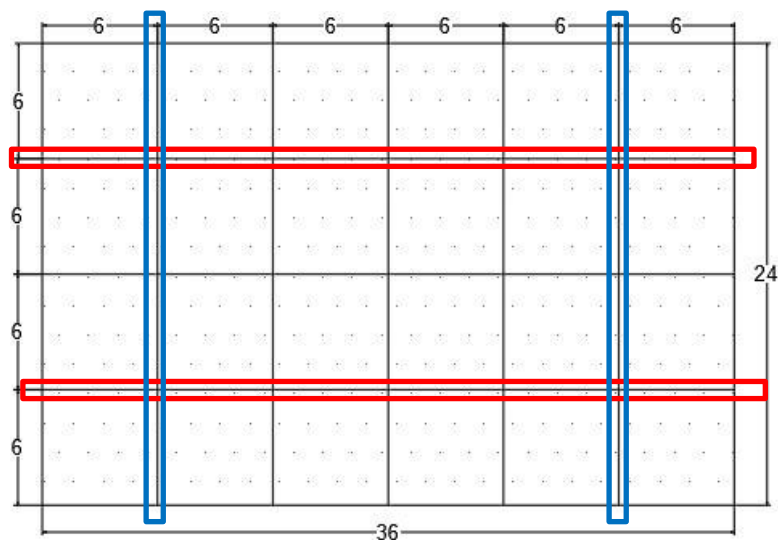


Figura 22 - Planta do edifício / Definição dos pórticos estudados

Os valores considerados para as ações verticais são apresentados no Quadro 5. Os cálculos foram baseados na definição das ações das cargas permanentes (G_k) nas lajes, paredes e revestimentos e a ação variável (Q_k) na sobrecarga de utilização definida no EC1 para escritórios.

Quadro 5 - Definição das ações verticais

Localização	Carga	P (kN/m ²)
Piso 1, 2 e 3 (pavimentos)	G_k	6.25
	Q_k	3.0
Piso 4 (cobertura)	G_k	5.25
	Q_k	1

Considerando as ações indicadas efetuou-se o dimensionamento da estrutura somente para as cargas gravíticas. Na Figura 23 e no Quadro 6 apresenta-se de uma forma sucinta os resultados desta análise. Para este dimensionamento foi considerado que os perfis metálicos a serem utilizados seriam em aço da classe S355 e das famílias IPE e HEB, para vigas e pilares respetivamente.

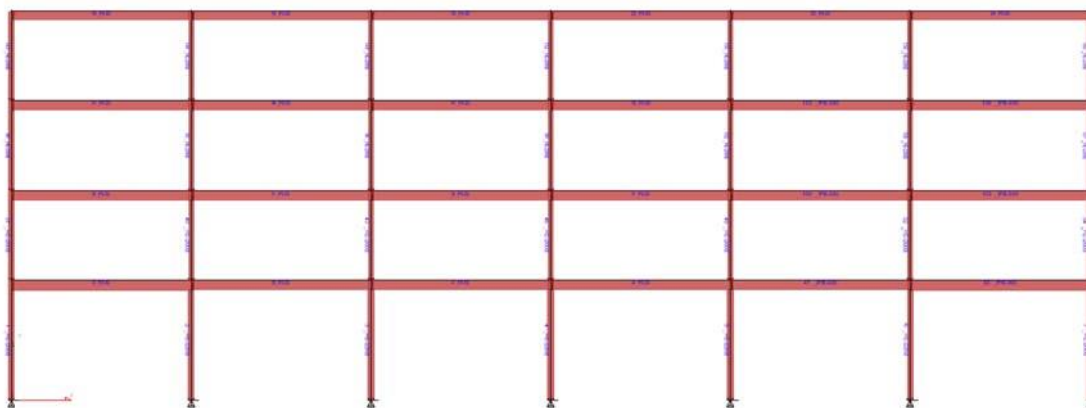


Figura 23 - Pórtico base - ações verticais

Quadro 6 - Secções consideradas - ações verticais

Piso	Vigas	Pilares
1	IPE330 (IPE360 nos vãos de extremidade)	HEB220 (HEB200 nos topos)
2	IPE330	HEB200
3	IPE330	HEB200
4	IPE300	HEB200

Para esta situação a quantidade de aço é de 12700.30 kg por pórtico perfazendo num total de 63501.50 kg para os 5 pórticos.

3.2.2. Dimensionamento para ação sísmica

Para a análise da estrutura foi considerada a ação sísmica definida de acordo com preconizado no EC1 para o caso português. Deste modo considerou-se inicialmente a estrutura sujeita aos dois tipos de sismo, Tipo 1 e Tipo 2, na situação mais gravosa para Portugal continental, neste caso para a zona 1.1 e zona 2.3 respetivamente. Após a análise comparação dos resultados verificou-se que situação mais condicionante seria aquando da ação de um sismo do Tipo 1 na zona 1.1. Deste modo, neste trabalho, foi considerada somente a situação mais gravosa

Outro fator importante para análise da estrutura em zonas sísmicas e a definição do tipo de solo em que se encontra o edifício, já que se o solo for por exemplo em zonas rochosas as ondas se propagam mais rapidamente causando poucos danos a estrutura, se tornando a zona mais favorável, já em casos em que o solo for consideravelmente ruim existe uma grande possibilidade de ocorrer uma propagação das ondas e elas começarem a se sobreporem e ganharem uma amplitude maior, tornando-se assim a zona mais desfavorável para construções sísmo-resistentes. Neste caso de estudo foi adotado um

solo Tipo B – depósito de areia ou seixo cascalho muito denso ou argila muito rija, considerado uma zona favorável.

O edifício dimensionado será considerado com classe de importância II – Edifícios correntes não pertencentes as outras categorias.

No ponto seguinte apresenta-se o dimensionamento para os diversos casos de estudo considerados.

3.3. Dimensionamento dos casos de estudo

3.3.1. Introdução

Para o dimensionamento dos diversos casos de estudo considerou-se a seguinte metodologia:

- a) Partindo da solução do pórtico dimensionado para as ações gravíticas efetuou-se o dimensionamento à resistência para a situação da ação sísmica.
- b) Tendo por base a solução encontrada anteriormente verificou-se a deformabilidade da estrutura e procedeu-se ao redimensionamento desta de forma a verificar os limites de deformação, tanto globais, como entre pisos.
- c) No final compararam-se as quantidades de material resultantes de cada situação encontrada.

De modo a simplificar as possíveis soluções a encontrar foi considerado que os perfis metálicos a serem utilizados seriam em aço da classe S355 e das famílias IPE e HEB (para vigas e pilares) e CHS (para as diagonais de contraventamento).

Como foi referido anteriormente consideram-se 4 casos de estudo base para o pórtico resistente às ações sísmicas: simples (PO1), contraventado em X (PO2), contraventado em diagonal (PO3), contraventado em V (PO4). Dentro de cada caso ainda se consideraram algumas variações.

3.3.2. Sistema em pórtico simples

Este sistema resistente é constituído por um pórtico rígido que irá suportar a totalidade da ação sísmica, servindo de contraventamento à restante estrutura. Neste caso foram estudadas três possibilidades, um pórtico de um vão (PO1a), um pórtico de dois vãos (PO1b) e dois pórticos de um vão (PO1c). Sendo a ideia base verificar quais as diferenças entre estas soluções.

Partindo do sistema base descrito na Secção 3.2 efetuou-se o dimensionamento para a ação sísmica de forma a verificar a resistência dos elementos estruturais, tendo-se obtido os resultados apresentados na Figura 24 no Quadro 7. Sendo que neste caso o pórtico resistente tem um peso de 13716.70 kg e a estrutura, 5 pórticos, um peso de 65534.30 kg, ou seja, um aumento de 3% em relação à solução estática.

No entanto a deformação da estrutura não é aceitável, tendo um deslocamento horizontal máximo no topo de 8.9 cm e entre pisos de 3.8 cm (quando regulamentarmente deveria ser 2.6 cm no topo e 1.3 cm ou 1.0 cm conforme seja para o piso 1 ou para os restantes).

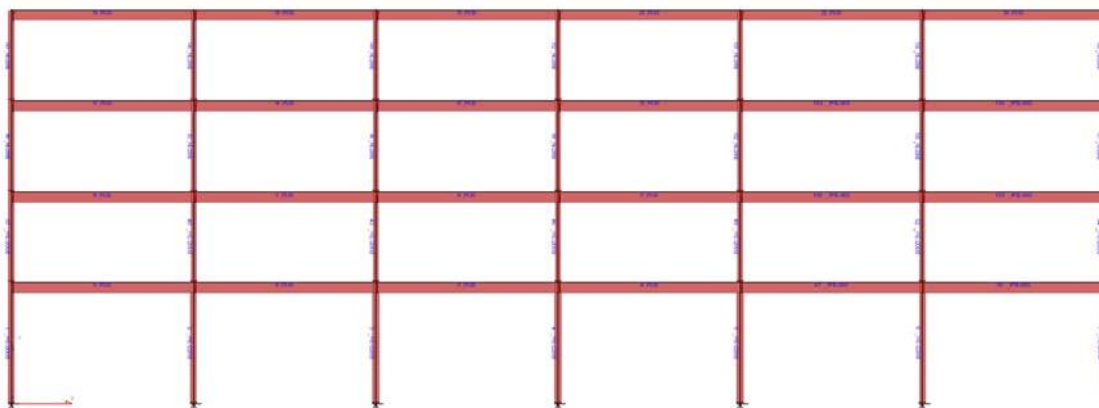


Figura 24 – P01 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)

Quadro 7 – P01 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)

Piso	Vigas	Pilares
1	IPE360	HEB220 (HEB200 nos topos)
2	IPE360	HEB200
3	IPE360	HEB200
4	IPE330	HEB200

De modo a verificar os critérios de deformabilidade foram consideradas três possibilidades distintas, um pórtico de um vão, um pórtico de dois vãos e dois pórticos de um vão.

3.3.2.1. Pórtico simples de um vão (P01a)

Nesta solução considerou-se aumentar a rigidez da estrutura unicamente num dos vãos, após a realização diversas iterações chegando à solução preconizada na Figura 25 e no Quadro 8.

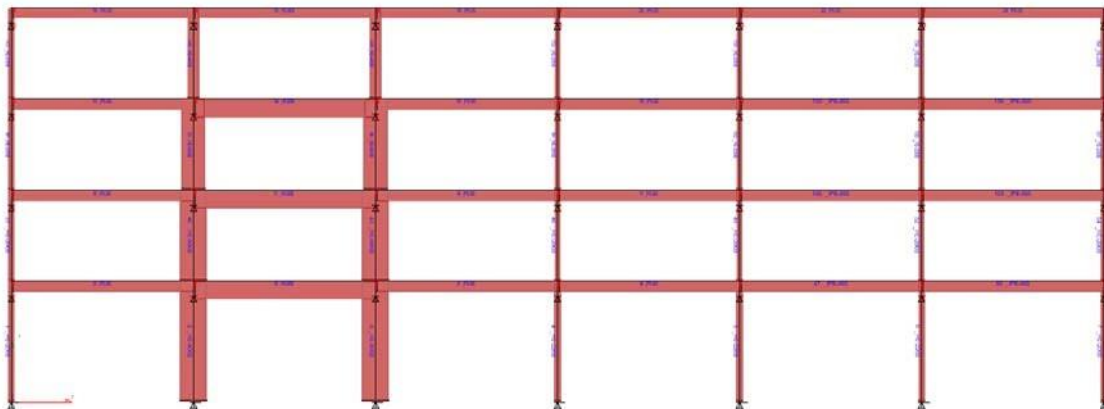


Figura 25 – P01a – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 8 – P01a – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada)

Piso	Vigas	Pilares
1	HEB600	HEB900
2	HEB600	HEB900
3	HEB600	HEB800
4	HEB340	HEB400

Esta solução leva a um consumo de 21914.90 kg no pórtico, resultando de um peso de 81930.70 kg para a estrutura. Resultando um aumento de 29% em relação ao caso estático e de 25% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.2.2. Pórtico simples de dois vãos consecutivos (P01b)

De forma idêntica à situação anterior, considerou-se agora aumentar a rigidez da estrutura unicamente em dois vãos consecutivos, após a realização diversas iterações chegando à solução preconizada na Figura 26 e no Quadro 9.

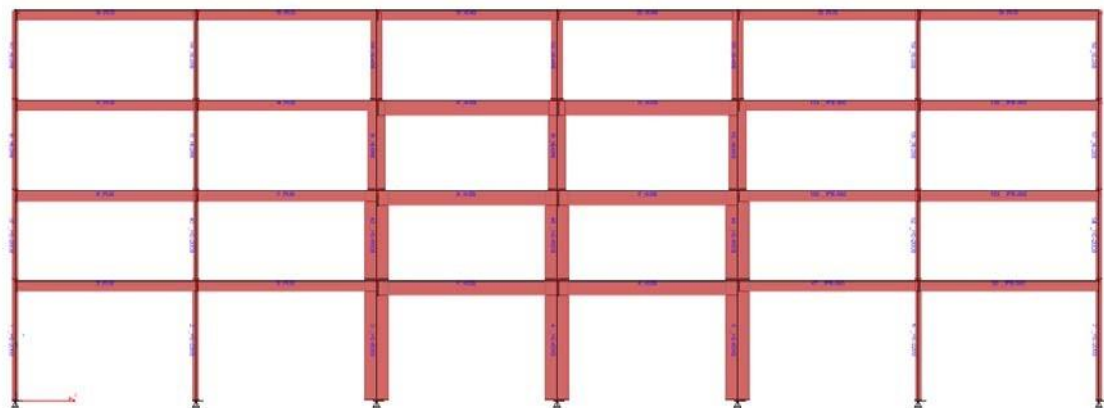


Figura 26 – P01b – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 9 – P01b – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada)

Piso	Vigas	Pilares
1	HEB500	HEB800
2	HEB500	HEB800
3	HEB500	HEB700
4	HEB340	HEB400

Esta solução leva a um consumo de 25703.80 kg no pórtico, resultando de um peso de 89508.50 kg para a estrutura. Resultando um aumento de 41% em relação ao caso estático e de 37% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.2.3. Pórtico simples de dois vãos não consecutivos (P01c)

De forma idêntica à situação anterior, considerou-se agora aumentar a rigidez da estrutura unicamente em dois vãos consecutivos, após a realização diversas iterações chegando à solução preconizada na Figura 27 e no Quadro 10.

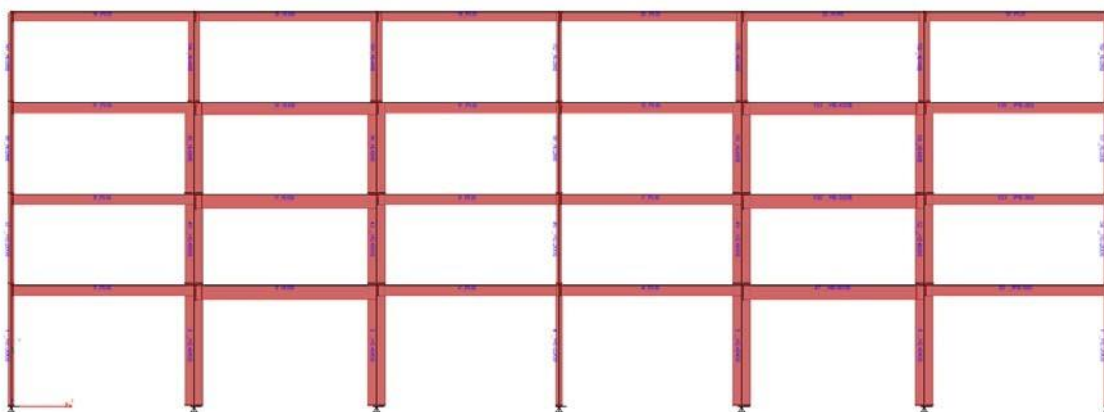


Figura 27 – P01c – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 10 – P01c – dimensionamento à ação sísmica (zona alterada)

Piso	Vigas	Pilares
1	HEB500	HEB600
2	HEB500	HEB600
3	HEB400	HEB600
4	HEB340	HEB400

Esta solução leva a um consumo de 26017.10 kg no pórtico, resultando de um peso de 90135.10 kg para a estrutura. Resultando um aumento de 42% em relação ao caso estático e de 38% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.3. Sistema contraventado em X (P02)

Neste sistema considerou-se que o pórtico resistente é constituído pelo pórtico sistema base onde seria conferida a rigidez lateral através de contraventamentos em X num único vão.

Partindo do sistema base descrito na Secção 3.2 e após a introdução do contraventamento sob forma de tirantes, efetuou-se o dimensionamento para a ação sísmica de forma a verificar a resistência dos elementos estruturais, tendo-se obtido os resultados apresentados na Figura 28 no Quadro 11. Sendo que neste caso o pórtico resistente tem um peso de 15464.98 kg e a estrutura, 5 pórticos, um peso de 69030.86 kg, ou seja, um aumento de 9% em relação à solução estática.

No entanto a deformação da estrutura não é aceitável, tendo um deslocamento horizontal máximo no topo de 2.9 cm e entre pisos de 1.5 cm (quando regulamentarmente deveria ser 2.6 cm no topo e 1.3 cm ou 1.0 cm conforme seja para o piso 1 ou para os restantes pisos).

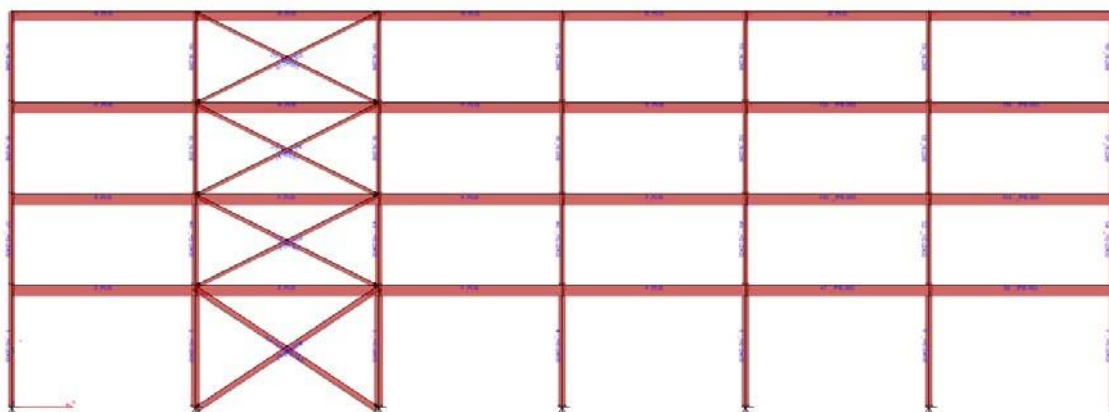


Figura 28 – P02 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)

Quadro 11 – P02 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	IPE360	HEB280	CHS200x8
2	IPE360	HEB240	CHS133x8
3	IPE360	HEB200	CHS125x5
4	IPE330	HEB200	CHS100x5

De modo a verificar os critérios de deformabilidade a estrutura foi redimensionada, tendo como proposta final a descrita na Figura 29e no Quadro 12.

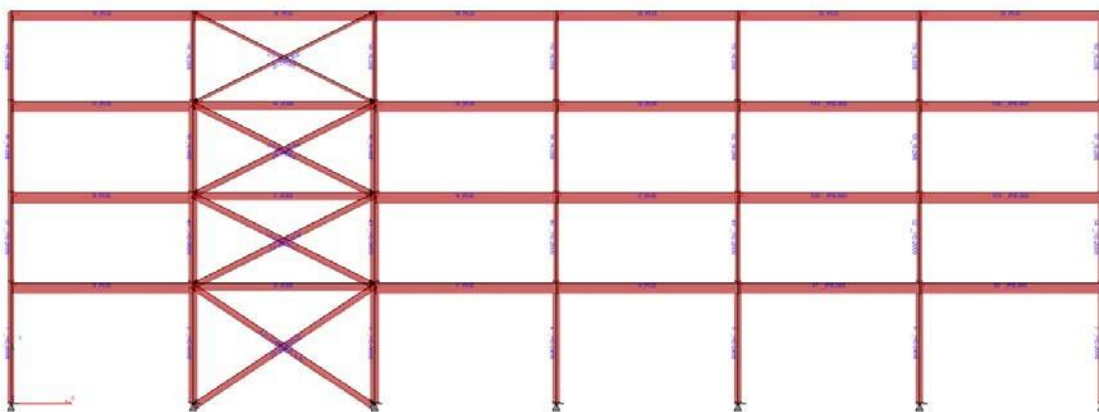


Figura 29 – P02 – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 12 – P02 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	HEB260	HEB300	CHS219x12
2	HEB260	HEB300	CHS219x12
3	HEB260	HEB300	CHS200x8
4	IPE330	HEB200	CHS100x8

A verificação dos critérios de deformabilidade da estrutura levaram a que o pórtico resistente tenha um peso de 17993.76 kg, levando que o consumo de aço para os 5 pórticos que constituem a estrutura seja de 74088.42 kg. Resultando um aumento de 17% em relação ao caso estático e de 7% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.4. Sistema contraventado em diagonal (P03)

Neste sistema considerou-se que o pórtico resistente é constituído pelo pórtico sistema base onde seria conferida a rigidez lateral através de contraventamentos em diagonal em vãos consecutivos, também denominado como em V invertido.

Partindo do sistema base descrito na Secção 3.2 e após a introdução do contraventamento sob forma de tirantes, efetuou-se o dimensionamento para a ação sísmica de forma a verificar a resistência dos elementos estruturais, tendo-se obtido os resultados apresentados na Figura 30 no Quadro 13. Sendo que neste caso o pórtico resistente tem um peso de 15254.38 kg e a estrutura, 5 pórticos, um peso de 68609.66 kg, ou seja, um aumento de 8% em relação à solução estática.

No entanto a deformação da estrutura não é aceitável, tendo um deslocamento horizontal máximo no topo de 2.5 cm e entre pisos de 1.6 cm (quando regulamentarmente deveria

ser 2.6 cm no topo e 1.3 cm ou 1.0 cm conforme seja para o piso 1 ou para os restantes pisos).

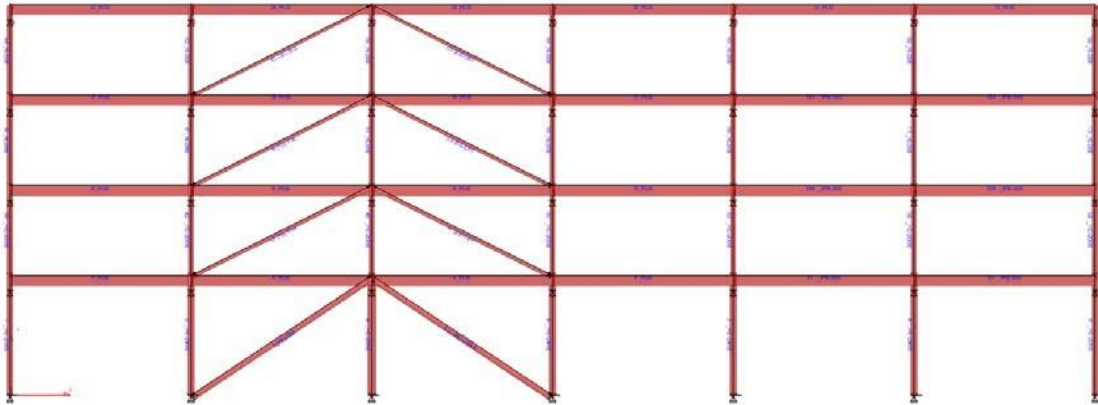


Figura 30 – P03 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)

Quadro 13 – P03 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	IPE360	HEB280	CHS200x8
2	IPE360	HEB200	CHS133x8
3	IPE360	HEB200	CHS125x5
4	IPE330	HEB200	CHS100x5

De modo a verificar os critérios de deformabilidade a estrutura foi redimensionada, tendo como proposta final a descrita na Figura 31 e no Quadro 14.

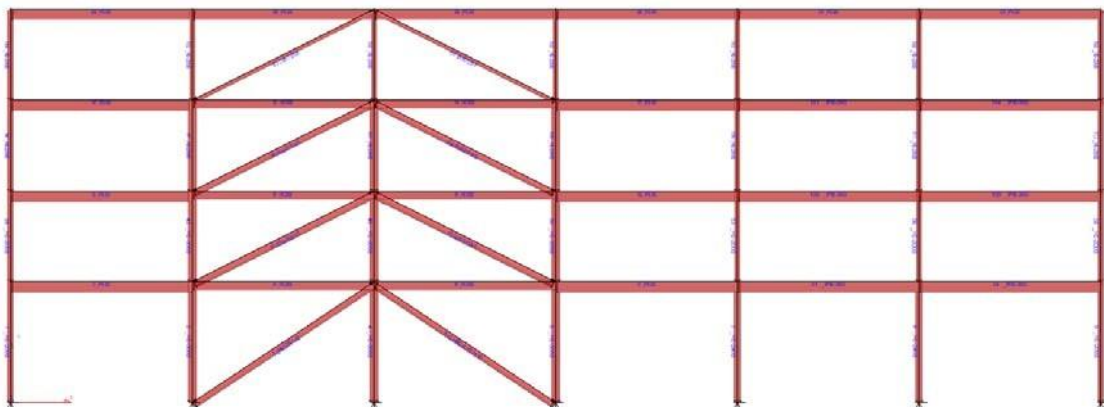


Figura 31 – P03 – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 14 – P03 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	HEB260	HEB300	CHS219x12
2	HEB260	HEB280	CHS219x12
3	IPE360	HEB200	CHS200x8
4	IPE330	HEB200	CHS125x8

A verificação dos critérios de deformabilidade da estrutura levaram a que o pórtico resistente tenha um peso de 17926.26 kg, levando que o consumo total de aço para os 5 pórticos seja de 73953.42 kg. Resultando um aumento de 16% em relação ao caso estático e de 8% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.5. Sistema contraventado em V (P04)

Neste sistema considerou-se que o pórtico resistente é em tudo semelhante ao descrito na secção anterior, 3.3.5, em que a única diferença é a inclinação dos tirantes. Desta forma efetuou-se o dimensionamento para a ação sísmica de forma a verificar a resistência dos elementos estruturais, tendo-se obtido os resultados apresentados na Figura 32 e no Quadro 15. Sendo que neste caso o pórtico resistente tem um peso de 15254.38 kg e a estrutura, 5 pórticos, um peso de 68609.66 kg, ou seja, um aumento de 8% em relação à solução estática, ou seja idêntica à do caso anterior.

No entanto a deformação da estrutura não é aceitável, tendo um deslocamento horizontal máximo no topo de 2.5 cm e entre pisos de 1.6 cm (quando regulamentarmente deveria ser 2.6 cm no topo e 1.3 cm ou 1.0 cm conforme seja para o piso 1 ou para os restantes pisos).

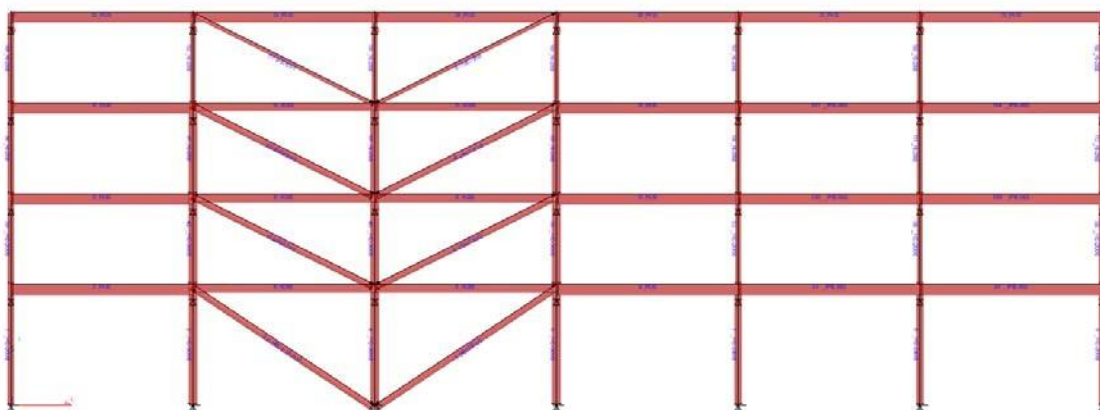


Figura 32 – P04 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência)

Quadro 15 – P04 – dimensionamento à ação sísmica (critério de resistência) zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	IPE360	HEB280	CHS200x8
2	IPE360	HEB200	CHS133x8
3	IPE360	HEB200	CHS125x5
4	IPE330	HEB200	CHS100x5

De modo a verificar os critérios de deformabilidade a estrutura foi redimensionada, tendo como proposta final a descrita na Figura 31 e no Quadro 14.

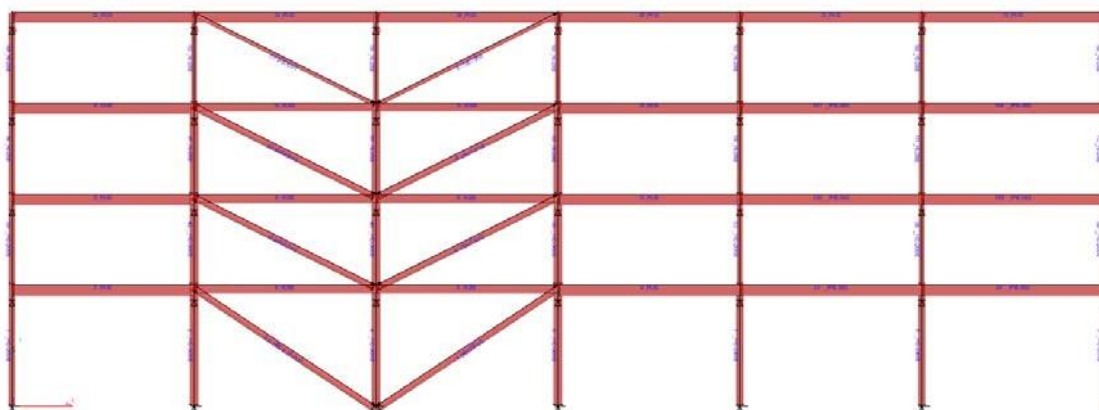


Figura 33 – P03 – dimensionamento à ação sísmica

Quadro 16 – P03 – dimensionamento à ação sísmica – zona alterada

Piso	Vigas	Pilares	Tirantes
1	HEB280	HEB300	CHS219x12
2	HEB280	HEB300	CHS219x12
3	HEB260	HEB280	CHS219x12
4	IPE330	HEB200	CHS125x8

A verificação dos critérios de deformabilidade da estrutura levaram a que o pórtico resistente tenha um peso de 19603.50 kg, levando que o consumo total de aço para os 5 pórticos seja de 77307.90 kg. Resultando um aumento de 22% em relação ao caso estático e de 13% em relação à solução resistente, onde não foram considerados os critérios de deformabilidade.

3.3.6. Análise de resultados e conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho, cujo objetivo principal era verificar qual o sistema de contraventamento seria o mais eficaz em casos de ação sísmica.

Com base nos dimensionamentos discutidos na secção anterior, é possível avaliar a eficácia dos diferentes tipos de contraventamento em relação à estrutura e à zona sísmica analisada. A definição das secções da estrutura foi orientada pela análise comparativa dos casos identificados, onde se observou que a combinação das secções propostas nos casos PO3 e PO2, contraventamento em diagonal e em X respetivamente, resulta em soluções mais económicas, como se pode verificar no Quadro 17.

Neste trabalho não se teve em consideração a definição arquitetónica do edifício, como é lógico, a definição do sistema sismo-resistente, assim como a disposição dos elementos de contraventamento poderá ser condicionada por condicionantes arquitetónicas. Devendo nestes casos, analisar as diversas proposta com o diversos intervenientes no projeto do edifício.

Quadro 17 - Comparação de resultados

Caso de estudo	Peso da estrutura	% em relação ao Sist. Estático
Sist. Estático	63501.50 kg	--
P01a	81930.70 kg	29%
P01b	89508.50 kg	37%
P01c	90135.10 kg	42%
P02	74088.42 kg	17%
P03	73953.42 kg	16%
P04	77307.90 kg	22%

Verificou-se nos diversos caso que a necessidade da verificação dos critérios de deformabilidade da estrutura são condicionantes em estruturas metálicas deste tipo, levando em todos os caso à consideração de sistemas constituídos por secções mais robustas. Isso reforça a necessidade de se considerar não apenas a distribuição de cargas verticais, mas também a eficiência dos sistemas de contraventamento na mitigação dos efeitos dos sismos.

Capítulo 4

4. Considerações Finais

4.1. Conclusões

Ao longo deste trabalho foram analisados os principais aspectos presentes no EC8 relativos ao dimensionamento sísmico de edifícios. Através da aplicação prática do Eurocódigo 8, foram explorados diferentes tipos de pórticos e suas reações a forças sísmicas, destacando a relevância do monitoramento histórico e da caracterização do solo na avaliação do risco sísmico.

O estudo demonstrou que a combinação de seções estruturais propostas nos casos PO2 e PO3 proporciona um desempenho otimizado, especialmente no que diz respeito à resistência e estabilidade sob condições sísmicas.

Esses resultados estabelecem uma direção para a continuidade do projeto, oferecendo dados importantes para futuras aplicações práticas e investigações acadêmicas sobre o comportamento estrutural em regiões suscetíveis a sismos. A análise dinâmica, aliada a um dimensionamento criterioso, é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das construções em áreas de risco sísmico.

4.2. Propostas para trabalhos futuros

A análise do comportamento sísmico de estruturas, como apresentado neste trabalho, revela não apenas a complexidade das interações entre as forças sísmicas e as construções, mas também a necessidade contínua de inovação e aprimoramento nas metodologias de projeto. Considerando os avanços tecnológicos e as novas demandas do setor da construção civil, é essencial explorar propostas de trabalhos futuros que possam expandir e aprofundar o conhecimento nesta área.

Esta pesquisa e os dados apresentados constituem uma base sólida para investigações futuras, incluindo a realização de análises estáticas não lineares (pushover) e avaliações mais rigorosas sobre outros tipos de contraventamentos, como por exemplo os contraventamentos excêntricos. Além disso, propõe-se a condução de estudos direcionados a diferentes tipos de solos e estruturas, com o objetivo de ampliar o acervo de informações e dados sobre este tema de extrema importância.

Referências

1. **Cil, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia.** Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas. [Online] 15 de Fevereiro de 2024. <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/vulnerabilidade.html>.
2. **Peña, Luis.** *Análise dos efeitos provocados por abalos sísmicos em estruturas irregulares.* s.l. : Universidade de Brasília, 2012.
3. **Eurocódigo8.** *Projecto de estruturas para resistência aos sismos.* s.l. : NP - Norma Portuguesa, 2010.
4. **Delgado, R.** *Projecto de estruturas sísmo-resistentes de acordo com o Eurocódigo 8.* s.l. : Construção Magazine, 2006.
5. **R., Costa e P., Providência.** *Avaliação e realibitação sísmicas de edifícios de betão armado.* . s.l. : Quântica Editora Conteúdos Especializados, Lda, 2019.
6. **Assessment, Global Sistema Hazard.** [Online] 5 de Março de 2024. <HTTP://WWW.SEISMO.ETHZ.CH/STATIC/GSHAP/INDEX.HTML> .
7. *Anexo Nacional do Eurocódigo 8 - Consequências para o dimensionamento em Portugal.* **Carvalho, C.** Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007. Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica. pp. 47-62.
8. **Romão, X, Acosta, A e Delgado, R.** A review of the EC8-Part3 assessment procedures for existing RC structures. *Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 2009.
9. **Santos, Luís.** *Dimensionamento sísmico de pórticos contraventados metálicos.* Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
10. **Mazzolano, M.F. e Piluso, V.** *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames.* Londres : Spon Press, 1996.
11. **Elghazouli, Y.A. e Castro, J.M.** *Design of steel structures. In Seismic Design of Buildings to Eurocode 8, p. 175-214.* Londres : Spon Press, 2009.
12. **Peres, Rita, Castro, José M. e Bento, Rita.** *Modelling and seismic performance evaluation of steel structures with concentrically braced frames.* Série III. s.l. : RPEE - Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, 2016.
13. **Saeedi, Farzad, Amiri, Amir e Mousavi, Sayed.** *Evaluating Reduction Factor of Off-center Bracing Frames.* s.l. : University of Sistan and Baluchestan, 2015.
14. **LIN1, Homayonn, SOLTANI2, Ahmad e VAFAI3, Abolhassan.** *Seismic Behavior of Steel Frames with off-center Bracing System.* Vancouver, BC, Canadá : 13^a World Conference on Earthquake Engineering, 2004.

