

# Irregularidades estruturais no dimensionamento sísmico de edifícios de betão armado: Discussão de exigências regulamentares e casos de estudo

Structural irregularities in the seismic design of reinforced concrete buildings:  
Discussion of regulatory requirements and case studies

André Gonçalves Lima  
José Melo  
Humberto Varum

## Resumo

A atividade sísmica recente evidencia a necessidade de melhorar a abordagem quanto à verificação de segurança sísmica nos projetos de novas estruturas e na avaliação das existentes, particularmente no caso de estruturas irregulares.

Este trabalho centra-se na temática das irregularidades estruturais, justificado pelo elevado número de estruturas de edifícios classificado como irregular como consequência de múltiplos fatores intervenientes na conceção estrutural.

Os objetivos principais são: i) analisar os aspetos relacionados com as irregularidades estruturais presentes em normas atuais; e ii) realizar um levantamento dos desafios e de algumas das dificuldades sentidas pelos projetistas na aplicação do Eurocódigo 8.

Foi, também, analisado um conjunto de edifícios, para os quais foi feita a aplicação dos critérios de regularidade estrutural presentes na atual versão do Eurocódigo 8, bem como da futura versão do Eurocódigo 8 (que está em fase de finalização). De forma simplificada é ainda avaliada a influência das paredes de alvenaria de enchimento na classificação das irregularidades.

## Abstract

Recent seismic activity confirms that it is essential improve the seismic design and safety assessment approaches, both in the design of structures and in the assessment of the existent ones, particularly for irregular structures.

In the present work, building's structural irregularities are studied, since multiple variables are involved in the structural design, many buildings have irregular structural systems.

The main goals of this study were: i) analyse the aspects related to the structural irregularities present in some codes; and ii) gathered the main challenges and difficulties experienced by the engineers in the application of the Eurocode 8.

A set of buildings was analysed, for which were tested the criteria for the structural regularity checks present in the current version of the Eurocode 8, as well as in the new version of this regulation currently in development. In a simplified manner it is also evaluated the influence of the masonry infill walls in the categorization of the irregular structures.

**Palavras-chave:** Irregularidades estruturais / Normas sísmicas / Eurocódigo 8 / Sistema estrutural / Coeficiente de comportamento

**Keywords:** Structural irregularities / Seismic codes / Eurocode 8 / Structural system / Behavior factor

## André Gonçalves Lima

Mestre em Engenharia Civil, especialidade de Estruturas  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
up201505158@fe.up.pt

## José Melo

Doutorado em Engenharia Civil  
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
josemelo@fe.up.pt

## Humberto Varum

Professor Catedrático de Engenharia Civil  
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
hvarum@fe.up.pt

## Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

## Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

LIMA, A. [et al.] – Irregularidades estruturais no dimensionamento sísmico de edifícios de betão armado: Discussão de exigências regulamentares e casos de estudo **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 75-86.

## 1 Introdução

A irregularidade estrutural é, muitas vezes, influenciada por critérios arquitetónicos, económicos ou funcionais, impostos por cada uma das partes envolvidas na construção do edifício, sendo estas o dono da obra, o projetista de estruturas, o arquiteto e o construtor. O papel do engenheiro de estruturas é determinar uma solução que conjugue o bom funcionamento estrutural durante o tempo de vida esperado com as exigências feitas pelas outras partes envolvidas (custo, tempo de execução, dificuldade de execução, ...) na construção da estrutura. A tomada de decisão sobre os vários aspetos do sistema estrutural torna-se um desafio maior quando a obra se localiza numa zona sísmica, onde o engenheiro tem de conjugar todos os fatores com as exigências específicas do comportamento desejado perante a complexa ação sísmica. Assim, torna-se fundamental compreender a resposta sísmica dos diferentes tipos e configurações de sistemas estruturais [1].

Analisando o atual estado de desenvolvimento dos métodos de dimensionamento sísmico, verifica-se ser de consenso geral que estes oferecem um grau de confiança suficiente quando aplicados a estruturas regulares ou em casos em que as distribuições da massa, da rigidez e da resistência obedecem a determinados critérios de regularidade. No entanto, para estruturas irregulares muitas questões ainda se levantam [2].

Avaliando os efeitos de sismos recentes, evidencia-se a importância da conceção estrutural no desempenho sísmico dos edifícios. Em particular, os sismos de L'Áquila, em Itália (2009), Lorca, em Espanha (2011) e Puebla, no México (2017) são exemplos onde as irregularidades estruturais tiveram um grande impacto no comportamento e desempenho sísmico das estruturas [3] [4] [5].

As estruturas com irregularidades exibem um comportamento estrutural inadequado e que podem conduzir a um aumento de deformações, esforços e danos concentrados não considerados na modelação e não contemplados nas normas. Consequentemente, alguns elementos estruturais, como os pilares, podem ser dimensionados para um nível de exigência inferior ao real. Por outro lado, as irregularidades podem diminuir a capacidade de a estrutura se deformar de forma controlada e com isso não explorar a ductilidade prevista no dimensionamento.

Para além disso, em Portugal assiste-se hoje a uma fase transitória sendo gradualmente abandonada a antiga regulamentação, o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) [6] e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) [7], e adotados os Eurocódigos. A entrada em vigor da nova regulamentação constitui um desafio para a Engenharia em Portugal, pois é expectável o aumento da complexidade dos projetos, contribuindo decisivamente para esse facto a abordagem da ação sísmica prescrita pelo Eurocódigo 8 (EC8) [8]. De acordo com o EC8, quando a estrutura é considerada irregular, existe uma diminuição do coeficiente de comportamento ( $q$ ) a adotar no espetro de resposta de dimensionamento e consequentemente a estrutura vai ser dimensionada para uma ação sísmica maior e com isso haverá necessidade de secções transversais maiores ou maior quantidade de armadura.

## 2 Irregularidades estruturais

Para fins de dimensionamento sísmico, as estruturas são classificadas como regulares ou irregulares de acordo com a configuração estrutural em planta e em altura. O reconhecimento destas irregularidades e a sua consideração na modelação estrutural é preponderante para a garantia de um comportamento estrutural adequado.

As irregularidades estruturais podem ser provenientes das mais diversas fontes (Figura 1.a), sendo elas divididas na literatura em irregularidades em planta (Figura 1.b), irregularidades em altura (Figura 1.c) e edifícios torsionalmente flexíveis (Figura 1.d).

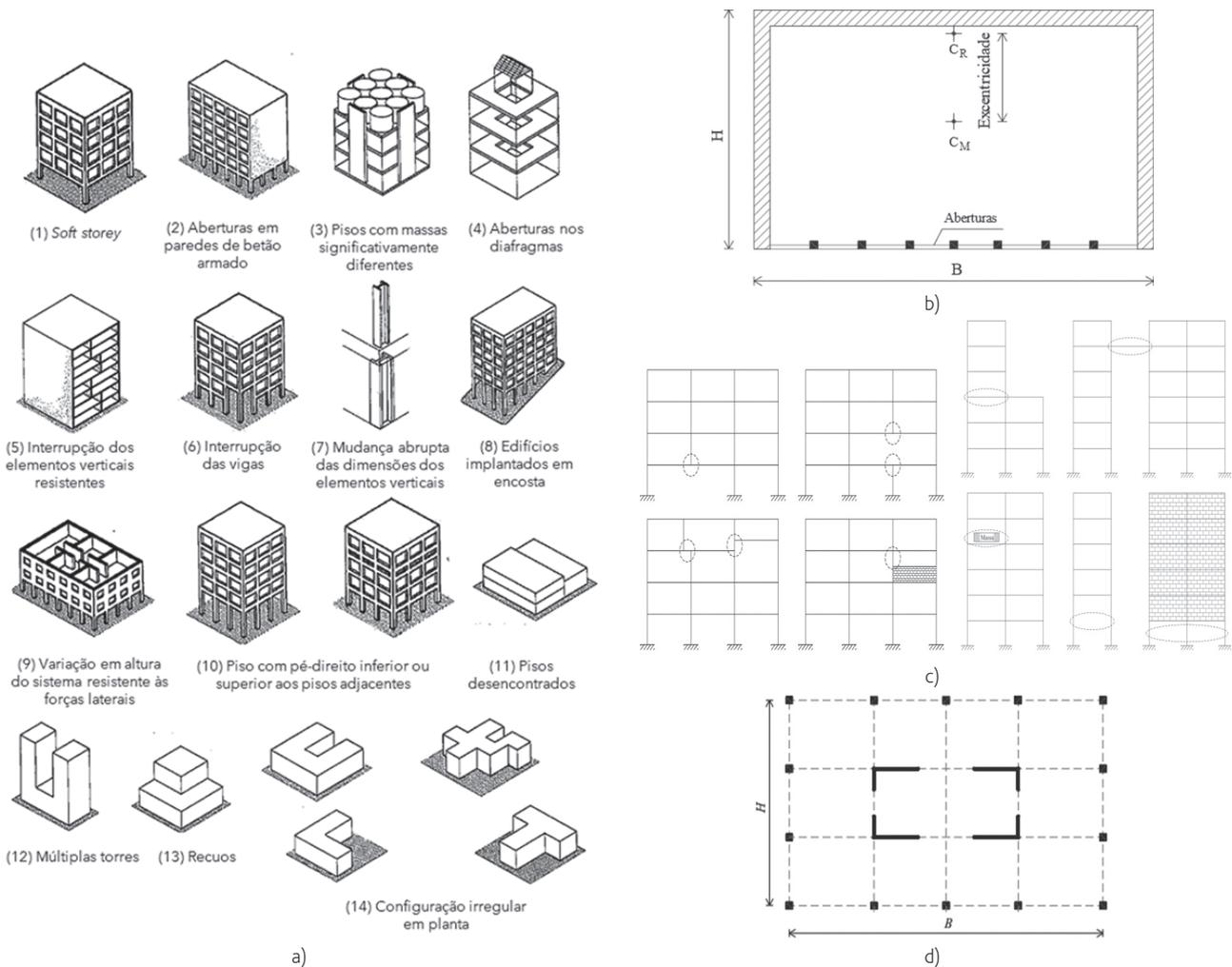
De forma resumida, podem-se destacar as irregularidades em planta nos seguintes tipos:

- Irregularidades de torção: quando o centro de rigidez de um piso apresenta uma excentricidade em relação ao centro de massa desse mesmo piso (Figura 1.b);

- Irregularidades por descontinuidade: provocadas por descontinuidades ao nível dos pisos, devido à existência de aberturas, ou por uma abrupta mudança de rigidez;
- Irregularidades de forma: devidas à existência de reentrâncias em planta, originando concentrações de esforços de corte nesses cantos [9].

As irregularidades em altura podem afetar diferentes características do sistema estrutural, como a rigidez, massa e capacidade resistente. Estas podem advir de diversas fontes, destacando-se:

- Irregularidades de rigidez: verificadas quando existem variações de rigidez de uns pisos para os outros, resultando num piso fraco, podendo originar mecanismos como *soft-storey* [12];
- Irregularidades de massa: verificadas quando a massa de um piso é muito superior ou inferior à dos restantes. Um exemplo prático desta situação é a necessidade de existência de pisos técnicos com maquinaria pesada;



**Figura 1** Irregularidades estruturais: Geral a); Em planta b); Em altura c); Edifício torsionalmente flexível (15 pisos) d), adaptado de [10] e [11]

**Tabela 1** Atributos e benefícios das opções associadas às configurações estruturais (adaptado de [10])

Atributos	Benefícios
Baixo rácio das dimensões em planta (largura / profundidade)	Redução dos efeitos de torção
Alturas de piso semelhantes	Redução dos problemas de <i>weak / soft-storeys</i>
Vãos curtos	Limitação dos esforços e deformações nos elementos estruturais
Planta aproximadamente simétrica	Redução dos problemas de torção
Rigidez uniforme em planta / altura	Redução de concentração de tensões
Resistência uniforme em planta / altura	Redução de concentração de tensões
Ductilidade uniforme em planta / altura	Aumento da capacidade de dissipação de energia
Sistemas de resistência lateral próximos do contorno do edifício	Aumento da resistência à torção
Redundância estrutural	Aumento da capacidade de redistribuição plástica

- Irregularidades devido à existência de diferentes alturas das partes constituintes do edifício e diferentes alturas entre edifícios: ocorridas quando os edifícios contíguos apresentam alturas diferentes, originando restrições nos movimentos dos pisos inferiores [13];
- Irregularidades na capacidade resistente de um piso: devidas à diferente resistência dos elementos que suportam a ação sísmica numa dada direção num determinado piso, em relação ao piso seguinte;
- Irregularidades devidas a descontinuidades nos caminhos de carga: verificadas com a ausência de continuidade dos elementos resistentes de um piso para o seguinte [14].

Por último, nos edifícios é necessário rigidez e resistência adequadas à torção para reduzir os movimentos de torção que tendem a forçar os elementos estruturais de maneira não uniforme, podendo levar ao colapso da estrutura. Um exemplo de um sistema deste tipo é um sistema estrutural constituído por pórticos flexíveis associados a paredes concentradas no centro do edifício em planta (Figura 1.d). A concentração de paredes muito rígidas junto ao centro de massa faz com que a rigidez de torção perca peso em relação à rigidez de flexão. Nessas circunstâncias os modos de vibração associados à torção ganham um peso significativo devido à consideração de uma excentricidade acidental das massas na análise dinâmica [15].

A importância da configuração estrutural na resposta à ação sísmica foi reconhecida e implementada por códigos de práticas e documentos de orientação de projeto em todo o mundo. Para alcançar um desempenho adequado, esses padrões e diretrizes fornecem uma série de princípios básicos. A tabela 1 apresenta de forma resumida os benefícios de alguns aspetos positivos de conceção estrutural.

### 3 Regulamentação sobre irregularidades estruturais em edifícios

No presente trabalho analisou-se a matéria que diz respeito às irregularidades estruturais em normas de diversos países ou regiões, nomeadamente: Europa [8], Portugal [6], Itália [16], Turquia

[17], México [18], Índia [19], Estados Unidos [20], Chile [21], Nova Zelândia [22], Canadá [23] e Japão [24].

Uma vez que as normas estão em constante processo de evolução, sofrendo melhorias e alterações após a ocorrência de novos sismos e consequentes casos de estudo, procurou-se identificar as principais diferenças e semelhanças entre os vários *códigos*, em vigor atualmente.

Da análise comparativa aos critérios de regularidade em planta apresentada na tabela 2, deve-se realçar que se verifica uma grande discrepância nos critérios e abordagens. Certas normas apresentam critérios rigorosos e quantificáveis, enquanto outras apenas referem algumas indicações sem qualquer tipo de quantificação ou parametrização.

Além disso, várias normas referem explicitamente recomendações quanto à distribuição de massa, distribuição de rigidez, de simetria do sistema estrutural e de rigidez dos diafragmas rígidos, mas não incluem alguma forma de quantificar esses critérios.

A norma de Itália é muito similar à norma da Europa (EN 1998), excluindo apenas o critério da verificação da excentricidade estrutural com o raio de torção e raio de giração. No entanto, ambas as normas utilizam o mesmo procedimento para verificar se as estruturas são torsionalmente flexível.

Em alguns regulamentos, a quantificação do coeficiente de torção pressupõe o conhecimento de alguns parâmetros de resposta estrutural, nomeadamente o *drift* em alguns pontos, o que obriga à modelação prévia da estrutura. Nas normas estudadas surgem 3 estratégias diferentes para controlar o efeito de torção no edifício:

- Comparação da excentricidade estrutural com o raio de torção, e do raio de torção com o raio de giração – Europa;
- Quantificação do coeficiente de torção (quociente entre o *drift* máximo do piso, medido num ponto de extremidade, e o *drift* médio do mesmo piso) – Turquia, Índia, Estados Unidos, Nova Zelândia e Canadá (o valor limite do coeficiente varia entre 1,2 e 1,7);
- Verificação da relação entre a excentricidade estrutural e a dimensão em planta – México;

**Tabela 2** Síntese dos critérios de regularidade em planta

Critério	Europa	Portugal	Itália	Turquia	México	Índia	Estados Unidos	Chile	Nova Zelandia	Canada
Norma	EN 1998-1	RSA	NTC_2018	TBDY-2018	MOC-2015	IS 1893-1	ASCE/SEI7-16	NCh433	NZS1170.5	NBCC 2015
Distribuição da massa	R	R	R	-	R	R	-	-	-	-
Rigidez lateral	R	R	R	-	R	R	-	-	-	-
Simetria dos elementos resistentes	R	R	R	-	R	R	-	-	-	-
Diafragmas rígidos	Q	R	Q	-	Q	Q	-	Q	-	-
Relação entre as dimensões em planta	Q	-	Q	-	Q	-	-	-	-	-
Existência de aberturas nos pisos	-	-	-	Q	Q	Q	Q	-	-	-
Verificações com excentricidade estrutural, raio de torção e raio de giração do piso	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relação entre excentricidade estrutural e dimensão em planta	-	-	-	-	Q	-	-	-	-	-
Coefficiente de torção	-	-	-	Q	-	Q	Q	-	Q	Q
Critérios de geometria	Q	-	Q	Q	Q	Q	Q	-	Q	-
Paralelismo dos elementos estruturais aos eixos ortogonais	-	-	-	R	-	R	R	-	-	R
Descontinuidade fora do plano	-	-	-	-	-	R	R	-	-	R
Irregularidade lateral induzida pela gravidade	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Q

R Referência ao aspeto estrutural específico, mas sem critério para quantificação;  
 Q Apresenta critério de quantificação;  
 - Sem referência.

- A norma de Itália e do Chile não apresentam nenhum procedimento quantitativo para controlar a torção.

Na tabela 3 apresenta-se uma síntese dos critérios de regularidade em altura abordados pelas normas analisadas. Salienta-se que a importância dada à variação de massa e da rigidez em altura é notória, pois praticamente todas as normas contemplam este tipo de critérios.

Nas normas analisadas, surgem diferentes procedimentos para verificação do critério da variação da rigidez em altura, sendo que algumas normas fazem esta verificação com base na rigidez dos elementos verticais em cada piso, e outras através da relação do *drift* entre pisos sucessivos. O EC8 e o RSA são os únicos que, embora refiram o critério, não o quantificam.

Deve-se referir também que algumas normas dispensam a verificação de alguns critérios de regularidade em altura nos últimos pisos, nomeadamente os critérios relativos à variação da massa e da rigidez.

A norma da Europa e de Itália são as únicas que obrigam a que a resistência real seja proporcional à resistência requerida, e que estas não difiram muito, sendo este um critério difícil de verificar. A norma do México apresenta 2 critérios específicos, que não surgem nas restantes normas analisadas.

Além disso, a norma da Turquia é a única que fornece uma fórmula para verificação do *weak-storey* tendo em conta as paredes de enchimento.

Por fim, a norma do Chile não apresenta qualquer tipo de critério de regularidade em altura.

Tendo em conta as consequências da classificação da estrutura como irregular no dimensionamento sísmico, observa-se na tabela 4 que o coeficiente de comportamento é de todas as variáveis analisadas, aquele que apresenta maior discrepância em termos de afetação do seu valor.

O coeficiente de comportamento tende a ser mais afetado pela irregularidade em altura do que pela irregularidade em planta. Isto

**Tabela 3** Síntese dos critérios de regularidade em planta em altura

Critério	Europa	Portugal	Itália	Turquia	México	Índia	Estados Unidos	Chile	Nova Zelândia	Canadá
Norma	EN 1998-1	RSA	NIC_2018	TBDY-2018	MOC-2015	IS 1893-1	ASCE/SEI7-16	NCh433	NZS1170.5	NBCC 2015
Continuidade dos elementos estruturais	R	-	R	R	-	R	R	-	-	R
Variação da rigidez lateral	R	R	Q	Q	Q	Q	Q	-	Q	Q
Existência de pisos fracos ( <i>soft-storey</i> )	-	-	-	Q	-	Q	Q	-	-	Q
Variação da massa	R	R	Q	-	Q	Q	Q	-	Q	Q
Relação entre resistência real e a requerida	Q	-	Q	-	-	-	-	-	-	-
Critério de geometria	Q	-	Q	-	Q	Q	Q	-	Q	Q
Variação da resistência ( <i>Weak-Storey</i> )	-	-	-	Q	Q	Q	Q	-	Q	Q
Variação da área piso	-	-	-	-	Q	-	-	-	-	-
Relação entre altura e menor dimensão em planta	-	-	-	-	Q	-	-	-	-	-

R Referência ao aspeto estrutural específico, mas sem critério para quantificação;

Q Apresenta critério de quantificação;

- Sem referência.

**Tabela 4** Redução prevista para o coeficiente de comportamento devido às irregularidades

País/Região	Norma	Coefficiente de comportamento
Europa	EC8 (EN 1998-1)	20 % de redução aquando da presença de irregularidades em altura Redução aquando presença de irregularidades em planta, dependendo do sistema estrutural e da classe de ductilidade, como explicado em 5.2.2.2 (6) desta norma
Portugal	RSA (Decreto-Lei n.º 235/83)	Não refere a percentagem de redução
Itália	NTC-2018 (GU n.42 20/02/2018 Suppl. Ord.)	20% de redução aquando da presença de irregularidades em altura Redução aquando presença de irregularidades em planta, dependendo do sistema estrutural e da classe de ductilidade, tal como no EC8
Turquia	TBDY-2018	Até 25% de redução aquando da presença de irregularidades em altura
México	MOC-2015	Até 30% de redução para estruturas fortemente irregulares
Índia	IS 1893-1	Não depende das irregularidades estruturais
Estados Unidos	ASCE/SEI 7-16	Não faz referência
Chile	NCh433	Não depende das irregularidades estruturais
Nova Zelândia	NZS1170.5	Não depende das irregularidades estruturais
Canadá	NBCC 2015	Não faz referência

**Tabela 5** Consequência da regularidade estrutural na análise de estruturas de acordo com as normas sísmicas analisadas. Exigência mínima

Regular em planta	✓	✓	X	X
Regular em altura	✓	X	✓	X
Europa	Forças equivalentes	Análise dinâmica modal	Forças equivalentes	Análise dinâmica modal
Portugal	Forças equivalentes	Análise dinâmica plana	Forças equivalentes	Análise dinâmica tridimensional
Itália	Forças equivalentes	Análise dinâmica modal	Forças equivalentes	Análise dinâmica modal
Turquia	Forças equivalentes		Análise dinâmica modal Análise no domínio do tempo	
México	Método simplificado		Método das forças equivalentes Análise dinâmica modal	
Índia	Forças equivalentes		Análise dinâmica modal Histórico de acelerações no tempo	
Nova Zelândia	Forças equivalentes		Análise dinâmica modal Histórico de acelerações no tempo	
Canadá	Forças equivalentes		Análise dinâmica modal	

deve-se ao facto de a irregularidade em planta ser mais facilmente tida em conta através do modelo de cálculo.

O EC8 e a norma NTC são as normas mais exigentes, pois basta não ser cumprido um dos critérios de regularidade para que o coeficiente de comportamento seja afetado. Em outras normas, a correção do coeficiente de comportamento depende do tipo de critério que é violado.

Grande parte das normas analisadas adota a redução do coeficiente de comportamento em edifícios irregulares, variando entre 20% e 30%. A maior penalização surge na norma do México, que pode chegar a 30% em caso de estruturas fortemente irregulares.

A norma de Portugal REBAP, de 1983, entre as normas analisadas é a única que refere a redução do coeficiente de comportamento para estruturas irregulares sem indicar explicitamente o valor da redução.

A norma neozelandesa possui alguns critérios quantificados para a regularidade em planta e em altura, mas que, no entanto, estes não conduzem a qualquer redução do coeficiente de comportamento. Neste caso, as irregularidades estruturais apenas têm implicações na metodologia de análise sísmica.

A norma chilena não possui restrições relativamente a edifícios com irregularidades estruturais, o que tem conduzido ao dimensionamento de edifícios que demonstram um comportamento sísmico deficiente, com casos de colapso total, devido à ocorrência de sismos.

Em relação aos tipos de análise sísmica para análise de estruturas de edifícios, algumas das normas estudadas revelaram-se ambíguas, pois não indicam explicitamente métodos de análise, nem avançam com restrições. No entanto, do estudo detalhado de cada norma foi possível deduzir a síntese das metodologias implicitamente abordadas em cada uma, em função da regularidade em planta e em altura das estruturas (tabela 5).

Quando a estrutura é regular em planta e altura, todas as normas

permitem que se realize uma análise sísmica pelo método das forças equivalentes. As diferenças surgem quando a estrutura é classificada como irregular, quer em planta ou em altura, ou ambas, em que predominantemente é sugerida uma análise dinâmica modal.

Em exceção, na norma dos Estados Unidos, a metodologia de análise varia dependendo da categoria de risco sísmico de cada projeto do edifício, ou seja, depende da zona onde se situa cada edifício.

Como seria expectável, nem todas apresentam o mesmo grau de desenvolvimento e abordagem do tema, no entanto, a primeira conclusão que se pode retirar da análise feita é que todas as normas sísmicas abordam a temática das irregularidades estruturais. No entanto, a norma do Chile é a única que não apresenta critérios bem estabelecidos para as irregularidades. Adicionalmente, algumas normas tornam-se confusas, sendo difícil perceber o que é afetado pela existência de irregularidades.

Além disso, apesar de existir um conjunto de critérios que se repetem em diferentes normas, os limites permitidos nem sempre são os mesmos nas diferentes normas, uma vez que estes estão relacionados com a atividade sísmica a que o país poderá estar sujeito.

#### 4 Dificuldades dos projetistas na aplicação das normas de dimensionamento sísmico em Portugal

Realizou-se um questionário a 22 projetistas de estruturas de um gabinete de projeto com escritórios no Porto e em Lisboa, com o objetivo de perceber de que forma as irregularidades estruturais são abordadas nos projetos correntes e quais as maiores dificuldades na sua aplicação. Grande parte destes projetistas já conta com experiência em projetos internacionais.

Deve-se realçar que todos os projetistas concordam que as irregularidades estruturais são importantes e que condicionam o comportamento do edifício. No entanto, por vezes não é possível intervir neste sentido, uma vez que a arquitetura é quase sempre condicionante e não existem alternativas arquitetónicas viáveis.

No EC8, a noção de 'edifícios correntes' do RSA é substituída pela classificação de 'edifícios regulares', mas de forma separada em planta e em altura, o que influencia o procedimento. Foi feito um esforço no sentido de tornar mais objetiva e quantitativa a classificação, o que também é um aspeto positivo. Finalmente, é fornecida uma orientação quantitativa relativamente ao coeficiente de comportamento dos edifícios não regulares em altura, inexistente no RSA.

Além disso, o carácter numérico de algumas regras do EC8 é notável, no entanto ainda há aspetos onde existe falta de modelos numéricos simplificados.

Outro ponto importante é que o valor do coeficiente de comportamento não é consensual por todos os projetistas.

## 5 Irregularidades estruturais segundo a versão *draft* EN 1998-1-2:2020 do Eurocodigo 8

Começa-se por esclarecer que quando se refere versão *draft*, remeterá para versão de 30 de abril de 2020 do documento "Eurocode 8: – Design of structures for earthquake resistance – Part 1-2: Rules for new buildings" [25].

Nesta nova versão, os tipos de estrutura apresentados são iguais à versão atual e a forma de classificação sugerida continua a ser através de rácios de resistência.

Para além da classificação do sistema estrutural, é imposto por ambas as versões a verificação da rigidez de torção mínima do edifício. Para essa verificação analítica, a versão atual impõe que, para cada direção e para cada piso  $i$ , o raio de torção  $r_i$  seja maior do que o raio de giração  $I_{s,i}$  da massa do piso em planta. A versão *draft* acrescenta que um edifício deve ser considerado torsionalmente flexível, se a maior massa modal efetiva na direção horizontal correspondente não for a do primeiro ou segundo modo, algo que já era assumido na prática corrente de projeto.

A maior diferença está na classificação do sistema estrutural, caso o critério de edifício torsionalmente flexível seja cumprido. Na versão atual, este deixava cair a classificação obtida pelo rácio de resistências dos elementos verticais e ficava com a designação de sistema torsionalmente flexível, onde lhe era atribuído um valor do coeficiente de comportamento em função da classe de ductilidade pretendida. Na nova versão, o sistema mantém a sua classificação estrutural e o facto de ser torsionalmente flexível irá reduzir o seu coeficiente de comportamento em 20%. Tudo isto encontra-se resumido na tabela 6.

Na versão *draft*, o coeficiente de comportamento é composto pelo produto de 3 coeficientes ( $q = q_R \times q_S \times q_D$ ), onde  $q_S$  é sempre 1,5 para edifícios de betão armado. Os valores de  $q_R$  e  $q_D$  encontram-se tabelados na norma, em função do tipo de estrutura e da classe de

ductilidade.

As classes de ductilidade também sofrem alteração: onde na versão atual as classes de ductilidade estão divididas em baixa (DCL), média (DCM) e alta (DCH), na *draft* encontram-se divididas em DC1, DC2 e DC3, em que DC1 corresponde aproximadamente à atual DCL, DC3 à DCM e aparece uma classe intermédia (DC2). Assim, cai a classe de ductilidade mais alta prevista na versão anterior do EC8 (DCH), devido à sua rara aplicação em projeto e às dificuldades de materialização na construção.

Resumidamente, em relação aos critérios de regularidade em planta esta nova versão mantém os mesmos critérios, apenas alterando pequenos pormenores, nomeadamente no critério de esbelteza e no critério da configuração compacta, onde a área entre o contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve não podia exceder 5% da área do piso, passando este limite a 15%.

A classificação da estrutura como irregular em planta pelo atual EC8 poderia levar a uma ligeira redução do coeficiente de comportamento, dependendo do sistema estrutural. Com a versão *draft*, o coeficiente de comportamento deixa de ser influenciado pela irregularidade em planta.

Em relação à regularidade de paredes de enchimento em planta, a versão atual apenas recomenda que deve evitar-se disposições em planta muito irregulares, assimétricas ou não uniformes. A nova versão tornou este critério mais quantitativo, criando assim uma forma de verificação, que consiste em avaliar o comprimento de paredes e a sua posição à direita e à esquerda do centro de rigidez em cada direção, como expresso na equação (1)

$$R_{sym,x} = \left( ABS \left[ \left( \sum l_{infill, left, x, i} d_i^2 - \sum l_{infill, right, x, i} d_i^2 \right) \right] \right) / \left( \sum l_{infill, left, x, i} d_i^2 + \sum l_{infill, right, x, i} d_i^2 \right) \quad (1)$$

Onde:

$l_{infill, left, x, i}$  é o comprimento de uma parede de enchimento paralela ao eixo  $x$  situado à esquerda do eixo  $x$ ;

$l_{infill, right, x, i}$  é o comprimento de uma parede de enchimento paralela ao eixo  $x$  situado à direita do eixo  $x$ ;

$x$  é o eixo na direção  $x$  que passa pelo centro de rigidez da estrutura;

$d_i$  é a distância desde a parede até ao eixo  $x$ .

As estruturas com paredes de enchimento podem ser consideradas regulares em planta se em todos os pisos os rácios de  $R_{sym,x}$  and  $R_{sym,y}$  forem menores de 0,2.

Além disso, a nova versão alerta que painéis de alvenaria com aberturas têm resistência e rigidez muito limitadas. Superestimar a rigidez de um painel com aberturas induz estimativas erradas de períodos, efeitos de torção, etc. Assim, é apresentada nesta versão, um procedimento para o cálculo de um fator de redução para o caso de existência de aberturas nas paredes de alvenaria.

Agora em relação aos critérios de regularidade em altura, o critério da variação da rigidez lateral e da massa em altura é quantificado nesta nova versão, onde a redução não pode ser em mais de 20% em relação ao piso inferior. O último piso está dispensado desta verificação. Também a relação entre a resistência real do piso e a

**Tabela 6** Edifício torsionalmente flexível segundo as 2 versões

	EN 1998-1:2010	draft EN 1998-1-2:2020
Crítérios para que o edifício não seja torsionalmente flexível	$r_i \geq l_{s,i}$	$\frac{r_i}{l_{s,i}} \geq 1$ O primeiro e segundo modo devem ser de translação
Classificação do sistema estrutural quando é torsionalmente flexível	Sistema torsionalmente flexível	Sistema classificado de acordo com os rácios de resistência dos elementos verticais
Coefficiente de comportamento ( $q$ )	DCM: $q = 2$ DCH: $q = 3$	Multiplicado por 0,8, mas não menor que $q_s$

resistência requerida pelo cálculo passa a estar limitada a uma variação de 30%.

Além disso, os critérios sobre recuos e avanços deixam de existir nesta versão. No entanto, na versão *draft*, existe uma cláusula onde é dito que a rigidez e massa individual de cada piso deve ser constante ou reduzir gradualmente em menos de 20% relativamente ao piso inferior, sem variações abruptas, desde a base até pelo menos o penúltimo piso. Este limite de 20% veio substituir e simplificar as regras anteriores.

Em ambas as versões, o coeficiente de comportamento é multiplicado por 0,8 na presença de irregularidades em altura.

## 6 Análise de casos de estudo

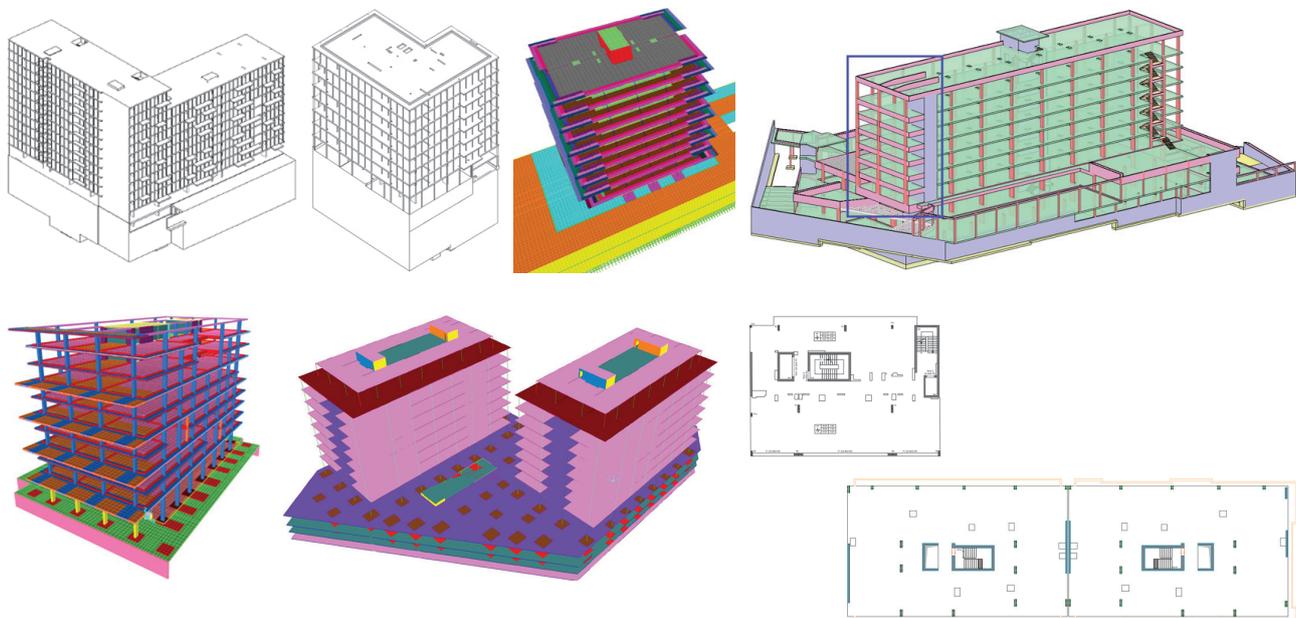
Neste trabalho, procurou-se criar uma base de dados de edifícios de betão armado, de diferentes zonas do país, que se espera que

seja alimentada em trabalhos futuros, uma vez que o tempo para a realização deste estudo era limitado.

Assim, analisou-se um conjunto de 8 edifícios em betão armado (Figura 2), onde se fez a caracterização estrutural e verificação dos critérios de regularidade estrutural segundo a aplicação das duas versões diferentes do EC8, comparando-as.

Em relação à classificação do sistema estrutural, todos os edifícios analisados são classificados pela sua tipologia estrutural como Sistema de Paredes em ambas as direções de análise. Efetivamente, esta classificação atualmente tende a ser recorrente em edifícios altos, onde surgem caixas de elevadores. Por questões arquitetónicas e funcionais, em muitas situações estas localizam-se numa zona central do edifício, surgindo a necessidade de incorporar outras paredes próximas das fachadas do edifício para contraventamento e melhoria do comportamento torsional.

Além disso, 7 dos 8 edifícios analisados são classificados como torsionalmente flexíveis através do procedimento simplificado com



**Figura 2** Casos de estudo

base nas inércias dos elementos verticais. É de referir que em alguns edifícios a condição só não é verificada em 1 ou 2 pisos para uma das direções apenas. Mas, nas análises desenvolvidas, considerou-se o prescrito no EC8, onde se refere que a verificação do critério deve ser feita para todos os pisos e para ambas as direções. Reconhece-se que nos casos em que esta condição não seja cumprida nos últimos pisos, poder-se-ia manter a classificação como não torsionalmente flexível. Obviamente que o não cumprimento deste critério nos primeiros pisos, e particularmente no rés-do-chão, poderá condicionar o desempenho do edifício restringindo a capacidade de redistribuição dos esforços na estrutura.

A estrutura de todos os edifícios analisados conduziu a uma classificação como edifícios irregulares em planta, para ambas as versões. O critério de excentricidade estrutural e raio de torção é o mais exigente para os edifícios analisados. Este critério é composto por 2 condições, sendo uma delas a mesma que se aplica para a verificação mínima de torção, logo, todos os edifícios que sejam torsionalmente flexíveis vão ser classificados como irregulares em planta.

A tabela 7 apresenta os resultados da verificação dos critérios de regularidade em planta dos 8 edifícios analisados, quer pela versão atual, quer pela versão *draft* do EC8.

Embora se tenha estudado a influência das paredes de alvenaria de enchimento em apenas 3 edifícios, refira-se que estes são bastante diferentes, o que permitiu identificar e avaliar as dificuldades na aplicação do procedimento de verificação. Foram analisados casos em que as paredes de enchimento podem reduzir os efeitos de torção no edifício, apesar de que nos casos de estudo analisados essa redução é pouco significativa, uma vez que se trata de edifícios com poucas paredes. Nas análises desenvolvidas neste estudo fez-se uma quantificação simplificada da influência da presença das

paredes de enchimento na regularidade em planta, comparando a excentricidade do sistema estrutural com e sem paredes.

O novo procedimento incluído na versão *draft* propõe uma fórmula que tem em conta as paredes de enchimento à esquerda e à direita do centro de rigidez da estrutura do edifício. A filosofia por trás desse novo procedimento avalia a posição do centro de rigidez das paredes relativamente ao centro de rigidez da estrutura. Idealmente, dever-se-ia avaliar a alteração da posição do centro de rigidez devido às paredes. Desta forma, estar-se-ia a considerar também a influência do número de paredes e da sua rigidez relativa, comparativamente com a rigidez da estrutura.

Por outro lado, as implicações que resultam da quantificação da posição relativa dos centros de rigidez da estrutura e das paredes em termos das exigências ao nível do modelo a considerar na análise, ou seja, a exigência de considerá-las, ou não, no modelo, também deveria refletir o peso relativo da rigidez das paredes.

A tabela 8 apresenta os resultados, em percentagem, da verificação dos critérios de regularidade em altura dos 8 edifícios analisados.

Conclui-se também que apenas 25% dos edifícios analisados possuem sistemas resistentes às ações laterais contínuos desde a base até ao topo do edifício. Tratando-se de edifícios moderadamente altos, em muitas situações é difícil garantir esta continuidade por questões arquitetónicas.

O critério que avalia a variação da rigidez em altura não foi cumprido em muitos dos edifícios, principalmente devido à maior rigidez do piso 0 em relação ao piso 1, promovido pela diferença do pé-direito do piso térreo relativamente ao primeiro piso. O critério que avalia a variação da massa em altura é, de entre os critérios de regularidade em altura, aquele que mais facilmente se cumpre nos edifícios analisados.

**Tabela 7** Resultados da verificação dos critérios de regularidade em planta

Critérios	Direção	EC8 2004 (EN 1998-1)		<i>draft</i> EN 1998-1-2:2020	
		X (%)	✓ (%)	X (%)	✓ (%)
Rigidez lateral aproximadamente simétrica	xx	75	25	75	25
	yy	50	50	50	50
Massa aproximadamente simétrica	xx	25	75	25	75
	yy	37,5	62,5	37,5	62,5
Configuração em planta compacta	-	50	50	25	75
Condição de diafragma rígido	xx	12,5	87,5	12,5	87,5
	yy	37,5	62,5	37,5	62,5
Esbelteza	-	12,5	87,5	0	100
Critério de excentricidade estrutural e raio de torção	xx	62,5	37,5	62,5	37,5
	yy	62,5	37,5	62,5	37,5
Paredes de enchimento de alvenaria	xx	66,6	33,3	66,6	33,3
	yy	66,6	33,3	33,3	66,6

**Tabela 8** Resultados da verificação dos critérios de regularidade em altura

Critérios	Direção	EC8 2004 (EN 1998-1)		draft EN 1998-1-2:2020	
		X (%)	✓ (%)	X (%)	✓ (%)
Sistemas resistentes a ações laterais contínuo até ao topo	-	75	25	75	25
Rigidez lateral constante ou redução gradual	xx	75	25	75	25
	yy	87,5	12,5	87,5	12,5
Massa constante ou redução gradual	-	37,5	62,5	25	75
Critério dos recuos e avanços	-	62,5	37,7	-	-
Paredes de enchimento de alvenaria	xx	0	100	33,3	66,6
	yy	0	100	33,3	66,6

Relativamente ao critério que avalia os eventuais recuos e avanços, destaca-se que este critério não é cumprido em cerca de 63% dos edifícios analisados. Refira-se que apesar da preocupação com este fator potenciador da irregularidade, o regulamento não clarifica as dimensões mínimas para as quais este aspeto deverá ser considerado. E, portanto, uma pequena área de saliência ou reentrância na planta do edifício facilmente leva à qualificação do edifício como irregular. A nova versão do regulamento (*draft*) não atende a esta preocupação.

A influência das paredes de alvenaria de enchimento no comportamento do edifício relativamente à irregularidade em altura, foi analisada apenas em 3 edifícios. Os resultados mostram que as alterações propostas na versão *draft* vem limitar o cumprimento deste critério. Embora os edifícios analisados tenham relativamente poucas paredes de alvenaria, a área de paredes de alvenaria do piso 0 e do piso 1 variam em mais de 30% em 2 edifícios, fazendo com que assim não seja cumprido o critério. Este nível de variação é comum em edifícios destinados a comércio/serviços/garagens ao nível do rés-do-chão, ou então em hotéis, por exemplo. O coeficiente de majoração dos esforços sísmicos proposto em ambas as versões do EC8, no caso de edifícios com poucas paredes, não se demonstrou ser condicionante.

Da análise global da aplicação das duas versões do regulamento aos oito edifícios estudados, salienta-se que embora haja critérios específicos que podem resultar em classificação não alinhada nas duas versões, a classificação final do edifício como regular ou irregular, quer em altura quer em planta, resulta consistente em todos os edifícios analisados. Ainda assim, a nova versão do Eurocódigo 8 tende a ser menos penalizadora em relação a versão atual.

## 7 Conclusões

Algumas das alterações propostas na versão *draft*, e apresentadas neste documento, vêm ao encontro de parte das dificuldades e preocupações apontadas pelos projetistas, nomeadamente introduzindo para alguns critérios de regularidade a sua quantificação e limites de verificação de forma a minimizar os potenciais erros associados a diferentes interpretações. Ainda assim, inevitavelmente, os resultados da aplicação de alguns dos critérios, bem como a sua interpretação, dependerão da sensibilidade do projetista para o problema, da sua experiência e do seu nível de conhecimento.

Refira-se que alguns dos critérios contemplados no Eurocódigo 8, por não terem associados processos que quantifiquem a sua influência, podem ser excessivamente penalizadores na classificação final resultante para a regularidade em altura e em planta, e na redução do coeficiente de comportamento máximo admitido.

Ainda assim, realça-se a atenção que a nova versão do Eurocódigo 8 dá à quantificação de alguns critérios de irregularidade, e na consequente clarificação dos procedimentos de cálculo para atender a estas irregularidades.

É importante salientar que as conclusões retiradas dos casos de estudo analisados devem ser restringidas a este estudo, reconhecendo-se que estas são limitadas pelo número de análises que foi possível realizar no tempo definido para o desenvolvimento do presente estudo.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 Financiamento programático – UIDP/04708/2020

da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). O segundo autor é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através de bolsa de pós-doutoramento com referência SFRH/BPD/115352/2016.

Agradece-se à empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda., por ter colaborado com o primeiro autor no âmbito da sua dissertação [26] desenvolvida na vertente empresarial cujo conteúdo é resumido neste artigo.

## Referências

- [1] Moura, F. – *Análise e dimensionamento sísmico de estruturas porticadas atendendo à irregularidade em altura de acordo com diferentes regulamentos*. 2013: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
- [2] Romão, X.; Costa, A.; Delgado, R. – *Comportamento sísmico de pórticos de betão armado com recuados*. in 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Universidade do Minho. 2004.
- [3] Rodrigues, H., et al. – *Sismo de L'Aquila de 6 de Abril de 2009. Ensinaamentos para Portugal*. in 8º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. 2010.
- [4] De Luca, F., et al. – *The structural role played by masonry infills on RC building performances after the 2011 Lorca, Spain, earthquake*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014. 12(5): p. 1999-2026.
- [5] Roeslin, S.; Ma, Q.; García, H. – *Damage assessment on buildings following the 19th September 2017 Puebla, Mexico Earthquake*. 2018. 4: p. 72.
- [6] RSA – *Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes, Decreto-Lei n.º 235/83 de 31 de Maio*. 1983: Lisboa.
- [7] REBAP – *Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*. 1983: Lisboa.
- [8] CEN – *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 1998-1. 2004: Brussels, Belgium.
- [9] Dražić, J.; Vatin, N. – *The Influence of Configuration on to the Seismic Resistance of a Building*. Procedia Engineering, 2016. 165: p. 883-890.
- [10] Arnold, C. – *Building configuration: The architecture of seismic design*. 1984. 17(2).
- [11] Elnashai, A.S.; Di Sarno, L. – *Fundamentals of earthquake engineering*. 2008: Wiley New York.
- [12] Bento, R.; Azevedo, J. – *Behaviour coefficient assessment for soft storey structures*. in *Proceedings of the twelfth world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, Paper*. 2000.
- [13] Kappos, A.; Scott, S. – *Seismic assessment of an R/C building with setbacks using nonlinear static and dynamic analysis procedures*. 6<sup>th</sup> SECED Conference, Seismic Design Practice into the Next Century, Oxford, UK. 1998.
- [14] Das, S. – *Seismic design of vertically irregular reinforced concrete structures*, in Department of Civil Engineering. 2000: North Carolina State University: Raleigh.
- [15] FEMA – *Assessing Seismic Performance of Buildings with Configuration Irregularities: Calibrating Current Standards and Practices*. 2018: Washington, D.C.
- [16] NTC – *Norme tecniche per le costruzioni*. 2018, MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI: Ministerial Decree, 17 January 2018, Roma.
- [17] AFAD – *Turkish Building Earthquake Code (TDBY-2018)*. 2018: Ankara, Turkey.
- [18] CFE – *Manual of Civil Structures in Mexico: Seismic Design. Federal Electricity Commission*. 2015: Cuernavaca, Morelos, Mexico.
- [19] BIS – *Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures (IS 1893-Part 1), in Government of India, Ministry of Earth Sciences*. 2002: New Delhi, India.
- [20] ASCE – *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE Standard ASCE/SEI 7-10)*. 2016: American Society of Civil Engineers, Reston, USA.
- [21] NCh433 – *Diseño sísmico de edificios*. 2009: Chile.
- [22] CSNZ – *Structural design actions, Part 5: Earthquake Actions*. 2004: New Zealand.
- [23] NRC – *National Building Code of Canada*. 2015: Ottawa, ON, Canada.
- [24] Otani, S. – *Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan*. 2000. 2(2): p. 47-56.
- [25] CEN/TC250 – *Draft EN1998-1-2 - Eurocode 8: — Design of structures for earthquake resistance — Part 1-2: Rules for new buildings*. 2020
- [26] Lima, A. – *Irregularidades estruturais no dimensionamento sísmico de edifícios de betão armado: Discussão das exigências regulamentares e casos de estudo*. 2020: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.