

11

Princípios básicos para a conceção de estruturas de edifícios pré-fabricados em zonas sísmicas

*Carlos Chastre*¹, *Válter Lúcio*²

Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

*Spyros Tsoukantas*³

Universidade Técnica de Atenas, Grécia

11.1 Introdução

Um projeto estrutural adequado é fundamental para que a satisfação dos requisitos fundamentais de uma estrutura sejam alcançados sob a ação de um sismo.

Como é bem conhecido, o projeto de uma estrutura inclui três fases distintas, nomeadamente a conceção estrutural, a análise (cálculo de efeitos das ações, tendo também em consideração a ação sísmica) e o dimensionamento – verificação.

¹ Engenheiro Civil, Mestre em Eng. de Estruturas, Doutorado em Eng. Civil.
Professor Auxiliar na Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.
Membro da Comissão 6 - Prefabrication da *fib*.

² Engenheiro Civil, Mestre em Eng. de Estruturas, Doutorado em Eng. Civil
Pró-Reitor da Universidade NOVA de Lisboa.
Professor Associado na Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.
Sócio Gerente da empresa VERSOR - Consultas, Estudos e Projetos Lda.
Membro da Comissão 6 - Prefabrication da *fib*. Coordenador do TG 6.14 da *fib*.

³ Engenheiro Civil, Professor na Universidade Técnica Nacional de Atenas, Grécia.
Membro da Comissão 6 Prefabrication da *fib*. Coordenador do TG 6.10 da *fib*.

As grandes incertezas relacionadas com os dados da ação sísmica combinadas com as alterações de rigidez do sistema estrutural que ocorrem durante fortes sismos, pode reduzir drasticamente o nível de confiança dos resultados da análise estrutural realizada.

Para um dimensionamento – verificação de confiança, é fundamental que exista uma modelação apropriada dos mecanismos locais do comportamento estrutural, principalmente das ligações (deslizamento por corte, aderência sob carga cíclica, etc), bem como da qualidade de materiais e das dimensões das secções transversais dos elementos estruturais. E o significado destes modelos aparece mais crucial no caso de ações sísmicas sob as quais uma elevada degradação das leis constitutivas (dependendo do nível da ação sísmica) deverá ter lugar, levando a uma alteração drástica tanto na rigidez como nas características da resposta da estrutura.

Por outro lado, deve ser previsto o comportamento não linear desenvolvido num sistema estrutural em resposta às ações sísmicas. Ou seja, devem ser tomados cuidados especiais para reforçar a filosofia de "capacity design".

Por outro lado, a "construção" e "manutenção" de qualquer estrutura não são convencionalmente cobertos por meio de cálculos específicos e/ou disposições do código.

A experiência baseada na história da engenharia sísmica e a experiência recente sobre o comportamento das estruturas de betão armado mostrou que, apesar da enorme evolução dos meios informáticos, a satisfação dos requisitos fundamentais do projeto sísmico não pode ser alcançada diretamente por meio de cálculos, tendo-se verificado que a observância de alguns conceitos básicos de projeto é mais importante.

Este capítulo enfatizará a grande importância da primeira etapa do projeto, a chamada, conceção estrutural. Ou seja, cada análise tem que ser feita de acordo com uma conceção estrutural pré-concebida; várias decisões deverão ser tomadas *a priori*, antes de qualquer procedimento analítico, como por exemplo, minimizar incertezas relacionadas com a resposta sísmica da estrutura.

11.2 Princípios básicos da conceção estrutural em regiões sísmicas

A experiência dos últimos sismos demonstrou que o comportamento das estruturas pré-fabricadas que foram projetadas tendo em consideração

alguns princípios básicos da conceção estrutural satisfaz muito bem os requisitos fundamentais para evitar o colapso e a limitação dos danos, dentro de custos aceitáveis.

Nas zonas sísmicas o engenheiro de estruturas deve fazer uma análise mais profunda das cargas e do comportamento estrutural da estrutura. No entanto, na fase de conceção estrutural é essencial que sejam considerados os seguintes pontos:

a. Simplicidade estrutural

Na verdade, a simplicidade estrutural e a clareza na forma de um sistema estrutural são essenciais desde as primeiras fases da conceção de um edifício pré-fabricado, fornecendo caminhos alternativos ou diretos para a transmissão das cargas sísmicas. As incertezas na modelação, análise, dimensionamento, pormenorização e previsão da resposta sísmica da estrutura são bastante minimizadas quando existe um sistema estrutural simples.

A simplicidade estrutural caracteriza-se pela uniformidade e regularidade na configuração do sistema estrutural em planta e/ou em altura (Figura 11.1).

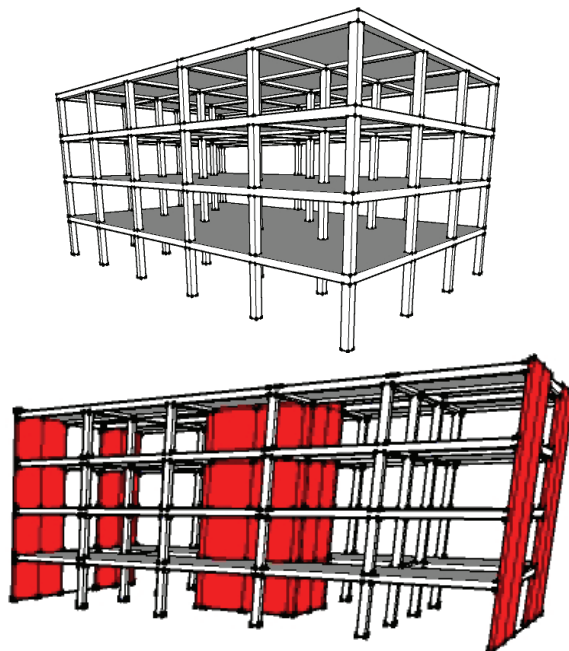


Figura 11.1 Dois exemplos esquemáticos de simplicidade estrutural [1]

b. Uniformidade-regularidade em planta

A regularidade em planta é muito afetada pela configuração geométrica do edifício. Assim:

- A configuração deve ser compacta e clara. Cantos reentrantes, bordos salientes e formas não-uniformes (L, Π, E, \sqcap) devem ser evitados (Figura 11.2), ou, em caso contrário, limitados e especialmente tratados (Figura 11.3). A este respeito e de acordo com a dimensão e a forma de toda a estrutura em planta (imposta por aspetos arquitetónicos), pode ser necessário subdividir toda a estrutura em unidades dinamicamente independentes por meio de juntas estruturais (Figura 11.3). Nesse sentido, deve-se ter um cuidado especial no afastamento a considerar para as juntas estruturais de modo a evitar efeitos perigosos de batimento entre cada uma das unidades estruturais;

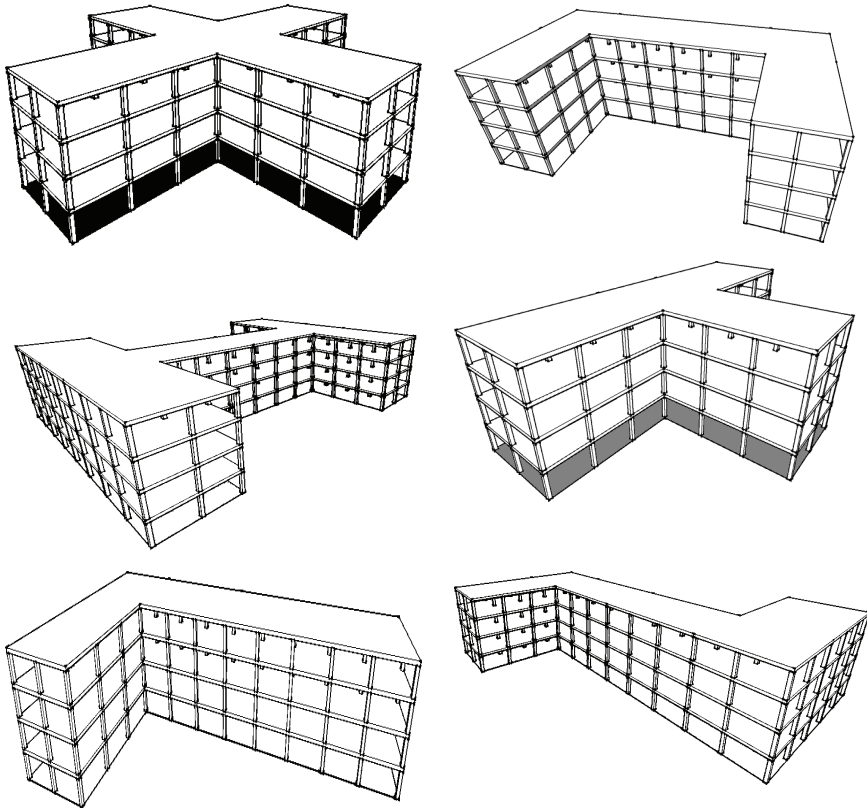
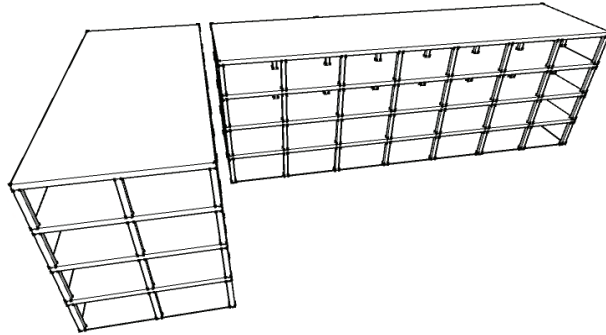
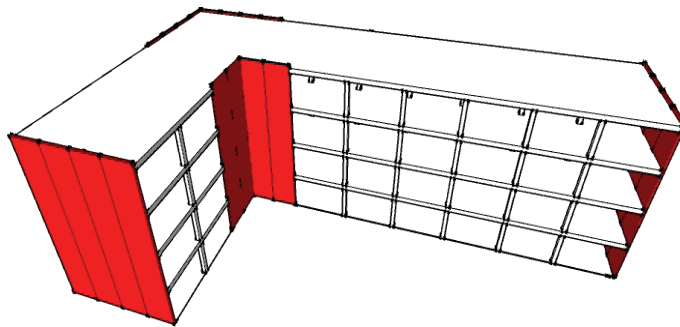


Figura 11.2 Configuração do edifício em planta a ser evitada ou limitada e tratada em pormenor [1].

- A proporção entre o comprimento e a largura do edifício não deve ser superior a 4;
- A distribuição de rigidez lateral e da massa deve ser quase simétrica em relação aos dois eixos ortogonais (Figura 11.7 e Figura 11.8).



a) Separação por meio de juntas estruturais



b) Inclusão de elementos resistentes com grande rigidez

Figura 11.3 Soluções para o caso de cantos reentrantes [1].

Na Figura 11.4 podem observar-se os danos provocados na *West Anchorage High School* pelo sismo que ocorreu no Alasca em 1964. A não uniformidade do edifício em planta deu origem à concentração de tensões na ligação entre os dois corpos deste edifício de pequena altura, em forma de L, danificando o diafragma de betão ao nível do último piso.



Figura 11.4 West Anchorage High School, sismo no Alasca, 1964. [FONTE: NISEE]



Figura 11.5 Danos num canto reentrante após um sismo de magnitude de 7.8 que assolou Lanzhou na China em 2008. [FONTE: AP Photo / CHINA OUT]

No Hospital de Sepulveda em Los Angeles (Figura 11.6) as juntas estruturais do edifício foram separadas. Contudo, durante um sismo de magnitude 6.8 que ocorreu nesta região, os dois blocos continuaram a bater. Os danos estruturais foram suficientes para provocar a evacuação temporária de alguns edifícios neste complexo. Nesse sentido, um cuidado especial deve ser dado ao afastamento das juntas estruturais para evitar estes efeitos perigosos de batimento entre cada uma das unidades estruturais.



Figura 11.6 Danos observados no edifício do Hospital de Sepulveda, depois de um sismo de magnitude 6.8 que ocorreu em Vale de São Fernando (Los Angeles, EUA).

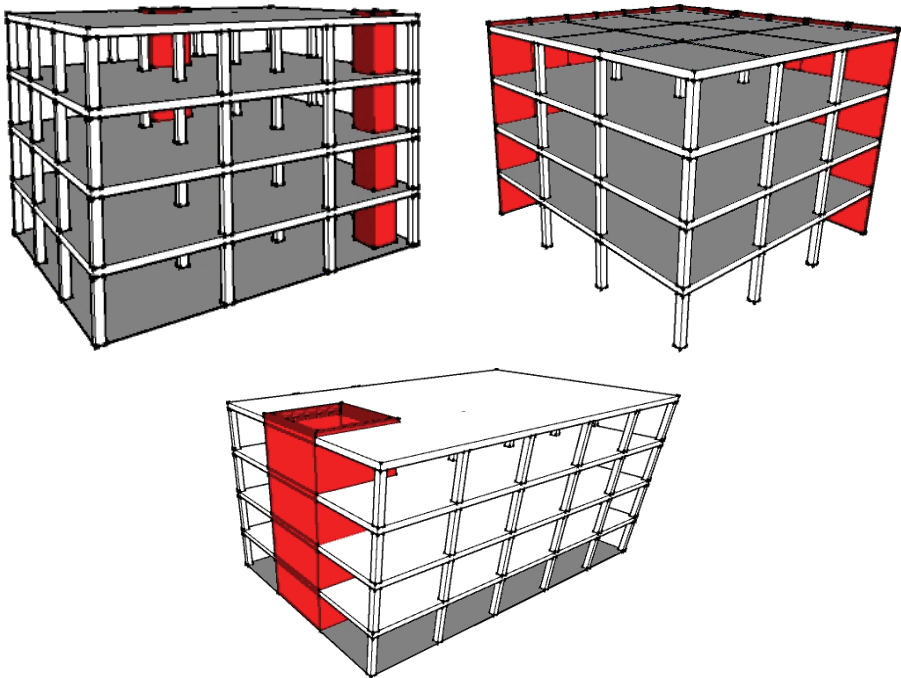


Figura 11.7 Configuração das paredes resistentes a forças horizontais a ser evitada devido ao fato de elas não serem simétricas em planta relativamente aos dois eixos ortogonais [1].

A uniformidade-regularidade em planta:

- leva à distribuição uniforme dos elementos estruturais em planta, o que contribui para a melhor distribuição de rigidez e da massa do sistema estrutural;
- aumenta a redundância e contribui para a dissipação de energia bem distribuída em toda a estrutura;
- reduz os possíveis efeitos de torção. Uma curta distância entre o centro de rigidez e o centro de massa é a melhor forma de evitar efeitos indesejáveis de torção.

A diminuição apropriada da distância entre o centro de rigidez e o centro de massa é a forma de quantificar e verificar aproximadamente esses efeitos indesejáveis. No entanto, deve ser dada especial atenção nos edifícios altos à posição do centro da rigidez e ao raio de torção. Estas características são necessárias para obter informações sobre os efeitos torção do edifício e são viáveis apenas sob certas restrições.

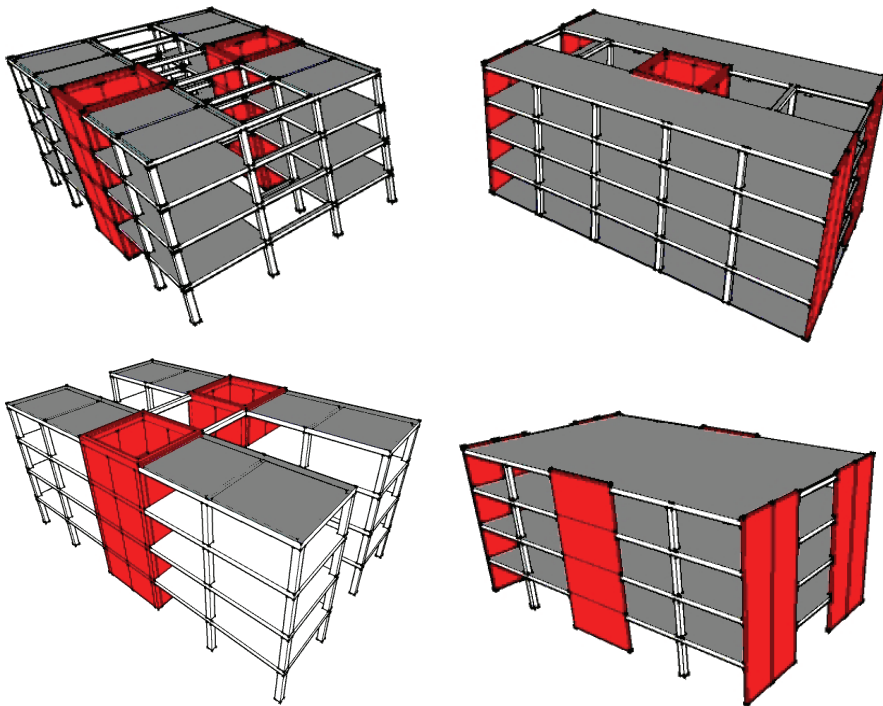


Figura 11.8 Exemplos de edifícios com distribuição simétrica em planta, da rigidez lateral e da massa [1].

c. Uniformidade em altura – regularidade

Para um edifício ser caracterizado como regular em altura, deve-se ter em conta que

- quase todos os sistemas resistentes laterais, tais como pilares, paredes estruturais ou pilares de pórtico, devem ser executados sem interrupção desde as suas fundações até ao topo do edifício (Figura 11.8);
- quer a rigidez lateral, quer a massa dos diversos pisos devem permanecer constantes ou reduzir gradualmente;
- é necessário assegurar um caminho natural das forças, evitando vigas em quincôncio ou (pior) pilares em quincôncio.

A observação dos danos e a análise das estruturas verificada nos sismos passados permite identificar um grupo de causas que estão estreitamente ligadas à falta dos princípios básicos da concepção estrutural. Causas que devem ser evitadas, tanto quanto possível (Figura 11.8 a Figura 11.11):

- Piso térreo vazado;
- Piso superior vazado;
- Contraventamento assimétrico;
- Descontinuidades na rigidez e resistência;
- Colunas curtas.

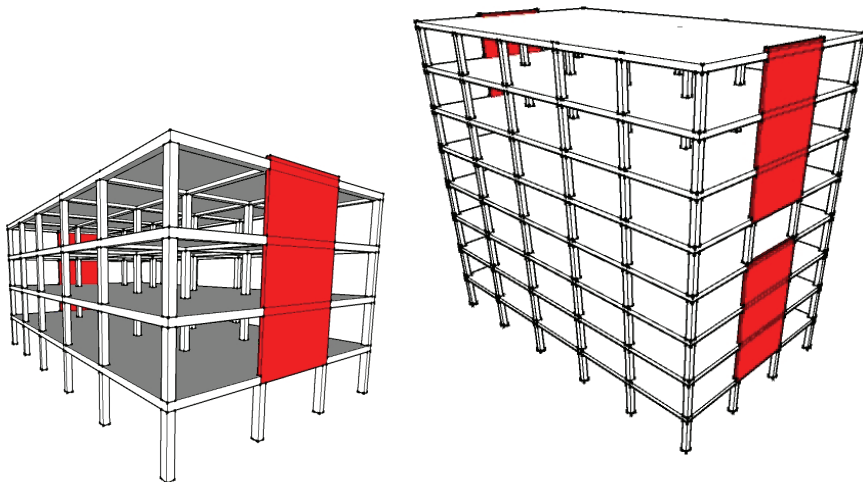


Figura 11.9 Exemplos de edifícios a serem evitados devido aos pisos térreos e superiores vazados [1]

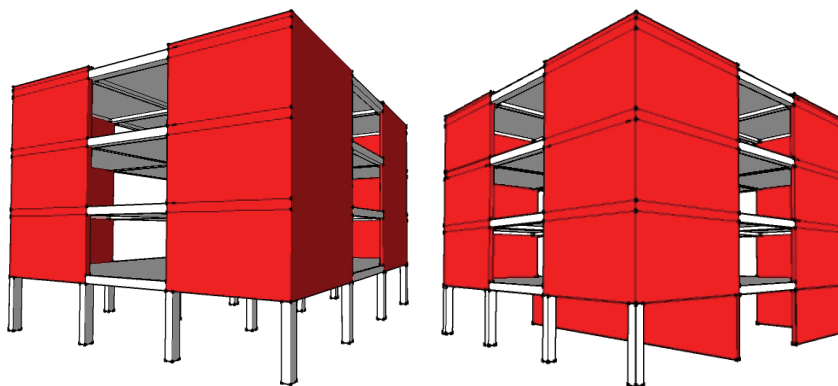


Figura 11.10 Exemplos de edifícios a evitar com descontinuidades na rigidez e na resistência em altura [1].

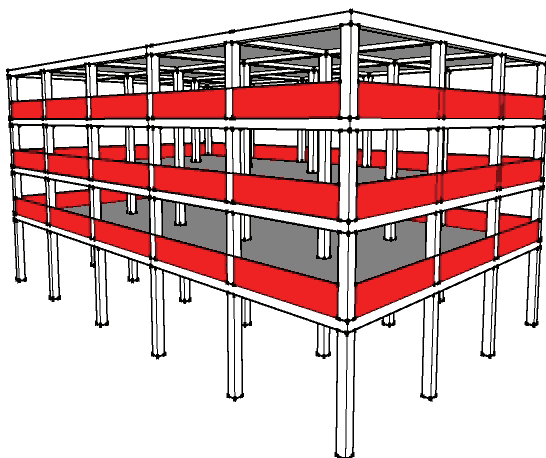


Figura 11.11 Exemplo de edifício com colunas curtas [1].

Nas Figura 11.12 a Figura 11.16 mostram-se alguns exemplos de edifícios cuja falta de regularidade em altura provocou o colapso dos mesmos. Os edifícios das Figura 11.12 e Figura 11.13 colapsaram durante o sismo de Kobe no Japão (1995) devido a descontinuidades na rigidez e resistência nos pisos intermédios. O edifício do Hospital Olive View (Figura 11.14) colapsou durante o sismo de San Fernando (1971) porque o piso térreo era vazio. Uma outra situação frequente, neste caso em parques de estacionamento, é o caso das vigas altas da fachada criando uma situação de viga-forte, pilar-fraco como se mostra na Figura 11.15, a qual levou a uma danificação muito severa dos pilares desta estrutura durante o sismo de Whittier Narrows em Los Angeles (1987).



Figura 11.12 Sismo de Kobe, 1995, edifício mostrando o colapso total do 3º piso [fonte: NISEE]



Figura 11.13 Sismo de Kobe, 1995, colapso parcial de edifício de apartamentos [fonte: NISEE]



Figura 11.14 Hospital Olive View, sismo de San Fernando, 1971, mostrando a deformação excessiva dos pilares acima do nível do solo [fonte: NISEE]



Figura 11.15 Estrutura do parque de estacionamento danificada no sismo de Whittier Narrows (Los Angeles), 1987. Vigas de fachada altas criando uma situação de viga-forte, pilar-fraco. [fonte: NISEE]

Outra situação que ocorre frequentemente é a construção de edifícios adjacentes com alturas diferentes e com os pisos a níveis diferenciados, o que faz com que durante o sismo, no caso de os edifícios estarem a vibrar em oposição de fase, possa ocorrer o martelar do diafragma rígido de um dos edifícios contra os pilares do outro edifício. Uma das consequências está ilustrada na Figura 11.16, com a destruição de um piso intermédio de um hotel durante o sismo.

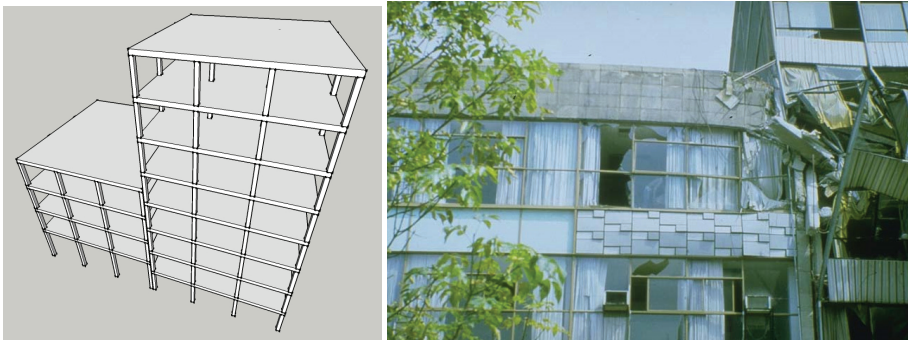


Figura 11.16 Esquema ilustrativo (à esq.) e fotografia mostrando a destruição do piso intermédio do Hotel de Carlo. [Crédito da foto: C. Arnold, Building Systems Development, Inc.]

d. Resistência bi-direcional, resistência à torção e rigidez

Cada sistema estrutural deve ser capaz de resistir a ações sísmicas em ambas as direções. Isso pode ser obtido através da adequada disposição dos elementos estruturais (pilares e/ou paredes) numa grelha ortogonal, fornecendo uma resistência e rigidez quase semelhante em ambas as direções (Figura 11.8). As irregularidades estruturais que provoquem torção devem ser evitadas, tanto quanto possível (Figura 11.7). Durante a fase de concepção deve-se ter um cuidado especial na posição dos elevadores e escadas no sistema estrutural. Estas zonas do edifício estão normalmente envoltas em núcleos com paredes resistentes (para evitar o colapso e assegurar uma evacuação rápida após um evento sísmico adverso) e afetam muito o comportamento em torção do sistema estrutural, dependendo da sua posição e da dos outros elementos estruturais verticais no layout do edifício (Figura 11.7).

Nas Figura 11.17 e Figura 11.18 mostram-se dois exemplos em que não se teve muito em consideração este aspeto. Na Figura 11.17, à esquerda mostra-se o edifício após o sismo e, à direita, está a planta mostrando o centro de

massa (CM), o centro de resistência (CR) e a grande excentricidade existente entre o centro de massa e centro de rigidez.

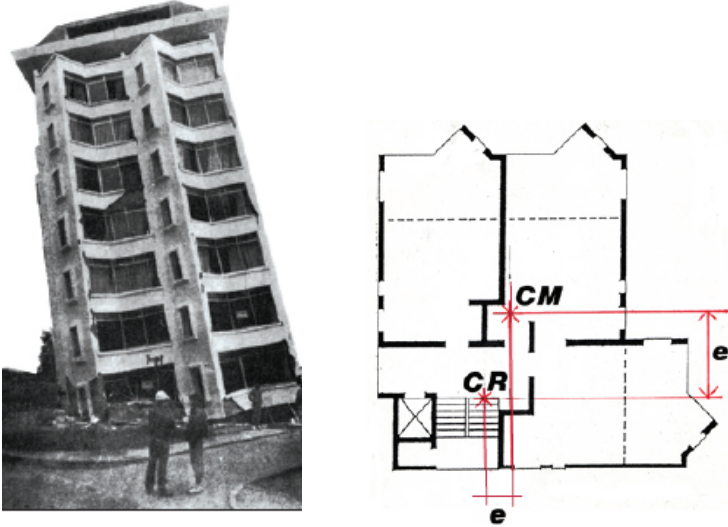


Figura 11.17 À esquerda, o edifício após o sismo. À direita, planta mostrando o centro de massa (CM), o centro de resistência (CR) e a excentricidade ao longo dos dois eixos [fonte: EERI].

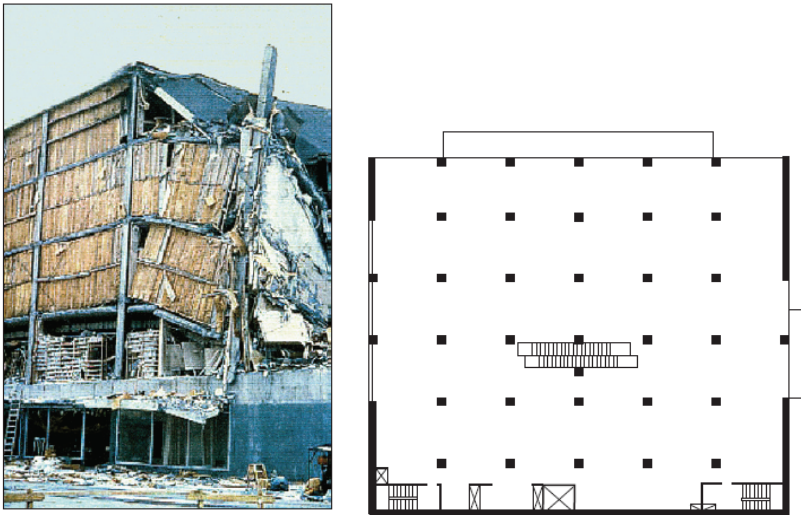


Figura 11.18 Penney's store, sismo de Anchorage, Alasca, 1964 [FONTE: J.L. Stratta.]

e. Ligações adequadas e seguras em construções pré-fabricadas

As ligações em edifícios pré-fabricados são muitas vezes projetadas apenas para as cargas gravíticas. Estes edifícios podem, portanto, ser muito vulneráveis a sismos. Frequentemente a causa do colapso está associada a comprimentos curtos dos apoios, ferrolhos ausentes ou pouco resistentes e a apoios com restrições insatisfatórias ao derrubamento das vigas (**Figura 11.19**). Assim, as pontes rolantes devem ter um comprimento mínimo nos apoios, em conformidade com os regulamentos de construção antissísmica e os apoios fixos devem ter ferrolhos projetados para as forças, tendo em atenção a capacidade resistente suplementar das zonas que plastificam (Método de capacity design). Além disso, em geral, as vigas devem ser protegidas contra os movimentos laterais de derrubamento. No caso de pisos pré-fabricados de betão, o betão armado da camada de regularização colocada em obra, deve cobrir e ligar todos os elementos do piso por forma garantir um diafragma rígido [2].

Em edifícios pré-fabricados de um só piso com estrutura reticulada - geralmente o caso de edifícios industriais com altura considerável - os pilares na maioria das situações constituem o sistema resistente horizontal do edifício. Nessas situações é aconselhável que os pilares sejam concebidos e calculados para serem ligados no seu topo por vigas e/ou elementos da cobertura em ambas as direções.

Nas Figura 11.19 a Figura 11.22 apresentam-se alguns exemplos de colapsos de edifícios industriais pré-fabricados em que os pressupostos anteriores não foram cumpridos. Após os sismos de 1999 na Turquia constatou-se que alguns edifícios foram construídos de acordo com projeto importado de países em que a ação sísmica não é condicionante, o que levou ao colapso dos mesmos como se pode observar nas Figura 11.21 e Figura 11.22 [3].



Figura 11.19 Os ferrolhos no topo dos pilar (à esquerda) não permitiram a estabilidade das vigas principais, o que levou ao seu derrube e conseqüente colapso do edifício industrial durante um sismo em 1998 na Turquia [2]



Figura 11.20 Danos na estrutura do parque de estacionamento do Northridge Fashion Center (1994), sismos de San Fernando Valley, 1971, 1994



Figura 11.21 Estado do edifício antes e após o sismo de Kocaeli em 1999 na Turquia [3].



Figura 11.22 Colapso do pilar central em portico de vão duplo (sem danos na foto da esquerda, após o colapso na foto da direita). Sismo de agosto de 1999 em Adapazarı na Turquia [3].

f. Fundações adequadas

Nas situações em que possam ocorrer sismos, a interação entre o solo e a superestrutura deve ser cuidadosamente estudada. A concepção e a execução das fundações devem assegurar que todo o edifício esteja sujeito a uma excitação sísmica uniforme.

A forma de tratar os elementos da fundação depende diretamente da forma como a superestrutura é concebida:

- Quando as ações de cálculo dos elementos de fundação da estrutura resultam de considerações de capacidade resistente que têm em conta o desenvolvimento de possível capacidade resistente suplementar, então nenhuma dissipação de energia deve ser considerada para esses elementos;
- Caso contrário, para o cálculo dos elementos de fundação devem ser seguidas as regras de cálculo correspondentes aos elementos da superestrutura na base dos correspondentes efeitos da ação para a situação do cálculo sísmico;
- Neste último caso, para os lintéis e vigas de fundação, o esforço de corte de cálculo tem que vir em função da capacidade resistente.
- No caso específico dos sistemas pré-fabricados com estrutura porticada, a fundação é normalmente composta por sapatas individuais.
- No caso de se estar em presença de solos rochosos com boas condições de fundação, as seguintes regras permitem um bom comportamento da estrutura:
 - i) Os lintéis devem ser colocados entre fundações individuais nas duas direções principais;
 - ii) Devem ser evitados diferentes níveis de fundação (Figura 11.23). Quando isso não é possível, deve ser realizada uma pormenorização especial, por forma a garantir os movimentos horizontais usuais dos diferentes níveis de fundação.

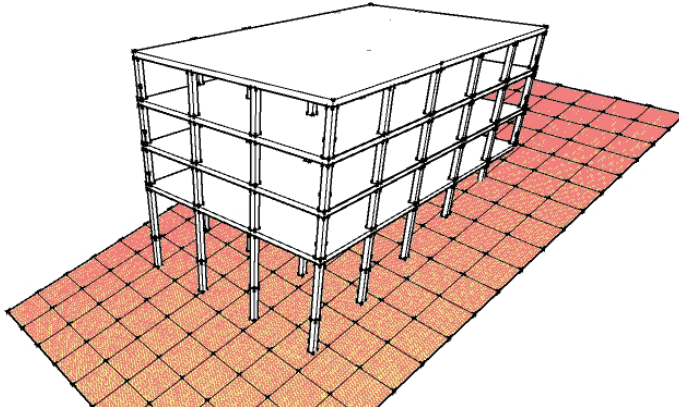


Figura 11.23 Edifício com fundações a diferentes níveis (deve ser evitado) [1].

g. *Influência das paredes divisórias ou de fachada e dos painéis pré-fabricados de fachada*

Ao projetar estruturas pré-fabricadas, deverão ser tomadas medidas apropriadas, particularmente nos sistemas estruturais reticulados com interação com os elementos secundários, como paredes divisória, de fachada ou com os painéis pré-fabricados de fachada. Devendo ser dada especial atenção à irregularidade sísmicamente induzida (especialmente no piso térreo) devido a estes elementos secundários.

- Em geral, elementos secundários como os mencionados acima têm que ser ligados aos elementos estruturais por forma a não perturbarem a resposta da estrutura (esperada de acordo com o cálculo) durante o evento sísmico;
- No caso particular dos painéis de alvenaria, que em regra estão em contacto com os pilares, o possível colapso por corte desses pilares induzido pela escora diagonal que se forma nos painéis de alvenaria deve ser tido em conta. Além disso, também se deve ter em consideração os efeitos dos pilares curtos na estrutura devido à configuração dos painéis de alvenaria;

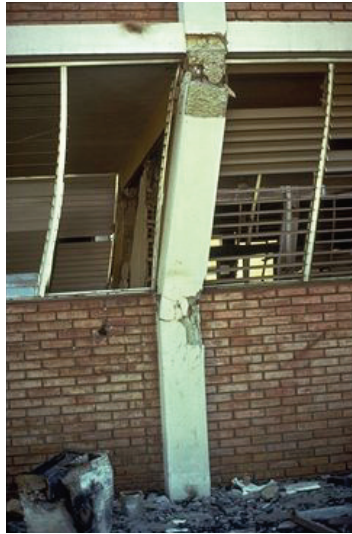


Figura 11.24 A configuração do painel de alvenaria provocou a rotura do pilar durante um sismo nos EUA [EERC]

- A contribuição dos painéis de alvenaria para a resistência lateral do sistema estrutural é geralmente negligenciada na análise. No entanto, deve ser dada especial atenção às características mecânicas das ligações dos elementos estruturais com os painéis de alvenaria. Por vezes, os painéis de alvenaria, dependendo da sua natureza e das suas ligações, podem alterar o comportamento expectável do sistema estrutural, quando não se toma em consideração a sua contribuição;
- Dependendo da natureza e posição na estrutura dos painéis de alvenaria, devem ser tomados em consideração possíveis efeitos de torção na resposta da estrutura devido a esses painéis.
- Também devem ser tidas em consideração as possíveis consequências que possam ser causadas por irregularidade em planta e em altura por parte dos painéis de alvenaria da fachada, das divisórias, ou dos painéis pré-fabricados de fachada;
- Devem ser tomadas medidas adequadas para evitar a rotura frágil dos elementos secundários acima mencionados e deve-se ter um cuidado especial na pormenorização das ligações dos painéis de fachada aos elementos estruturais da estrutura para evitar um colapso parcial ou total para fora do plano dos painéis de fachada;



Figura 11.25 Os painéis de fachada nesta loja em Anchorage colapsaram no sismo do Alasca de 1964 [fonte: EERC]

É de salientar que a experiência dos últimos sismos mostrou que um detalhe inadequado das ligações entre os painéis de fachada (principalmente os painéis sanduíche) e os correspondentes elementos estruturais podem levar ao colapso para fora do plano dos painéis de fachada durante um sismo, seguido de riscos consideráveis para a vida humana.



Figura 11.26 Colapso de painéis de fachada durante o sismo de Santiago do Chile, 2010



Figura 11.27 Colapso para fora do plano dos painéis de revestimento durante o sismo de L'Aquila, 2009 [4].

As ligações dos painéis de fachada aos elementos estruturais devem ser concebidas e detalhadas para as cargas gravíticas, mas também para as cargas cíclicas horizontais a que possam vir a estar sujeitas. Além disso, as ligações aos elementos estruturais e entre os painéis de fachada devem ser capazes de seguir as deformações esperadas na estrutura.

Referências Bibliográficas

- [1] Chastre, C.; Conceptual design of precast concrete structures in earthquake areas. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa 2011.
- [2] Bachmann, Hugo. Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities. Biel 2002.
- [3] Arslan, M. H., H. H. Korkmaz, et al. (2006). Damage and failure pattern of prefabricated structures after major earthquakes in Turkey and shortfalls of the Turkish Earthquake code. Engineering Failure Analysis. **13**: 537-557.
- [4] Menegotto M.: “Observations on Precast Concrete Structures of Industrial Buildings and Warehouses” *Progettazione Sismica*, n. 03/2009 (Special issue on L’Aquila earthquake), Ch. 2.6 – English edition, IUSS, Pavia, novembro 2009.