

# Colapso progressivo dos edifícios - breve introdução

por Antonio Carlos Reis Laranjeiras

## 1. Introdução

As nossas normas referem-se ao fenômeno “colapso progressivo” dos edifícios de forma sumária, enigmática e instigante. De fato, a NBR 6118, na subseção 19.5.4, intitulada **Colapso progressivo**, recomenda armações nas lajes lisas, sobre os pilares, necessárias “para garantir a ductilidade local e a conseqüente proteção contra o colapso progressivo”. Já a NBR 9062 (estruturas pré-moldadas), aconselha, no item 5.1.1.4, que “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos, de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo.”

Essas são as únicas menções, nessas duas importantes normas, ao “colapso progressivo”, sem esclarecimentos do que seja exatamente esse fenômeno, qual sua importância, sua ocorrência e características, talvez porque os mesmos não caibam em textos de normas, mas sim em Comentários complementares, todavia inexistentes. A NBR 6118 não torna claro ao leitor como “a ductilidade local” protege a laje contra colapso progressivo, talvez por supor conhecida essa relação entre ductilidade e colapso progressivo. A NBR 9062, por sua vez, nada informa sobre quais são os “cuidados especiais” a que se refere e que devem ser tomados na “organização geral da estrutura” e nos “detalhes construtivos” com vistas ao colapso progressivo.

Esse cenário nebuloso dos textos normativos faz pensar na conveniência de levantar um pouco a cortina da informação para enxergar-se melhor o problema em seu contexto e nos aproximarmos, através de conhecimento sistemático do projeto de estruturas de edifícios contra colapso progressivo. O Prof. Augusto Carlos de Vasconcelos apresentou, recentemente, palestras e texto publicado no TQS News, fevereiro 2010, intitulados **Robustez** (das estruturas). A Robustez seria aquele atributo das estruturas que contribui para sua segurança contra o colapso progressivo.

O colapso parcial de um edifício de apartamentos em Ronan Point, Londres, em maio de 1968, despertou a atenção do meio técnico para o fenômeno do colapso progressivo, e esse interesse tem crescido exponencialmente, nos últimos anos. Predomina, atualmente, o convencimento da necessidade de normas e procedimentos específicos de projeto para prevenção do colapso progressivo nas edificações, vez que as concepções e análises estruturais exigidas diferem substancialmente das usuais da prática de projeto.

O propósito desse documento é o de oferecer uma breve introdução ao projeto das edificações contra colapso progressivo, ao tentar responder com clareza às seguintes perguntas:

1. **O que é o colapso progressivo?**  
Sua definição; caracterização; causas; casos.
2. **Como projetar estruturas de edifícios para prevenir colapsos progressivos?** Fundamentos. Métodos diretos e indiretos. Regras práticas.

A referência básica desse texto é o documento: NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, U.S. – *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. NISTIR 7396. February 2007, 216 p.

## 2. O que é o colapso progressivo?

### 2.1. Definição

O termo “colapso progressivo” é usado para identificar a propagação de uma ruptura inicial, localizada, de modo semelhante a uma reação em cadeia que conduz à ruptura parcial ou total de um edifício. A característica básica do colapso progressivo é a de que o estado final da ruptura é desproporcionalmente maior do que a ruptura que deu início ao colapso. Portanto, o “colapso progressivo” é um tipo de ruptura incremental, no qual o dano total é desproporcional à causa inicial. Em alguns países, esse

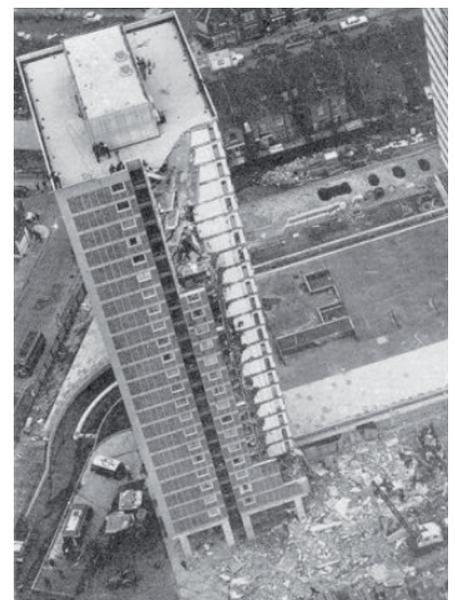
tipo de ruptura é identificado por “colapso desproporcional”.<sup>1</sup>

Os americanos propõem a seguinte definição, a ser oficializada nas normas:

“*colapso progressivo* – a propagação de um dano localizado de elemento a elemento estrutural, resultando, eventualmente, no colapso de toda uma estrutura ou, desproporcionalmente, de grande parte dela; também conhecido como *colapso desproporcional*”

“O conceito de colapso progressivo pode ser ilustrado pelo famoso colapso de 1968, do edifício de apartamentos Ronan Point (figura 2.1). A estrutura de 22 andares era constituída de painéis portantes, pré-moldados. Uma explosão de gás na cozinha, localizada na esquina do 18º pavimento, expeliu o painel portante da fachada e, com isso, o colapso da laje sem apoio da cozinha do andar acima se propagou para cima, até a laje de cobertura, e para baixo, até o térreo. Embora o colapso não tenha atingido o edifício todo, a extensão dos danos foi desproporcional ao dano inicial” (expulsão do painel portante de fachada do 18º andar).

Figura 2.1  
Colapso do edifício Ronan Point



A explosão de gás no 18º andar gerou um colapso progressivo

1. Todos os textos entre aspas são tradução (do inglês) do NISTIR 7396, op.cit.

O colapso Ronan Point e outros exemplos de colapso progressivo serão relatados mais adiante, na seção Casos.

Os colapsos dos elementos estruturais tendem de um modo geral, a propagar-se aos seus elementos vizinhos. Realmente, a ruptura de um pilar tende a levar consigo as vigas e as lajes a ele associadas e assim por diante, quando a ruptura inicial é em uma viga ou em uma laje. A caracterização do colapso progressivo como “desproporcional” admite, implicitamente, a existência de colapsos apenas localizados, em que essa propagação é proporcional ao evento inicial.

Essa constatação conduz a uma dificuldade na identificação de um colapso progressivo, qual seja: já que, de certo modo todo colapso tem um caráter progressivo, proporcional ou desproporcional, como distinguir os limites entre um colapso local, aceito como proporcional, de um colapso progressivo, que se propaga desproporcionalmente à sua causa de origem? Por outro lado, isso evidencia que não basta definir a natureza do fenômeno colapso progressivo, pois é necessário que essa definição esteja associada à caracterização clara de sua desproporcionalidade. A partir de que condições e circunstâncias o projetista deve considerar um colapso potencial como progressivo, para efeito de medidas preventivas específicas de projeto? Esses aspectos serão objeto da seção seguinte: Caracterização do Colapso Progressivo.

## 2.2. Caracterização do colapso progressivo

Um colapso progressivo implica em uma reação em cadeia de rupturas progressivas que se propagam para configurar um extenso colapso parcial ou total de um edifício, desproporcional ao dano localizado inicial. A noção de “desproporcionalidade” é fundamental e comum a todas as definições de colapso progressivo, mas é ambígua porque nem toda propagação de rupturas chega a desenvolver um extenso colapso, que possa ser identificado como “colapso progressivo”.

Com base em alguns documentos normativos, entre eles a norma inglesa (BS 5950-1:2000) e no próprio NISTIR 7396, considera-se que um colapso será considerado como progressivo se a desproporcionalidade atingir, na propagação horizontal, mais de 15% da

área total do piso (ou forro) ou mais de 100 m<sup>2</sup>; e, na propagação vertical, atingir mais de dois andares.

“Historicamente, apenas em pequeno número de casos o colapso progressivo chegou a provocar o colapso total do edifício. Há, no entanto numerosos casos de colapso progressivo de edifícios em construção (ver figura 2.2). As causas dessas rupturas durante a construção têm sido identificadas como devidas a (a) resistência insuficiente do concreto; (b) sobrecargas de construção e (c) técnicas inadequadas de construção. Os dados disponíveis sugerem que os edifícios em construção têm maior probabilidade de colapso do que os mesmos edifícios em fase de uso, e que os colapsos na construção não têm início pelas mesmas condições que causam rupturas no edifício em serviço.”

A figura 2.2 ilustra um colapso progressivo de um edifício em construção. Trata-se do edifício residencial Skyline Plaza, após o colapso progressivo ocorrido em 1973, durante a construção do 24º pavimento. O colapso propagou-se verticalmente por toda a altura da torre e, horizontalmente, por todo o anexo de garagem ainda em construção. A estrutura era em lajes lisas e a ruptura inicial teve lugar em uma ruptura da laje por punção, no 23º pavimento, devida à remoção prematura do escoramento. 14 operários perderam a vida e 34 ficaram feridos.

Figura 2.2  
Skyline Plaza Apartments, VA, USA



*Uma estrutura de lajes lisas de concreto armado sofreu colapso progressivo vertical e horizontal, durante a construção do 24º pavimento*

O texto que se segue terá como referência, exclusivamente, as estruturas de concreto armado de edifícios já construídos e em uso.

## 2.3. Causas do colapso progressivo

Os colapsos progressivos de edifícios em uso ocorrem por diferentes causas, que incluem:

- erros de projeto ou de construção;
- **ações variáveis abusivas**, que extrapolam as envoltórias de ações e combinações consideradas, ou que não foram explicitamente adotadas em projeto;
- **ações excepcionais**, tais como explosão de gás, explosão de bombas, colisão de veículos, colisão de aviões, ações ambientais extremas (tornados, por ex.), capazes de solicitar a estrutura além da envoltória de ações considerada em projeto.

Os incêndios, antes da normalização específica (NBR 15200:2004), incluíam-se entre as ações excepcionais. Atualmente, a prevenção de colapsos progressivos em edifícios provocados por grandes incêndios é um dos objetos dessa nova norma, com o que ficam excluídos os incêndios dessa discussão.

Os erros de projeto e de construção são os responsáveis pela maioria dos danos e colapsos nos edifícios usuais, e não a variabilidade das ações e das resistências, como se poderia supor. Esses erros ocorrem mesmo quando os profissionais envolvidos são bem qualificados e são utilizados métodos aprovados de garantia e controle de qualidade. Tais erros decorrem de nossa imperfeição humana, são difíceis de quantificar e não estão incluídos nos coeficientes parciais de segurança de nossas normas. A sua prevenção é mais eficiente, quando os engenheiros reconhecem sua falibilidade, através da antevisão de possíveis cenários de danos, e através do aperfeiçoamento dos controles e gestão de qualidade. Essa postura criticamente direcionada para o desempenho da estrutura é essencial na prevenção dos colapsos progressivos.

Os danos gerados por **utilização abusiva** da construção sob carregamentos acima dos originalmente

previstos incluem-se na mesma categoria dos danos devidos a erros de projeto/execução. Não há informação que permita avaliar estatisticamente a incidência e intensidade dessa causa.

Sobre as **ações excepcionais**, acima identificadas, existem dados que permitem informações estatísticas sobre intensidade e incidência anual das mesmas, disponíveis na referência citada na introdução (NISTIR 7396). A discussão detalhada dessas ações extrapola o objetivo e âmbito desse texto, direcionado às estratégias capazes de prevenir colapsos progressivos nos edifícios para um espectro amplo de ameaças, tanto excepcionais como de erros humanos.

Um aspecto importante, associado às causas, é a identificação do grau de sensibilidade ou de vulnerabilidade dos edifícios ao colapso progressivo, que se desenvolve a partir de um colapso localizado. “A estimativa é que aproximadamente 15 a 20% dos colapsos em edifícios desenvolvem-se desse modo. Certos atributos podem tornar um edifício particularmente vulnerável ao colapso progressivo.”

“O fator mais importante para essa vulnerabilidade estrutural é a ausência ou deficiência de continuidade no sistema estrutural e a deficiente utilidade dos materiais, elementos e ligações estruturais. Tais sistemas carecem de robustez, sendo pouco aptos a absorver ou a dissipar a energia que resulta de danos localizados.” Assim, por exemplo, lajes pré-moldadas, apoiadas em paredes de alvenaria, e construções com grandes painéis ou paredes portantes são mais vulneráveis em virtude das dificuldades em prover continuidade e utilidade em tais sistemas. Lajes lisas e lajes cogumelos podem ser vulneráveis em suas ligações com os pilares.

O modo mais simples de evitar estruturas vulneráveis a colapsos progressivos é prover graus mínimos de continuidade e utilidade entre os elementos estruturais e suas ligações, como veremos na segunda parte desse texto. São medidas práticas, de baixo custo e que independem especificamente das causas acima identificadas. Tais procedimentos são mais fáceis de serem

implementados na prática e nas normas do que procedimentos direcionados para uma específica causa. A tendência atual de privilegiar critérios gerais de desempenho em detrimento das condições prescritivas atuais estimula-nos, como projetistas, a pensar criticamente nossas estruturas com vistas ao seu comportamento em situações inusitadas e adversas, como as do colapso progressivo.

#### 2.4. Estudo de casos de colapso progressivo

Estudam-se a seguir alguns casos de colapsos progressivos de edifícios em uso, com vistas a identificar as inadequações de projeto que favoreceram esses eventos.

##### 2.4.1. Ronan Point

Ronan Point era um conjunto de edifícios de apartamentos, destinado a população de baixa renda, construído entre 1966 a 1968, em Londres. Na manhã de 16 de maio de 1968, um vazamento de gás em cozinha do 18º pavimento de um dos edifícios. A explosão expulsou uma das paredes externas, que sustentava a parede do andar acima. A perda dessa parede de apoio gerou o desabamento das lajes e paredes dos andares acima, até o 22º andar. O impacto e peso dessas lajes e paredes sobre as lajes inferiores provocaram o colapso das mesmas, até o piso térreo (figura 2.3).

##### Descrição da estrutura

Os edifícios residenciais Ronan Point tinham 64 m de altura e 22 pavimentos, com cinco apartamentos por andar, totalizando 110 unidades. “O sistema estrutural, incluindo paredes, lajes a escadas, era de concreto pré-moldado. Cada piso era sustentado diretamente pelas paredes do piso imediatamente abaixo. As paredes e as lajes eram conectadas entre si com auxílio de parafusos, preenchidas as conexões com argamassa seca.”

Figura 2.3  
Edifício em Ronan Point,  
Londres, 1968

*A expulsão de um painel de parede externa pela explosão na instalação de gás, no 18º andar, resultou no colapso progressivo do térreo ao 22º piso*

Esse sistema foi escolhido pela sua facilidade executiva. Os painéis de parede eram assentados com auxílio de uma grua e aparafusados nas lajes. “Em essência, a estrutura assemelhava-se a um castelo de cartas, sem ligações redundantes para redistribuição das cargas, no caso de uma ruptura localizada.”

##### Lições

As investigações oficiais do colapso concluíram que a explosão foi de pequena intensidade, inferior a 69 kPa. Ensaio demonstraram, no entanto, que, para expulsar a parede externa, bastaria uma pressão de 21 kPa.

O colapso do edifício Ronan Point foi atribuído à deficiência de sua integridade estrutural. Não havia caminhos alternativos para a redistribuição das forças, no caso da perda de uma das paredes de sustentação.

A investigação desse acidente identificou também que a ação do vento em seus valores extremos ou os efeitos de um incêndio poderiam provocar, do mesmo modo, um colapso progressivo nessa estrutura. O edifício foi restaurado, reforçado, mas as persistentes preocupações com sua segurança conduziram à sua total demolição em 1986.

##### 2.4.2. Edifício Murrah

O edifício Alfred P. Murrah era um edifício do governo federal localizado na cidade de Oklahoma, Oklaho-



ma, USA (figura 2.4). Na manhã de 19 de abril de 1995, esse edifício foi alvo de ataque terrorista, em que um caminhão-bomba foi detonado em frente de uma de suas fachadas. A explosão causou extensos danos ao edifício.

**Figura 2.4**  
Edifício Murrah, Oklahoma, antes do atentado



*Em frente a essa fachada, junto ao meio-fio, foi estacionado o caminhão-bomba.*

#### Descrição da estrutura

O edifício Murrah, construído entre 1970 e 1976, era um edifício de nove andares de concreto armado, com 30 m de largura e 67 m de comprimento. Ao longo da fachada onde estacionou o caminhão-bomba, havia uma viga de transição ao nível do 3º piso, com vãos de 12,2 m, que suportava os pilares dos andares superiores, distantes entre si de 6,1 m.

#### O evento

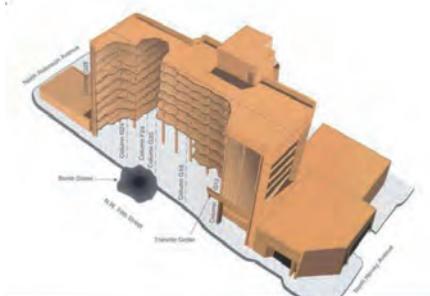
A explosão do caminhão-bomba causou severos danos ao longo de toda a fachada da figura 2.4 (fachada Norte), que se estenderam cerca de 20 m para dentro do edifício. Estimase que praticamente a metade da área útil do edifício entrou em colapso. Três dos quatro pilares centrais, que serviam de apoio à viga de transição do 3º piso, foram imediatamente implodidos, provocando colapso progressivo dos andares superiores. A figura 2.5 apresenta uma vista parcial da fachada destruída e a

figura 2.6 representa esquematicamente a parte destruída e a remanescente, após a explosão.

**Figura 2.5**  
Edifício Murrah, Oklahoma, após o colapso



**Figura 2.6**  
Edifício Murrah, Oklahoma



*Desenho esquemático da parte remanescente, após a explosão.*

#### Análise do colapso

As análises do colapso evidenciaram que a estrutura do edifício foi projetada como uma estrutura aporticada usual de concreto armado, em total conformidade com a norma ACI 318, edição de 1970 (correspondente à nossa NBR 6118) e o projeto foi muito bem detalhado. De acordo com as próprias normas, a estrutura não foi projetada para resistir a ações excepcionais como explosões de bombas ou sismos.

Essa análise identificou, pelos dados de projeto, que a remoção de um dos pilares do andar térreo transferiria cargas e esforços aos pilares vizinhos, que os mesmos não seriam capazes de resistir, apesar de detalhados de acordo com a norma da época (década de 70). Concluiu-se que a estrutura aporticada não oferecia utilidade suficiente para redistribuir as cargas com a remoção dos três pilares da fachada, no andar térreo.

#### Lições

As mesmas análises também demonstraram que se o detalhamento dos pórticos seguisse as recomendações hoje existentes, como para pórticos em regiões de sismos, a área do colapso teria sido reduzida de 50% a 80%.

Alguns especialistas argumentam que, apesar do colapso ter sido em área maior do que 100 m<sup>2</sup>, estendendo por mais de dois andares, não foi desproporcional à causa de origem, já que foi capaz de implodir três pilares de uma só vez. Esses ponderáveis argumentos recolocam em discussão a caracterização da desproporcionalidade dos colapsos progressivos, adicionando novos parâmetros.

O colapso do edifício Murrah destaca a sensibilidade ou vulnerabilidade dos edifícios com pisos de transição ao colapso progressivo, na eventual remoção de pilares que sustentam esse piso. O pequeno registro de acidentes desse tipo não poder servir como aval para omissão das medidas de projeto que garantam suficiente robustez, ou seja integridade e utilidade a essas estruturas, hoje tão usuais entre nós em edifícios de muitos andares.

### 2.5. Casos de estruturas que evitaram colapso progressivo

Os casos que examinaremos a seguir referem-se a estruturas que sofreram um dano inicial grave, mas que, por seu bom desempenho, impediram o desenvolvimento de um colapso progressivo. A análise desses casos permite uma visão das características estruturais que adicionam robustez às estruturas, impedindo extensos colapsos progressivos

#### 2.5.1. O Pentágono

Em 11 de setembro de 2001, terroristas arremeteram um Boeing 757 sobre a fachada oeste do Pentágono, sede do Departamento de Defesa dos EUA, em Arlington, Virgínia.

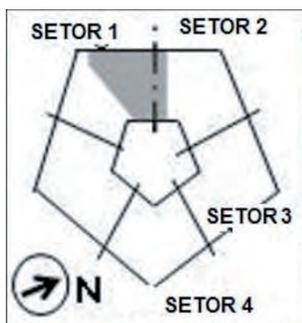
Por quase vinte minutos, os andares acima da parte atingida mantiveram-se intatos, apesar do extenso dano provocado pelo impacto nos andares inferiores (1º e 2º pisos). Finalmente, uma parte relativamente

pequena dos andares superiores (3° ao 5° piso) entrou em colapso, após tempo suficiente à evacuação das pessoas. A figura 2.7 apresenta uma vista geral do Pentágono, e a figura 2.8, um desenho esquemático do Pentágono e da área atingida.

Figura 2.7  
O Pentágono, antes do atentado



Figura 2.8  
Desenho esquemático do Pentágono, em planta



Área sombreada é a do colapso.

#### Descrição da estrutura

O Pentágono é um grande edifício construído em 1941-1942, com cinco pavimentos e uma estrutura convencional de concreto armado (lajes, vigas e pilares), moldada in-loc. Os pilares têm espaçamento entre si de 3, 4,6 e 6,1 metros; as lajes têm espessura de 14 cm e os pilares que sustentam mais de um pavimento, em sua maioria, são cintados (estribos helicoidais). Os demais pilares tinham estribos usuais. O concreto tinha resistência especificada de 17 MPa e as barras de aço tinham  $f_y = 270$  MPa. A sobrecarga adotada em projeto é de 7 kN/m<sup>2</sup>. Aproximadamente metade das barras longitudinais das vigas estende-se continuamente sobre os apoios (pilares), com emendas por traspasso de 40 diâmetros.

#### O evento

O Boeing 757 penetrou o edifício entre o primeiro piso (térreo) e a laje do segundo piso, voando a poucos centímetros do chão com velocidade

de 850 km/h e avançando aproximadamente 95 metros dentro do prédio (cerca de duas vezes o comprimento do avião). A fuselagem do avião colidiu com a fachada sob ângulo de 42° (com a normal à mesma), abrindo nesta um buraco com 37 metros de largura.

Nenhuma parte do edifício entrou em colapso imediatamente, apesar de 50 pilares no 1° piso (térreo) terem sido devastados pelo impacto do avião. Só 20 minutos após o impacto uma parte dos pisos superiores entrou em colapso, o que permitiu que muitas vidas fossem salvas. O forte incêndio que se seguiu ao impacto, associado à perda do cobrimento das vigas e pilares danificados contribuiu decisivamente para esse colapso. O fogo reduziu a resistência das armações expostas de vigas e pilares, esgotando sua capacidade de resistir à redistribuição dos esforços. Uma parte remanescente da estrutura severamente danificada manteve-se sem colapso, apesar de vencer vãos com numerosos pilares destruídos.

A investigação demonstrou que os pilares responderam ao impacto com ductilidade. Se a armação transversal fosse de estribos comuns, em lugar do cintamento utilizado, o número de pilares destruídos seria muito maior.

A figura 2.9 é uma vista da área do edifício, que entrou em colapso, após a remoção dos escombros.

Figura 2.9  
Área do Pentágono que entrou em colapso, após a remoção dos escombros



#### Lições

Apesar dos extensos danos nos pilares do 1° piso (térreo), o colapso dos andares acima foi extremamente limitado. Esse comportamento favorável, que permitiu a salvação de muitas vidas, deveu-se às seguintes características da estrutura:

- Um sistema apertado redundante, com muitos apoios e alternativas diversas de redistribuição das forças, no caso de colapso localizado de pilares;
- Pequenos vãos entre pilares;
- Continuidade das armações inferiores das vigas sobre os pilares;
- Projeto para sobrecarga elevada;
- Grande ductilidade e capacidade residual de carga dos pilares cintados;

#### 2.5.2. Khobar Towers

Khobar Towers é um complexo de edifícios residenciais situado em Al-Khobar, Arábia Saudita. Em 25 de junho de 1996, alguns desses edifícios foram severamente danificados, quando uma poderosa bomba foi detonada na avenida que passa em frente aos mesmos (figura 2.10).

Figura 2.10  
Khobar Towers, Arábia Saudita



#### Descrição da estrutura

O edifício mais danificado, situado à frente dos outros, tem oito andares, e sua estrutura é constituída de paredes e lajes pré-moldadas de concreto armado. Desse modo, todas as cargas verticais e horizontais são resistidas pelas paredes.

O projeto da estrutura e das ligações entre paredes e lajes obedeceu à norma inglesa (CP-110). Essa norma inclui recomendações sobre o dimensionamento e detalhamento da estrutura com vistas à prevenção do colapso progressivo, que foram cuidadosamente seguidas.

#### O evento

Em 25 de junho de 1996, terroristas detonaram uma poderosa bomba em um caminhão estacionado cerca de 20 metros do edifício mais próximo. A explosão criou uma cratera de 17 m de diâmetro e 5 m de profundidade, ilustrada na figura 2.11, destruiu a fachada e danificou, parcialmente, lajes e paredes internas.

A explosão causou ainda severos danos nos edifícios vizinhos. O colapso, no entanto, não evoluiu além das áreas dos danos iniciais, conforme ilustra a figura 2.12.

Figura 2.11  
Khobar Towers



Cratera criada pela bomba.

Figura 2.12  
Khobar Towers



A fachada destruída do edifício mais próximo da explosão.

### Lições

Uma investigação dos danos das Khobar Towers revelou que o sistema estrutural pré-moldado usado nesses edifícios tinha suficiente ductilidade para resistir ao atentado sofrido. Paredes internas, paralelas à fachada, mesmo extensamente danificadas, mantiveram capacidade de suportar cargas verticais, como ilustra a figura 2.13.

Figura 2.13  
Khobar Towers



Paredes internas exibindo linhas de ruptura.

Os elementos pré-moldados foram detalhados com suficiente dutilida-

de para reter a integridade da estrutura, mesmo quando seriamente danificados. As ligações entre os elementos pré-moldados de lajes e destes com as paredes sobreviveram ao impacto, evitando o colapso progressivo do edifício, como um castelo de cartas.

## 3. Como projetar estruturas de edifícios para prevenir colapsos progressivos?

### 3.1. Fundamentos

Após definir, caracterizar e apontar eventuais causas para os colapsos progressivos, a etapa seguinte é a de sua prevenção na fase de projeto das estruturas. Antes de tratar objetivamente desse assunto, há uma pergunta que necessita ser preliminarmente respondida:

- Se os dados históricos atestam que o risco do colapso progressivo de edifícios é muito pequeno, conforme se mencionou no texto precedente, e se ações terroristas com aviões e carros bombas não fazem parte do cenário nacional, por que acrescentar esse risco ao rol de nossas preocupações, e como justificar os adicionais custos de projeto e de construção implícitos nas medidas complementares de prevenção desse tipo de colapso? Afinal de contas, os projetos não já consideram as combinações mais desfavoráveis de cargas permanentes, sobrecargas e vento, que conduzem a estruturas com certo grau de resistência e ductilidade, que contribui indiretamente para resistência ao colapso progressivo.

A resposta a essa questão é que a perda de vidas e os graves danos físicos são significativos, nos casos de colapso progressivo (parcial ou total) de edifícios de múltiplos andares, e esse é um fato que não se submete eticamente às avaliações estatísticas de risco. Além disso, outros fatos alinhados a seguir apontam para a exigência atual de consideração do colapso progressivo no projeto das estruturas dos edifícios:

a) A prevenção do colapso progressivo envolve conceituações e procedimentos de projeto que se afastam da nossa prática corrente. Há sistemas estruturais de uso

freqüente, em edifícios e pontes, que são vulneráveis ao colapso progressivo, e estão a sugerir a necessidade do projeto reconhecer o risco desse colapso e incorporar em sua prática as considerações de prevenção e resistência a esse tipo de ruptura, independente se os danos iniciais são causados por erros humanos, ações variáveis ou excepcionais.

- b) A grande evolução atual nas práticas de projeto, que se fez possível através do uso dos computadores e dos concretos de alta resistência tem conduzido a sistemas estruturais de edifícios relativamente esbeltos e flexíveis, o que lhes favorece maior sensibilidade ao colapso progressivo. As estruturas projetadas há pouco mais de duas décadas eram mais robustas e mais conservativas do que as de hoje, em decorrência dos recursos mais limitados da época;
- c) As pressões de mercado atuais, que exigem das empresas eficiência, economia e competitividade, tanto no projeto como na construção, podem conduzir a sistemas estruturais com características mais sensíveis ao colapso progressivo e mais vulneráveis às condições de carregamentos não incluídas em projeto;
- d) A crescente utilização de estruturas pré-moldadas ou de componentes pré-moldados de piso resulta em sistemas estruturais com descontinuidades (menos monolíticos) com maior vulnerabilidade ao colapso progressivo;
- e) A preferência sistemática da arquitetura dos edifícios pelo recurso aos pisos de transição entre as garagens e pavimentos tipo, associada aos fatores acima listados, potencializa os riscos de colapso progressivo.

Prevalece atualmente o consenso de que a possibilidade de colapso progressivo deve merecer atenção nas atividades de projeto e ser explicitamente considerada e tratada nas normas de projeto. É também consensual o entendimento de que a estratégia de prevenção do colapso progressivo deve visar os métodos que permitam à estrutura inicialmente danificada manter certa integridade, que evite a progressão desproporcional dos danos ou colapsos.

Os atributos de um sistema estrutural que lhe garantem integridade e robustez são:

- a continuidade, que se caracteriza pela sua capacidade em redistribuir esforços, após um dano;
- a redundância, que se caracteriza pela disponibilidade de alternativas diversas de redistribuir os esforços;
- a ductilidade, que se caracteriza pela sua capacidade de plastificação, de suportar extensas deformações antes de romper-se;
- a resistência suficiente à ameaça de colapso progressivo.

### 3.1.1. Redundância

A redundância refere-se à existência de possibilidades alternativas de redistribuição de esforços em um sistema estrutural inicialmente danificado. Uma estrutura redundante é aquela que ao ter um apoio danificado, por exemplo, oferece alternativas de redistribuição dos esforços por outros apoios.

A edificação da figura 3.1 é ilustrativa de um sistema estrutural desprovido desse atributo. Trata-se do edifício situado à entrada do Centro Administrativo da Bahia, em Salvador, sustentado por apenas dois cabos (estais) e dois pilares centrais, sendo que a estrutura dos pisos é articulada nos mesmos, conforme se identifica na foto. A eventual ruptura de qualquer dos dois cabos evoluirá, certamente, para o colapso total da edificação.

**Figura 3.1**  
Edifício alcunhado a “Balança”, no Centro Administrativo da Bahia, Salvador



*Um exemplo de estrutura sem redundância.*

A estrutura da figura 3.2, no entanto, no caso de ruptura de um simples cabo, oferece possibilidades de redistribuição dos esforços pelos cabos remanescentes.

**Figura 3.2**  
A estrutura de sustentação do Terminal da Lapa, Salvador



*É redundante, pois oferece alternativas de redistribuição dos esforços no caso de eventual ruptura de um de seus estais.*

A rica redundância da bela ponte sobre o rio Pinheiros, São Paulo (figura 3.3) dispensa comentários.

**Figura 3.3**  
A ponte sobre o rio Pinheiros, São Paulo (capital)



*Uma estrutura redundante.*

Ao analisarmos o comportamento da estrutura do Pentágono no atentado terrorista de 11 de setembro de 2001, identificamos que a redundância de pilares pouco espaçados entre si foi fundamental na limitação dos danos nesse edifício. Outra estrutura redundante, com abundância de alternativas de redistribuição de esforços no caso de falência de um de seus apoios, é a estrutura da extensão da pista de pouso na ilha da Madeira, ilustrada na figura 3.4.

**Figura 3.4**  
Estrutura da extensão da pista do aeroporto da ilha da Madeira



*Uma estrutura redundante.*

### 3.1.2. Continuidade

A perda de um elemento estrutural importante importa em redistribuição de esforços e aumento de deformações. Esse mecanismo requer a redistribuição vertical e horizontal de cargas pela estrutura, que depende, essencialmente, do grau de continuidade, ou seja, de conectividade entre seus elementos.

A continuidade é assim o atributo que garante a interconexão adequada à redistribuição de cargas entre lajes, vigas pilares, no caso de um colapso inicial. A continuidade tem a ver com o monolitismo, com a hiperestaticidade da análise estrutural, com a capacidade de transferir cargas, mesmo na inversão ou na grandeza excepcional de esforços.

Sem a continuidade, o excesso de apoios da redundância permanece ineficaz, pois não haverá a redistribuição, a condução, o transporte das cargas a eles, em caso de colapsos localizados. Reexaminemos, por exemplo, o caso do edifício Ronan Point (Londres), em que todas suas paredes eram portantes, pré-moldadas, configurando assim uma situação de extrema redundância (de apoios). No entanto, a precária continuidade estrutural, identificada nas ligações sumárias entre as paredes entre si e entre essas e os elementos de piso, não permitiu a redistribuição das cargas que atuavam na parede de fachada, implodida, pelas demais paredes, o que conduziu ao antológico colapso progressivo já discutido.

Ao contrário, as Khobar Towers (Arábia Saudita), já discutidas anteriormente, com sistema estrutural semelhante ao do edifício Ronan Point, constituído de lajes e paredes pré-moldadas eficientemente interligadas entre si, tinham redundância de apoios associada a uma continuidade eficaz, que lhes permitiram redistribuir as cargas e minimizar os danos provocados pela explosão de poderoso atentado a bomba.

As juntas e os aparelhos de apoio são soluções de continuidade, vez que eliminam vínculos entre os elementos estruturais, conforme ilustra a figura 3.5. As estruturas sem juntas e sem aparelhos de apoio, hoje identificadas na literatura como estruturas integrais, são possibilitadas pelos

novos recursos dos computadores e melhor conhecimento sobre os efeitos das deformações impostas (temperatura, retração, etc.). Tais estruturas não só preenchem o atributo da continuidade, necessário à prevenção do colapso progressivo, mas também as exigências de durabilidade e baixo custo de manutenção, pois a vida útil das juntas e aparelhos de apoio é relativamente curta.

Figura 3.5



Uma estrutura convencional de viaduto, à esquerda, com juntas e aparelhos de apoio, e uma estrutura integral, à direita.

A transferência de cargas através de aparelhos de apoio é acompanhada de concentração de esforços e tensões, nas regiões próximas aos aparelhos, conforme se identifica na representação gráfica da figura 3.6, à esquerda. Essa condição crítica limita a capacidade suplementar de carga dessas regiões, em casos de redistribuição de cargas por colapsos localizados. Ao contrário, a transferência de cargas através de ligações monolíticas, integrais, não gera concentração de esforços e de tensões, conforme se ilustra na mesma figura 3.6, à direita, com o que essa continuidade oferece reservas adicionais de capacidade de carga, úteis em situações de colapsos.

Figura 3.6



Os aparelhos de apoio geram concentrações de tensões que limitam a capacidade de transferência de cargas (figura à esquerda). Os apoios integrais, monolíticos, não geram concentração de tensões, oferecendo reservas de resistência úteis na prevenção de colapsos progressivos (figura à direita).

As estruturas pré-moldadas têm justamente nas ligações entre seus elementos o seu problema crítico de maior relevância. Essas ligações entre pilares, vigas e lajes são, em sua grande maioria, incompletas, pois não conseguem estabelecer todos os vínculos de uma estrutura monolítica, e, por isso, são identificadas na literatura como “ligações se-

mi-rígidas”. Para efeito da prevenção contra colapso progressivo, julgo preferível a designação “ligações semilivres” (ou “semideformáveis”), por destacar e chamar nossa atenção para as suas deficiências em relação à continuidade estrutural.

A figura 3.7 ilustra uma estrutura pré-moldada, na qual se percebe falta de continuidade entre os diversos elementos. Realmente, as lajes PI, pré-moldadas, apóiam-se livremente, sem capeamento, sobre as vigas, e estas sobre os pilares através de aparelhos.

Figura 3.7



Uma estrutura pré-moldada sem continuidade entre seus elementos.

A prática de pisos de forro pré-moldados sem o capeamento moldado in-loco de concreto resulta em um sistema estrutural sem continuidade que lhe permita transferir adequadamente aos pilares as forças horizontais atuantes no piso. As ligações entre os elementos, nesses casos, são apenas as necessárias para mantê-los em posição, conforme ilustra a figura 3.8.

Figura 3.8

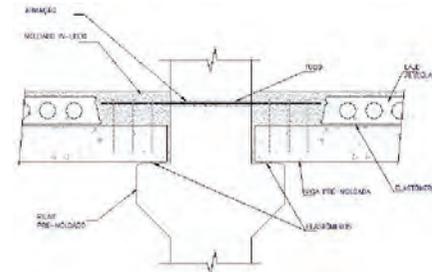


Ligações de lajes PI (pré-moldadas) entre si e com as vigas (pré-moldadas) de apoio.

Como foi dito acima, a continuidade também se refere à capacidade de transferir cargas quando há inversão de esforços. As vigas do Pentágono, que apresentaram eficiente comportamento em relação ao colapso progressivo, tinham suas armaduras inferiores estendendo-se sobre os pilares, oferecendo assim continuidade e capacidade de resistir à inversão de momento com a ausência eventual de um apoio. A exigência de nossa NBR 6118:2007 19.5.4 de armação

inferior sobre os pilares nas lajes sem vigas tem igualmente essa finalidade de garantir continuidade quando de uma eventual inversão de esforços. Já a figura 3.9 ilustra uma ligação entre viga e pilar, pré-moldados, que, apesar de ter continuidade para uma situação normal de carregamento, não oferece adequada continuidade para a eventualidade da falência do pilar e inversão de momento.

Figura 3.9



Uma ligação sem continuidade para o caso de inversão de esforços.

### 3.1.3. Dutilidade

Em caso de colapsos, deseja-se que os elementos estruturais e as suas interconexões mantenham suas resistências, mesmo se acompanhadas de grandes deformações (flechas e rotações) e, desse modo, possam suportar as transferências de cargas, resultantes da perda de um elemento estrutural.

A dutilidade é essa capacidade de plastificação da estrutura, que lhe permite a sustentação de cargas, mesmo com grandes deformações. Nas estruturas de concreto, consegue-se dutilidade estrutural pelo confinamento do concreto, pela continuidade das armações através de emendas adequadas, sejam por traspasse ou por luvas, e por conexões entre os elementos (lajes, vigas e pilares) com reservas excedentes de resistência.

O confinamento do concreto dos pilares com auxílio de estribos pouco espaçados (figura 3.10) transforma seu comportamento frágil, na ruptura, em dútil. Relembremos como exemplo o comportamento dos pilares cintados do Pentágono sob o impacto da aeronave, no atentado de 11/09/2001. Quase todos os pilares desse edifício que servem de apoio a mais de um piso são cintados por estribos helicoidais, enquanto os demais possuem apenas estribos com espaçamento

usual (20 cm). A investigação após o sinistro indicou que os pilares cintados comportaram-se com utilidade, e que um número muito maior de pilares teria sido destruído, não fosse esse cintamento.

Até atingir o estado de ruptura, os pilares cintados e não-cintados comportam-se de modo semelhante, porém os cintados suportam maiores deformações (encurtamentos) antes de atingir o colapso total, permitindo-lhe assim absorver muito mais energia do que um pilar comum, conforme ilustra o gráfico da figura 3.11.

Figura 3.10

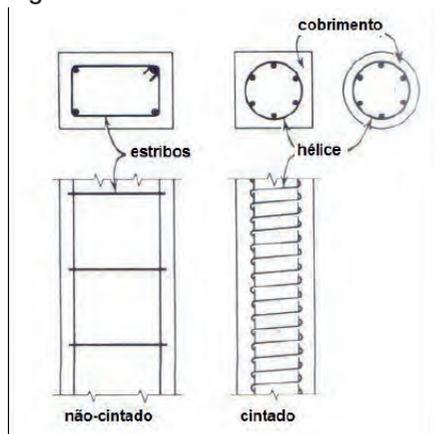


Ilustração dos pilares comuns, não-cintados e dos pilares cintados.

Figura 3.11



Diagramas idealizados de carga-deformação de pilares comuns e cintados.

A figura 3.12 ilustra o comportamento mais favorável à prevenção de um colapso de um pilar cintado, comparado ao de um pilar comum, sob ação de um sismo. Na foto à esquerda, vê-se um pilar cintado ao lado de um pilar comum severamente destruído

Figura 3.12

Na foto à esquerda, vê-se o pilar comum completamente destruído pelo terremoto, ao lado de um pilar cintado, semidestruído, mas ainda suportando o piso. A foto da direita é outra vista do mesmo pilar cintado. As fotos foram extraídas de PHIL M. FERGUSON – Reinforced Concrete Fundamentals, 4ª edição, 1981

Os pilares cintados, pela sua ductilidade, têm, pelo exposto, grande importância na prevenção de colapsos progressivos, e seu uso deveria ser, por isso, resgatado e estimulado.

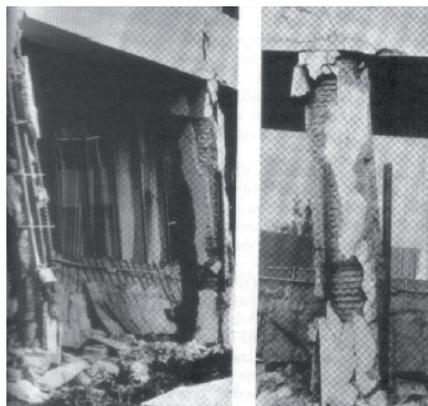
### 3.2. Introdução aos métodos

A prevenção do colapso progressivo, na fase de projeto, tem como objetivo fundamental salvar vidas, ao reduzir a extensão dos danos e evitar colapso desproporcional do edifício, pelo menos até que tenha sido evacuado.

A prevenção do colapso progressivo tem início com a preocupação e atenção dos arquitetos e engenheiros com as condições que podem conduzir a ruptura localizada a consequências desproporcionalmente grandes. Um dano inicial, localizado, pode resultar de ações excepcionais, tais como, explosões (acidentais ou intencionais), colisão de veículos, incêndio, tornados, ou de erros de projeto ou de construção, ou de sobrecargas abusivas, conforme já discutimos na primeira parte.

A forma do edifício pode contribuir favorável ou desfavoravelmente na prevenção do colapso progressivo. Uma forma regular, modular, com disposição uniforme dos elementos estruturais (vigas, pilares e pilares parede), pode ter efeito favorável na prevenção do colapso progressivo. Regularidade no projeto estrutural favorece a continuidade, a redundância e a conseqüente capacidade de redistribuição de cargas. Irregularidades, tais como cantos reentrantes, sacadas, favorecem a progressão de danos.

O projeto estrutural deve respeitar as formas definidas no projeto arquitetônico, porém minimizar irregularidades e descontinuidades, em planta e em elevação, é um bom passo inicial para melhorar a capacidade da estrutura



em resistir ao colapso progressivo. Sempre que possível, devem ser evitadas as concentrações de cargas, como as que resultam do uso de vigas de transição.

A nossa norma NBR 9062 (estruturas pré-moldadas) aconselha que “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos, de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo”. Essa “organização geral da estrutura” seria, segundo a norma americana ASCE 7-05, “um arranjo ou disposição dos elementos estruturais que garante estabilidade a todo o sistema estrutural ao transferir cargas de uma região danificada para regiões vizinhas, capazes de resistir a essas cargas sem entrar em colapso.”

Existem dois métodos para projetar estruturas de edifícios resistentes ao colapso progressivo: o método indireto e o método direto. O método indireto é uma aproximação simplificada, prescritiva, que consiste em prover à estrutura um nível mínimo de conectividade entre os diversos componentes estruturais. As prescrições não exigem do projetista análise adicional da estrutura, ao contrário, basta acrescentar ao projeto medidas e detalhes que aumentem a robustez e a integridade estrutural. Já o método direto apóia-se na análise numérica da estrutura com vistas a identificar sua capacidade de resistir aos efeitos de uma específica ação excepcional.

Discutiremos a seguir esses dois métodos, com ênfase maior do método indireto.

Figura 3.13



Colapso progressivo de uma edificação na Alemanha (Bad Reichenhalle), 2006

### 3.3. Método indireto<sup>2</sup>

O método indireto é recomendado pelas normas inglesas desde 1970, logo após o colapso em Ronan Point, e tem se mostrado eficaz em seus objetivos de proteção às vidas humanas. Esse método é particularmente apropriado no projeto de edifícios de layouts modulados, e que não possuam importantes sistemas de transições de cargas.

O projetista, ao usar o método indireto, segue prescrições com vistas a aumentar a robustez da estrutura. Isso é conseguido por medidas de melhoria da integridade estrutural desde a seleção do sistema estrutural, à disposição dos pilares, ao dimensionamento das peças e detalhamento das ligações. Desse modo, o método indireto é como se fosse um método inicial a ser usado para aumentar a robustez dos edifícios.

As recomendações para a integridade geral da estrutura podem ser formuladas sob forma de prescrições de resistências mínimas das ligações entre os elementos, de continuidade e de amarrações (ties) entre as peças, do que resultará um projeto robusto, estável e econômico. O método indireto tem a especial vantagem de ser de fácil utilização e de aplicação genérica, pois independe da causa dos danos. Apesar desse método não basear-se em cálculos detalhados da resposta da estrutura às ações excepcionais, resulta em uma amarração contínua das armações nas estruturas aporticadas dos edifícios, que permitem redistribuir as cargas das regiões danificadas para outras.

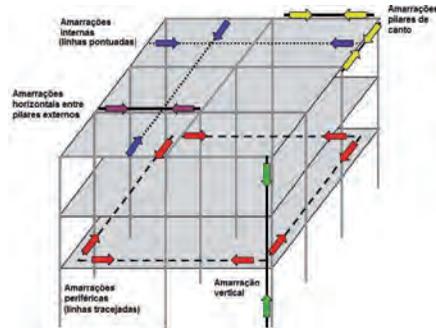
#### 3.3.1. As amarrações (ties)

Pressupõe-se que, se todos os elementos estruturais têm interligações capazes de transferir a capacidade requerida na tração, compressão ou cortante sem recorrer a condições de atrito ou de acordo com o especificado abaixo, a edificação tem condições de prover adequada proteção contra o colapso progressivo.

Para resistir ao colapso progressivo, os elementos principais de uma estrutura devem estar amarrados entre

si, de modo a possibilitar a redistribuição de forças, no caso de rupturas localizadas. Essa amarração consiste de amarrações periféricas, internas, amarrações horizontais ligadas aos pilares e amarrações verticais, conforme disposição esquemática da figura 3.14. A capacidade resistente dessas amarrações é considerada em separado das forças que resultam das ações normais, porém não deve ser menor do que a capacidade exigida por essas forças.

Figura 3.14



*Tipos diferentes de amarrações (ties) incorporados à estrutura para prover a integridade estrutural.*

As armações dispostas para resistir às ações normais de projeto podem ser consideradas como parte (ou todo) dessas amarrações, respeitando os seguintes mínimos:

- Nas amarrações perimetrais, dispor armações longitudinais contínuas, nas faces superiores (negativas) de pelo menos  $1/6$  da armação exigida nos apoios, e, nas faces inferiores,  $1/4$  da armação exigida a meio vão, nunca usando menos de duas barras;
- Nas amarrações internas, dispor apenas, nas faces inferiores,  $1/4$  da armação exigida a meio vão, nunca usando menos de duas barras.

As barras dessas armações devem ser ancoradas devidamente, estendendo-as além de todas as outras barras das armações com que cruza de um comprimento igual ao comprimento de ancoragem das mesmas.

As amarrações internas em cada piso e na cobertura devem ser dispostas ortogonalmente; devem ser contínuas em todo o seu comprimento; e devem ser devidamente ancoradas, em suas extremidades,

nas amarrações periféricas. A armação dessas amarrações pode estar toda concentrada nas vigas ou estender-se, lateralmente, pela laje. Essas amarrações internas não devem estar espaçadas de mais do que 1,5 vezes o espaçamento entre eixos dos pilares, que suportam dois painéis de lajes adjacentes, na mesma direção dessas amarrações.

As amarrações periféricas também devem contínuas e dispostas em cada piso e na cobertura. Os pilares de canto devem ser amarrados na estrutura nas duas direções perpendiculares.

Cada pilar (ou pilar parede, ou parede portante de concreto armado) deve ser amarrado continuamente do nível mais baixo ao mais alto. A amarração deve ser capaz de resistir à maior força normal de cálculo que é transferida ao respectivo pilar pelo piso mais desfavorável. Se há pilares que não têm continuidade pela existência de vigas de transição, deve ser realizada uma verificação geral da integridade da estrutura, de modo a assegurar que existam adequados meios de transferir as cargas às fundações.

Para requisitos das amarrações em estruturas de edifícios pré-moldadas, de aço ou de alvenaria, ver p.41-42 da documentação de referência citada na nota 2.

### 3.4. Método direto

No método direto, a resistência contra o colapso progressivo é obtida (a) pelo aumento de resistência dos elementos principais a uma específica ação excepcional ou (b) projetando a estrutura para que possa transferir as cargas em torno de um determinado local de ruptura. Em qualquer dos casos, esse método exige análises numéricas mais sofisticadas, se comparadas com as usadas na análise dos edifícios sob cargas gravitacionais e laterais.

Quando o método é aplicado com a finalidade de aumentar a resistência de elementos estruturais para resistir a uma ação excepcional específica, ganha a designação de "método da resistência localizada, específico

2. O texto das seções 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 é uma compilação e adaptação, traduzida da publicação: NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, U.S. – Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NISTIR 7396. February 2007, 216 p.

ca” (Specific local resistance method); e quando visa prover que a estrutura seja capaz de transferir as cargas de um local em colapso, é identificado como “método de caminhos alternativos de carga” (Alternate load path method).

Figura 3.15



Colapso progressivo do Charles de Gaulle, França, 2004.

#### 3.4.1. Método da resistência localizada, específica (MRLE)

Esse método consiste em projetar explicitamente os elementos de sustentação das cargas verticais para resistir uma ação excepcional prevista, assim como a das pressões de vidas a explosão de bombas. Assim, por exemplo, as pressões de uma explosão podem ser consideradas explicitamente em projeto com auxílio de métodos de análise não-linear dinâmico. No caso de atentados a bomba a edifícios, o método direciona-se aos elementos ditos chave, nos pisos inferiores, que se situam mais próximos das áreas de ameaça, de estacionamento de veículos.

#### 3.4.2. Método de caminhos alternativos de carga (MCAC)

Esse método consiste em projetar a estrutura para suportar cargas por caminhos alternativos de transferência de esforços, em caso de perda de um elemento importante de sustentação do edifício. Esse método é o preferido das instituições governamentais americanas na prevenção dos colapsos progressivos. O MCAC permite uma verificação formal da capacidade do sistema estrutural resistir à remoção de elementos específicos, tais como de um pilar de fachada. O método não exige a caracterização específica do que teria provocado a remoção do pilar, sendo, portanto, uma abordagem independente do tipo

de ação excepcional. Esse método pode ser entendido como um instrumento de cálculo para assegurar redundância ao sistema na resistência às cargas verticais, não se constituindo exatamente em simulação numérica da resposta estrutural após um colapso inicial.

A intenção dessas mensagens é a de apresentar, sumariamente, essas novas abordagens do problema do colapso progressivo, situando-se além desses limites a descrição longa e detalhada desses métodos, que pode ser obtida pelos mais interessados na referência citada.

#### 3.5. Visão geral dos métodos indireto e direto

O projeto de estruturas mais resistentes ao colapso progressivo requer a consideração do estado danificado da estrutura e a provisão de múltiplos caminhos alternativos de transferência de carga. As melhores práticas têm início com a seleção do sistema estrutural e do arranjo (layout) dos elementos; em prover detalhes dúcteis, que sejam capazes de desenvolver grandes deformações inelásticas. Para a vasta maioria das estruturas, as exigências de projeto podem ser prescritas com auxílio do método indireto. Isso resultará em estruturas mais robustas com maior capacidade de sustentar ações excepcionais. Para estruturas especiais, tais como edificações potencialmente objeto de atentados, métodos diretos, analíticos, são indicados para determinar os detalhes exigidos de projeto. Esses métodos diretos podem ser usados para projetar determinados elementos importantes para resistir a uma específica ameaça (MRLE), ou, para permitir caminhos alternativos de transferência das cargas do local danificado.

Figura 3.16



Colapso progressivo do WTC, 2001

### 3.6. Regras práticas

Um bom projeto busca integrar o sistema estrutural resistente às cargas gravitacionais com o sistema para resistir às cargas laterais e ao progressivo colapso. O texto a seguir apresenta regras práticas para projeto de estruturas de edifícios resistentes a colapsos progressivos, com base no conhecimento existente (2007) e na prática.

#### 3.6.1. Regras gerais

Como regras gerais incluem-se as que beneficiam a prevenção ao colapso progressivo em diferentes sistemas estruturais.

- Vigas pouco espaçadas, apoiando-se em vigas principais, melhora a redistribuição das cargas;
- Pilares pouco espaçados podem melhorar a redistribuição e transferência de cargas;
- Considere a resistência ao colapso em ambas direções (ortogonais); não visualize como comportamento de pórtico plano;
- Evite descontinuidades que causem concentração de cargas, como vigas de transição, por exemplo;
- Arranjos regulares e simétricos de sistemas estruturais facilitam a redistribuição de cargas e redundância;
- Vigas contínuas resultam em menores deformações e aumento a capacidade de redistribuição de cargas, em caso de perda de um pilar;
- Excentricidades podem gerar grandes momentos, em caso de cargas adicionais;
- Caixas de escada e pilares-paredes ajudam a estabilizar a estrutura e oferecem caminhos alternativos de carga.

#### 3.6.2. Estruturas de concreto armado

O concreto armado tem um número de atributos dos quais se podem tirar vantagens. Tem massa significativa, que melhora a resposta às explosões; os elementos podem ser facilmente dimensionados para comportamento dúctil e projetados com continuidade. Finalmente, as dimensões relativamente maiores de seus pilares tornam-os menos susceptíveis aos efeitos locais de 2ª ordem, na eventualidade da perda de um andar.

Confinamento do concreto pelo uso de cintamento ou de estribos pouco espaçados aumenta a capacidade dos pilares às forças cortantes horizontais, aumenta a eficiência das emendas por traspasse, na eventualidade de perda do concreto de cobertura e aumenta grandemente a ductilidade do pilar.

Um sistema estrutural preferido é o moldado in-loco com vigas em direções ortogonais. Nesse sistema, as vigas devem ter armações contínuas, positivas e negativas com emendas de tração por traspasse. Os estribos devem prover sempre a capacidade total das vigas à força cortante e ser pouco espaçados em todo o vão.

Lajes armadas em duas direções são preferíveis às lajes corredor, vez que oferecem maior redundância. As armaduras inferiores e superiores das lajes devem estender-se até dentro das vigas e pilares, a fim de aumentar a capacidade resistente, em casos de inversão de cargas. As lajes de piso podem suportar cargas sob forma de membrana com grandes deformações, quando solicitada além de sua resistência à flexão; nesses casos, no entanto, a armação da laje deve ser capaz de desenvolver sua capacidade de escoamento.

Nos sistemas de lajes lisas ou cogumelos, devem ser incluídos dispositivos para aumentar a resistência à punção, tais como uso de capitéis, engrossamento das lajes nas regiões dos pilares ou armaduras especiais de punção. A armação inferior das lajes deve ser contínua através dos pilares, nas duas direções, para sustentar a laje, no caso de ocorrência de ruptura por punção. Dispor vigas de bordo, nas fachadas do edifício.

No dimensionamento das vigas,

- Assegurar que a ruptura por flexão (dúctil) precederá a ruptura por força cortante, dispondo armação transversal para esse fim;
- Manter contínuas as armações positivas e negativas ao longo de toda a viga;
- Prever emendas afastadas das ligações com pilares e do meio vão;
- Usar estribos pouco espaçados, que aumentam a ductilidade e a resistência à força cortante e à torção;
- Observar que vigas mais largas podem oferecer mais resistência à torção;

No dimensionamento dos pilares,

- Assegurar que as rótulas plásticas se formarão nas vigas (e não nos pilares), dimensionando os pilares para momentos maiores do que a viga pode transferir aos mesmos;
- Detalhar pilares com confinamento;
- Prever emendas a um terço do comprimento dos pilares, e não nas extremidades ou a meia altura;
- Prolongar o confinamento com estribos ao longo da região das ligações com as vigas;
- Considerar a possibilidade de momentos e cargas normais maiores nos pilares vizinhos aos de canto, para a eventual possibilidade de perda desses.

No dimensionamento das lajes,

- Manter contínua uma parte das armações inferiores e superiores; prover as emendas afastadas das extremidades e do meio vão;
- Observar que as lajes moldadas in-loco juntamente com as vigas garantirá melhor continuidade e permitirá melhor redistribuição de cargas;
- Adicionar vigas aporticadas periféricas nos sistemas de lajes lisas ou cogumelos;
- Notar que armações ortogonais, superiores e inferiores, podem permitir a uma laje inverter a posição do vão portante, no caso de perda de um de seus apoios de bordo;

Para estruturas de aço, de alvenaria, de painéis pré-moldados de concreto, de pós-tensão (protendidas) ver a referência abaixo, p. 59-64.

#### 4. Conclusões

Embora o risco de colapso progressivo seja baixo na maioria das edificações, a proteção das vidas humanas exige sua consideração, de modo a evitar propagação desproporcional de danos iniciais em estruturas sob ações excepcionais, tais como erros de projeto ou de construção, impactos de veículos, explosões, etc.

As nossas normas ainda não prevêem exigências explícitas de como projetar para resistir ao colapso progressivo, salvo uma ou duas regras isoladas. Caberá ao proprietário, ao projetista ou ao construtor realizar, caso a caso, uma análise de possi-

bilidades envolvidas de colapso progressivo e adotar as medidas compatíveis para preveni-lo.

Projetar para reduzir o risco de colapso progressivo requer uma diferente forma de pensar a estrutura, se comparada com o projeto convencional para resistir cargas verticais e horizontais. O procedimento de projeto passa a ser investigar o que pode dar errado e identificar as exigências de desempenho a serem atingidas. O cenário do projeto pode ser com ameaças específicas ou com ameaças quaisquer, daí surgindo métodos diretos e indiretos de análise.

O tema é relevante, porém novo e ainda controverso em seus próprios conceitos e definições. Os europeus preferem referir-se a Robustez das estruturas e o ACI prefere Integridade Estrutural a Colapso Progressivo. Não resta dúvida, porém, que a Robustez e a Integridade são atributos estruturais, cuja deficiência pode favorecer a consequência, que se busca evitar, que é o Colapso Progressivo, daí a preferência dada aqui a esse termo.

O único interesse nesse relato é o de aproximar os colegas desse ainda meio obscuro problema da Engenharia Estrutural e tentar despertar interesse e atenção por ele. Sendo ainda um tema novo, pouco explorado, oferece amplas possibilidades de estudos experimentais e teóricos, na área acadêmica.

Figura 4.1



"Progressive Collapse" na visão do artista Nathan Barlex, Londres, 2007