
Progressive collapse effect in reinforced concrete buildings

O efeito do colapso progressivo em edifícios de concreto armado

Received: 05-03-2024 | Accepted: 08-04-2024 | Published: 12-04-2024

Luiz Carlos Mendes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1747-5179>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: lcarlos@predialnet.com.br

Vancler Ribeiro Alves

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8845-8914>

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

E-mail: vanribalvs@gmail.com

ABSTRACT

Progressive collapse is defined as the spread of an initial failure from element to element, eventually resulting in the collapse of an entire structure or a disproportionately large part of it according to ASCE (2002). It is a chain phenomenon where structural damage occurs in an amplified way due to the action of gravity or caused by some dynamic factor such as explosions. Collapses of slabs on upper floors are very common caused by some dynamic factor or failures on reinforcements. The present paper aims to analyze the progressive collapse of concrete structures in commercial and residential buildings. In this work, the dynamic background of progressive collapse are defined, the pathological aspects existing in buildings, as well as the calculation parameters used by Brazilian and international codes to prevent such pathologies. Real cases that occurred around the world are analyzed and how progressive collapse has been treated in recent decades. It is also suggested for cases in which the structure allows recovery, which procedures can be used.

Keywords: Progressive collapse; Structural damages; Exceptional loads; Recovery; Restoration.

RESUMO

O colapso progressivo é um fenômeno em cadeia onde os danos estruturais vão ocorrendo de forma amplificada pela ação da gravidade. Os casos mais comuns são desabamentos de lajes em andares superiores provocados por algum fator dinâmico ou falhas nas armaduras. O presente artigo visa fazer uma análise sobre colapso progressivo em estruturas de concreto de edificações comerciais e residenciais. Serão definidos os fundamentos dinâmicos do colapso progressivo, os aspectos patológicos existentes edificações, e os parâmetros de cálculo empregados pelas Normas Brasileiras e internacionais, para se evitar que o fenômeno ocorra. São analisados casos reais ocorridos no mundo. São sugeridos também para os casos em que a estrutura admita a recuperação, quais os procedimentos que podem ser empregados.

Palavras-chave: Colapso progressivo; Danos estruturais; Solicitações em cadeia; Recuperação; Reforço.

INTRODUÇÃO

O termo “colapso progressivo” é usado para identificar a propagação de uma ruptura inicial, localizada, de modo semelhante a uma reação em cadeia que leva à ruptura parcial ou total de um edifício, como um efeito dominó efetivamente. 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 (NISTIR 7396/2007).

Muitos calculistas e verificadores, mesmo que experientes, muitas vezes, ao calcular ou verificar estruturas com lajes lisas, não dão importância ao dimensionamento da armadura contra colapso progressivo, que foi inserida na norma NB 1, bem antes da NBR 6118:2014, e vem sendo analisada mundialmente desde o final da década de 1960, quando um edifício em Londres sofreu o colapso parcial após uma explosão de gás.

Na norma de concreto armado vigente (NBR 6118-2014), o assunto é desenvolvido com referências ao dimensionamento de laje à punção, intitulada Colapso Progressivo.

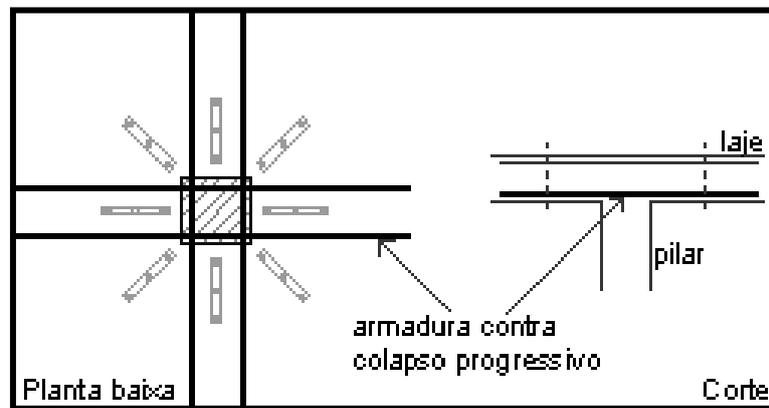
Nos sistemas estruturais, as lajes sem vigas intermediárias, de grandes painéis, apresentam diversas vantagens em relação aos sistemas convencionais, dentre as quais a rapidez de execução, as simplificações em serviços adjacentes e a real possibilidade de redução de custo de obra devida a essas simplificações (Carvalho, 2009). Apesar das diversas vantagens, a utilização de lajes lisas nem sempre é conveniente, pois a ausência de vigas traz desvantagens, sendo as principais a punção na laje, os deslocamentos transversais e a instabilidade lateral do edifício. Por isso, essa solução estrutural não é nem cogitada em países que corram o risco de ter abalos sísmicos.

Este tipo de laje apresenta um grande problema de avaliação de sua capacidade de carga, pela dificuldade de se representar o comportamento desse sistema e a sua configuração física na ruptura, apesar dos repetidos ensaios em modelos reduzidos. Os modelos matemáticos existentes levam a cálculos complicados, com muitas variáveis envolvidas e nem sempre são precisos, por isso os calculistas de décadas passadas evitavam usar lajes com esforços de punção.

A norma NBR 6118/2014, referente a colapso progressivo, estabelece que, para garantir a ductilidade local e a consequente proteção contra o colapso progressivo, a armadura de flexão inferior que atravessa o contorno C (contorno da superfície crítica do pilar ou da carga concentrada), deve estar suficientemente ancorada além do perímetro C' (superfície crítica afastada $2d$ do pilar ou da carga concentrada, sendo d a altura útil

da laje na região), conforme ilustrado na Figura 1. Portanto, faz-se apenas uma citação, sem maiores esclarecimentos sobre o que realmente é o fenômeno, sua importância e suas conseqüências para a estrutura como um todo.

Figura 1 - Armadura contra o colapso progressivo.



Fonte: Os autores.

Este critério de uso de armadura contra colapso progressivo é baseado no fato de que a armadura de flexão inferior, mesmo com curvatura acentuada, é capaz de suportar a laje, após a ruptura por punção.

O procedimento consiste em colocar armadura aparentemente inútil, sem finalidade para as cargas efetivas, mas que mantém a estrutura rompida suspensa, para que não haja queda sobre a parte sã da estrutura. Esta armadura, segundo a norma brasileira, é usada justamente pela falta de precisão nos métodos matemáticos para o cálculo de punção de lajes sem vigas. Não se trata de calcular a estrutura para suportar cargas maiores, pois isto seria inviável.

Já na NBR 9062/2003 (estruturas pré-moldadas) adverte que “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos, de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo”, porém, ela não menciona quais seriam os cuidados que deveriam ser tomados.

Ultimamente, o termo robustez tem ganhado destaque no meio estrutural, sendo citado como a propriedade de sistemas estruturais de sobreviver a situações imprevisíveis ou não usuais. Este problema seria sem solução, pois sempre poderia surgir uma ação maior do que aquela usada no cálculo, mesmo com todos os coeficientes de segurança utilizados, já que nossas normas não estão baseadas em análises de confiabilidade de estruturas.

O principal objetivo da confiabilidade estrutural é a avaliação da probabilidade de falha de uma estrutura associada às incertezas normais, para atender o objetivo para os quais ela foi projetada. Na realidade não existem estruturas cem por cento confiáveis, havendo sempre um risco de falha. Este risco deve estar sempre em níveis aceitáveis de acordo com critérios de segurança e economia. Em estruturas de concreto a probabilidade de falhas é muito baixa, variando de 10^{-3} a 10^{-6} .

ATRIBUTOS DA ESTRUTURA PARA A PREVENÇÃO DO COLAPSO

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 este tenha sido evacuado. A integridade estrutural no caso de ruptura fica caracterizada por três atributos distintos, identificados na literatura técnica: redundância, continuidade e ductilidade.

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 estrutura do Pentágono demonstrou-se ser uma estrutura eficazmente redundante durante o atentado de 11 de setembro de 2001, em Nova York. Cerca de 50 pilares do andar térreo do edifício foram destruídos no instante da colisão, com a penetração do avião em seu interior. Mesmo assim, os andares imediatamente acima (2º ao 5º pavimento) permaneceram sem colapso, o que permitiu a evacuação das pessoas, que se encontravam nesses locais. Os pilares dos andares superiores passaram a transferir as cargas para as vigas, e, essas, em ação conjunta com as lajes, e conseguiram transferi-las para os pilares vizinhos.

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

ANÁLISES COMPUTACIONAIS

O software Extreme Loading for Structures (ELS) permite que os engenheiros estruturais analisem e visualizem com precisão o colapso progressivo resultante de condições extremas, incluindo: cargas de terremoto, cargas de vento grave, cargas de explosão, cargas dinâmicas e as cargas de impacto. O usuário também pode determinar uma vulnerabilidade de estruturas de colapso progressivo, criando cenários de múltiplos eventos, que vai simular a falha de componentes diferentes, de modo a determinar se o colapso resultante será parcial ou completo.

Outro software de maior conhecimento entre os engenheiros estruturais é o SAP 2000, usado principalmente na análise do colapso progressivo e *design* de edifícios usando o método do caminho alternativo. Outras aplicações incluem análise estrutural de explosão e de análise focada em componentes de construção críticos.

AS NORMAS INTERNACIONAIS

Existe uma tendência internacional para atualização de exigências de análises estruturais para oferecer resistência ao colapso progressivo. Dentre os códigos e normas que recentemente sofreram atualização no quesito integridade estrutural, para assim se prevenir contra o colapso progressivo, estão:

- American Society of Civil Engineers: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05)
- American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-05)
- National Building Code of Canada (NBC 2005)
- International Building Code (IBC 2009)
- Eurocode 1: Actions on Structures
- British Standard Institute (BS 5950-2000).

AS NORMAS AMERICANAS

The American Society of Civil Engineers Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE, 2002) tem uma seção sobre "integridade estrutural" que diz: "Edifícios e outras estruturas devem ser concebidos para sustentar danos locais com

o sistema estrutural como um todo, mantendo-se estáveis e não serem danificados de uma forma desproporcional ao dano local original”. Isso deve ser alcançado através de um arranjo dos elementos estruturais que proporciona estabilidade para todo o sistema estrutural através da transferência de cargas de qualquer região localmente danificada para regiões adjacentes, capaz de resistir às cargas sem entrar em colapso.

Esta transferência deve ser realizada através de uma continuidade suficiente, de uma redundância, de uma dissipação de energia, de uma capacidade de absorção de energia (ductilidade) ou uma combinação dos mesmos nos membros da estrutura.

O foco do padrão ASCE/2002 está na redundância e caminhos de carga alternativos sobre todos os outros meios de se evitar a suscetibilidade à queda estrutural desproporcional.

The American Concrete Institute Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI, 2002) inclui "requisitos para a integridade estrutural" no capítulo sobre o reforço e detalhes do aço. Embora o comentário afirme que é o objetivo desta seção melhorar a redundância, não há menção explícita de redundância ou caminhos alternativos de carga no Código.

Nas disposições do Código ACI 2002 há uma declaração geral de que "no detalhamento de reforço e conexões, membros de uma estrutura, devem ser eficazmente ligados em conjunto, para melhorar integridade da estrutura global". Muitos requisitos específicos para a continuidade do aço de reforço e da interligação de componentes são mencionados. Há requisitos adicionais para a amarração de componentes pré-moldados inseridos em sistemas estruturais.

EXEMPLOS REAIS DE COLAPSOS EM EDIFÍCIOS

Historicamente, apenas em um pequeno número de casos, o colapso progressivo chegou a provocar o colapso total do edifício já pronto. Há, no entanto, numerosos casos de colapsos progressivos de edifícios em construção.

As causas dessas rupturas durante a construção são devidas à resistência insuficiente do concreto enviado pela concreteira e técnicas inadequadas de construção, como a retirada precoce de escoramentos, sobrecargas de construção, falhas no detalhamento das armaduras e muitas outras.

Para edifícios em uso, as causas do colapso progressivo podem ser erros de projetos ou de construção, que são as principais causas, mesmo quando se usam métodos que garantam a qualidade da estrutura.

O uso abusivo da estrutura com carregamentos acima dos de dimensionamento também está englobado nessas causas. Ações excepcionais, como explosões de gás ou bombas, colisões de veículos ou aviões e ações ambientais extremas como um tornado também são as causas extremas do colapso estrutural.

O CASO DO CONJUNTO 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, ocorreu um vazamento de gás na 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.

O sistema estrutural, incluindo paredes, lajes e escadas, era de concreto pré-moldado. Cada piso era sustentado diretamente pelas paredes do piso imediatamente abaixo.

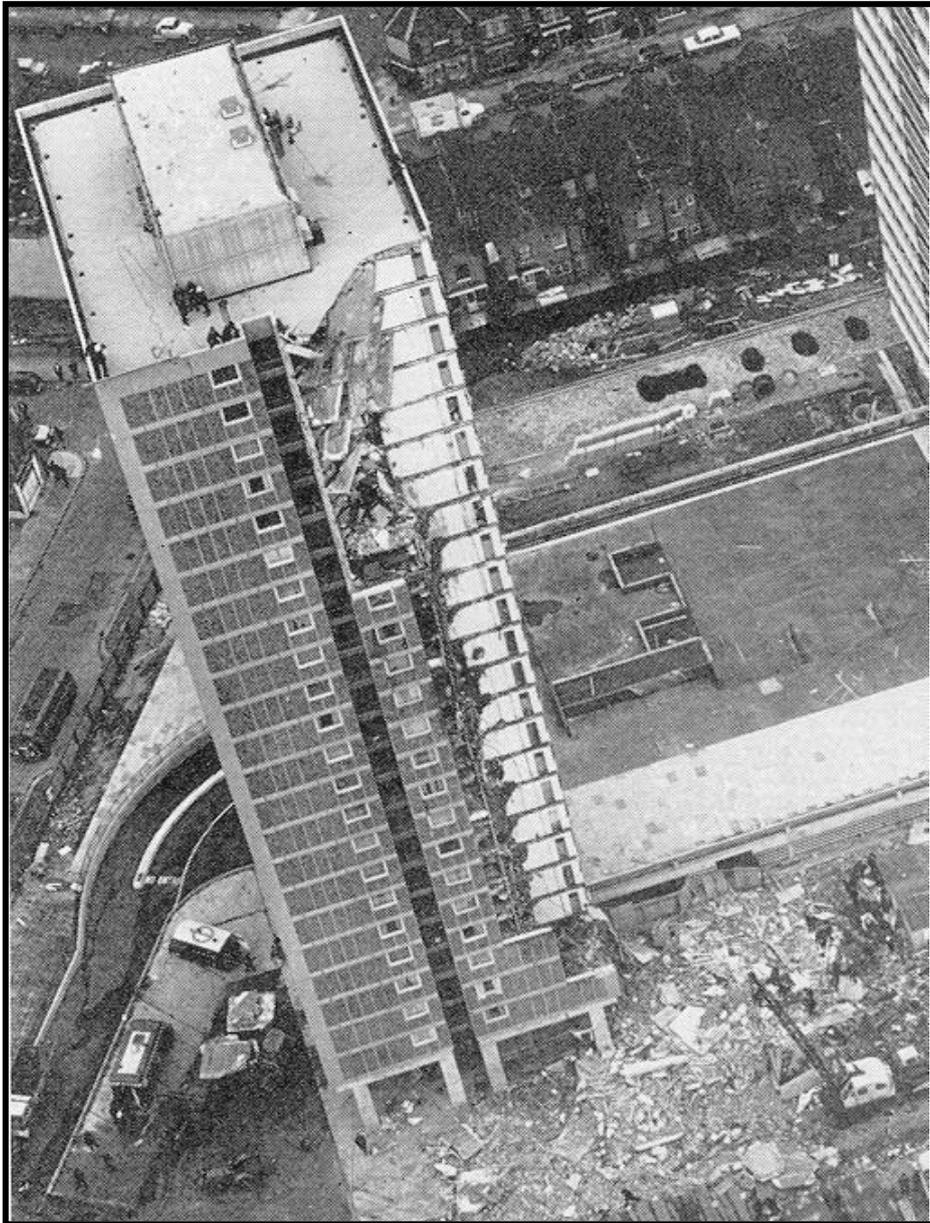
As paredes e as lajes eram conectadas entre si com auxílio de parafusos chumbadores, e as conexões eram preenchidas com argamassa seca.

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, conforme ilustrado na Figura 2.

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.

Figura 2 - Edifício em Ronan Point, Londres, 1968.



Fonte: (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b5/09-04-17.JPG>/ Acesso em 10/06/17).

O CASO DO EDIFÍCIO MURRAH

O edifício Alfred P. Murrah era um edifício do governo federal americano localizado na cidade de Oklahoma, USA. Na manhã de 19 de abril de 1995, esse edifício foi alvo de um ataque terrorista, em que um caminhão-bomba foi detonado em frente de uma de suas fachadas.

A explosão do caminhão-bomba causou severos danos ao longo de toda a fachada que se estenderam cerca de 20 m para dentro do edifício. Estima-se 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 o colapso progressivo dos andares superiores.

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 NBR 6118 do Brasil) e o projeto foi muito bem detalhado. De acordo com as próprias normas, a estrutura não foi projetada para resistir às 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, em 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 a ductilidade suficiente para redistribuir as cargas com a remoção dos três pilares da fachada, no andar térreo.

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 tais pisos.

Figura 3 - Edifício Murrah, Oklahoma, USA.



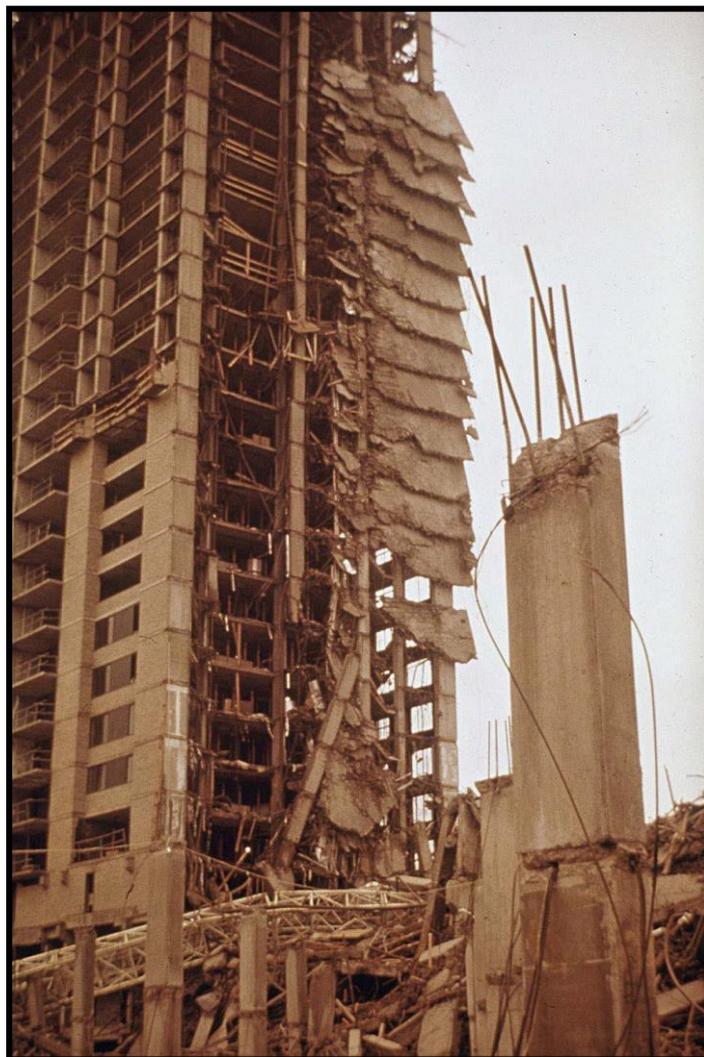
Fonte: Os autores.

O CASO DO SKYLINE PLAZA

O acidente do colapso progressivo do edifício Skyline Plaza ocorreu em 1973, durante a construção do 24º pavimento. Uma estrutura de lajes lisas de concreto armado sofreu colapso progressivo vertical e horizontal, 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 constituída de lajes lisas e a ruptura inicial ocorreu em uma região da laje tomada por esforços de punção, no 23º pavimento, devida à remoção prematura do escoramento. Catorze operários perderam a vida e trinta e quatro ficaram feridos.

Figura 4 - Skyline Plaza Apartments, USA



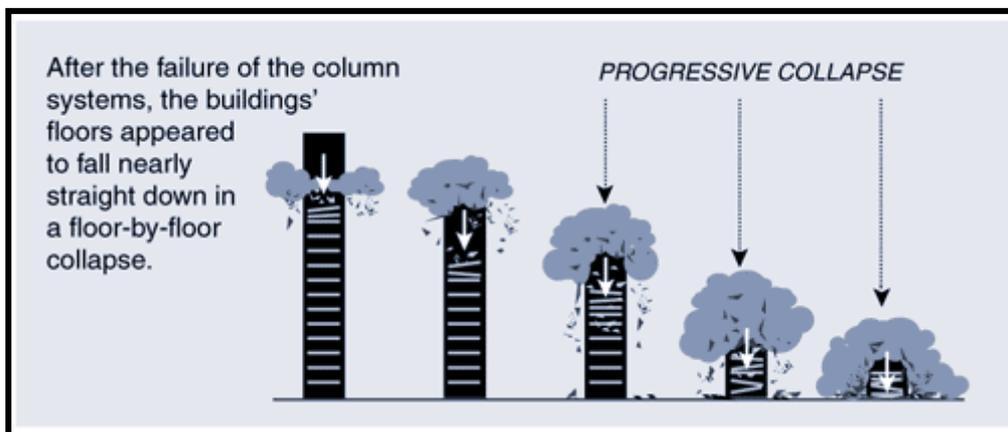
Fonte: Os autores.

O CASO DO WORLD TRADE CENTER

No caso mais famoso de toda história mundial, tanto quanto à gravidade do acidente e quanto ao tema de análise, as torres gêmeas do World Trade Center 1 e 2 desabaram em 11 de setembro de 2001, após aviões atingirem cada torre. O acidente causou danos estruturais na zona de impacto. A estrutura nesta zona perdeu sua capacidade de suportar as cargas acima dela.

O resultado do colapso foi uma combinação de danos causados pelos impactos e pelos incêndios, de forma que toda a estrutura acima da zona de impacto da aeronave entrou em colapso. O peso e o impacto da parte superior da torre sobre a parte inferior causaram uma progressão de falhas estendendo-se até o chão. Claramente, foi um colapso instantâneo da estrutura superior na zona de impacto e um "colapso progressivo" da estrutura inferior.

Figura 5- Ilustração do colapso progressivo do World Trade Center, USA.



Fonte: New York Times (12 setembro 2001)

O CASO DO EDIFÍCIO REAL CLASS NO BRASIL

O edifício ficava localizado no bairro de São Brás, em Belém do Pará, Brasil, desabou em 29 de janeiro de 2011, matando três pessoas.

Segundo o laudo do Centro de Perícias Científicas, ligado à Secretaria de Segurança Pública do Pará, houve erro no “modelo matemático” usado no projeto estrutural do prédio. Técnicos apontaram que dois pilares centrais estavam

subdimensionados. Com o esgotamento da capacidade resistente do pilar, ele se rompeu e não houve redistribuição dos esforços. Com isso ocorreu o colapso total da estrutura.

Figura 6 - Edifício Real Class, (Brasil).



Fonte: Os autores.

O CASO DO EDIFÍCIO PALACE II NO BRASIL

Apesar da causa de seu desabamento não ser o colapso progressivo e sim do esgotamento da capacidade resistente à compressão de pilares localizados no subsolo, vale observar que esta tragédia, que manchou a história da engenharia estrutural brasileira, causou oito mortes de pessoas já residentes no prédio.

Na madrugada do dia 22 de fevereiro de 1998, houve um grande estrondo no subsolo do prédio. A defesa civil rapidamente interditou o prédio e ordenou a evacuação total do mesmo. Porém às 4:30 horas da manhã, o conjunto formado pelas colunas 1 e 2 desabou, matando oito pessoas.

A causa do desmoronamento foi o subdimensionamento de dois pilares no nível das fundações, os quais suportavam uma carga de 480 tf e foram dimensionados por engano para suportar apenas 280 tf. Estes pilares entraram em colapso, por excesso de

plastificação e flambagem das armaduras, provocando a instabilidade estrutural e o desabamento globalizado do prédio.

Depois do ocorrido, o edifício Palace I, que era idêntico ao Palace II, foi evacuado e, com a ajuda de uma equipe de engenheiros estruturais, foi reforçado, passando a suportar os esforços atuantes solicitantes, e se encontra em serviço até hoje.

OS COLAPSOS MAIS RECENTES NO BRASIL

Em janeiro de 2012, no centro da cidade do Rio de Janeiro, antiga capital e maior pólo turístico do Brasil, na localidade da Cinelândia, três prédios localizados ao lado do Teatro Municipal desabaram por completo deixando dezenas de pessoas feridas e algumas vítimas fatais.

O maior prédio, de vinte andares, caiu por cima dos outros dois menores, derrubando-os. Ele possuía pilares periféricos e um pilar central (caixa de elevador).

Durante os anos sofreu com os maus tratos e obras irregulares feitas pelos proprietários das salas, como a abertura de janelas nas paredes de divisa sem autorização da Prefeitura.

Segundo relatos de conselheiros do CREA (Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura / RJ) o fato destas janelas terem sido abertas não foram a causa do desabamento, pois as paredes não eram de alvenaria estrutural e já estavam lá por vários anos.

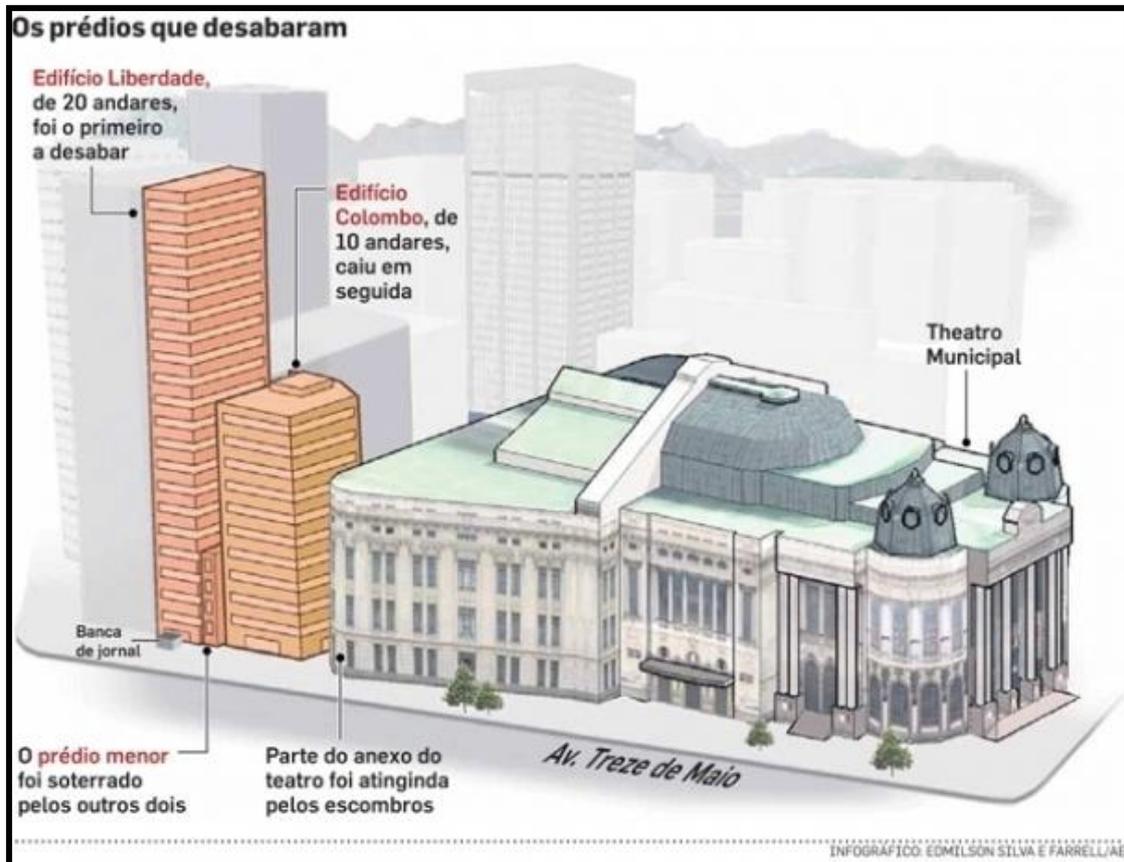
A causa provável do desabamento, segundo o CREA e peritos da Defesa Civil, seria uma obra que estava sendo feita no 16º (décimo sexto) pavimento.

Existem duas hipóteses. Uma seria o acúmulo de entulho na laje, o que acarretaria no rompimento da mesma por esgotamento da sua capacidade resistente, e assim teria havido o colapso progressivo. Mas pelas proporções do colapso, a hipótese da viga quebrada é a mais aceita.

Alguma viga deve ter sido quebrada para a passagem de tubulações, a estrutura não suportou a redistribuição dos esforços, e os pilares tiveram suas capacidades resistentes à compressão ultrapassadas.

Até a presente data, a perícia não havia divulgado o relatório final com a causa do acidente, ilustrado de acordo com a Figura 7.

Figura 7- Os prédios que desabaram no centro do Rio de Janeiro em janeiro de 2012.



Fonte: Edmilson Silva (2012).

CONCLUSÕES

São muitos os fatores que influenciam nas causas do fenômeno do colapso progressivo. Na medida do possível cada falha de execução deve ser evitada ainda no estágio da construção. Uma nova conscientização dos engenheiros estruturais e dos engenheiros de obras deve ser realizada em amplo aspecto, no sentido de se evitar que problemas futuros sejam causados nas estruturas por simples falhas de execução ou falhas de concepção.

Mesmo que as normas nacionais e internacionais se empenhem em gerar mecanismos de detalhamento nas estruturas que impeçam o surgimento de anomalias que possam gerar o colapso progressivo, estes serão sempre insuficientes. O fenômeno é muito complexo e envolve uma gama infinita de fatores.

A mão de obra não qualificada dos trabalhadores de reformas, acréscimos, instalações e modificações será sempre uma ameaça ao bom comportamento estrutural de um edifício.

A falta de manutenção das instalações, o mau uso da estrutura, a implantação de um edifício vizinho que gera esforços dinâmicos, os fatores ambientais, os ataques terroristas, as explosões, as falhas de equipamentos e muitos outros são fatores de difícil controle e impedimento que tais colapsos ocorram. O problema pode ser minimizado, mas não vai desaparecer por completo.

Para os novos prédios, novas concepções estruturais podem ser idealizadas na medida de se minimizar o aparecimento do fenômeno do colapso progressivo, e as novas classes de engenheiros estruturais devem se preocupar com os novos problemas que podem surgir, no sentido de se evitar patologias futuras e até mesmo a perda total da edificação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete. 2005.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 2002. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2014. Estruturas de concreto armado. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062/2003. Estruturas pré-moldadas. 2003.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, U.S. – *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. NISTIR 7396. 2007, 216 p.

Carvalho, R. C.; Pinheiro, L. M. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. Vol. 2. Editora Pini, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 2002. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002.

NORTH AMERICAN STEEL CONSTRUCTION CONFERENCE. Modern Steel Construction. New York. 2004.