

# Estratégias para minimizar a probabilidade de ocorrência do colapso progressivo de estruturas

---

TÚLIO RAUNYR CÂNDIDO FELIPE – PhD

ROBERTO CRUXEN DAEMON D'OLIVEIRA – M.Sc

CARLA FEIJÓ DA COSTA – M.Sc

---

DIRETORIA DE OBRAS CIVIS DA MARINHA

---

KALIEL GOMES ANDRADE – MESTRANDO

INSTITUTO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (COPPE/UFRJ)

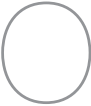
## RESUMO

ESTE TRABALHO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR E DISCUTIR AS ABORDAGENS DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA MINIMIZAR A PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO COLAPSO PROGRESSIVO DE ESTRUTURAS. UM ESTUDO DE CASO É DELINEADO COM O FOCO NA ESTRATÉGIA PROBABILÍSTICA. OUTROSSIM, É APLICADA A METODOLOGIA DO *SYSTEMATIC RELIABILITY-BASED APPROACH TO PROGRESSIVE COLLAPSE* PARA DETERMINAR AS SEQUÊNCIAS DE FALHA E OS ELEMENTOS

MAIS IMPORTANTES. A DETERMINAÇÃO DESTES ELEMENTOS, ESPECIALMENTE O ELEMENTO CHAVE, É UM REQUISITO FUNDAMENTAL PARA PROJETOS QUE VISEM MINIMIZAR A OCORRÊNCIA DO COLAPSO PROGRESSIVO. CONHECIDO O ELEMENTO CHAVE, O PROJETISTA PODE REFORÇÁ-LO, AUMENTANDO A ROBUSTEZ DA ESTRUTURA CONTRA EVENTUAIS DANOS ACIDENTAIS, POR CONSEQUENTE, PROJETAR ESTRUTURAS RESISTENTES AO COLAPSO PROGRESSIVO.

**Palavras-chave:** colapso progressivo, danos acidentais, robustez.

## I. INTRODUÇÃO

 estudo do colapso progressivo teve seu início durante a Segunda Guerra Mundial, quando foi analisado o comportamento das construções danificadas por explosões devido aos bombardeios na cidade de Londres (SMITH; BYFIELD e GOODE, 2010). O colapso progressivo do edifício *Ronan Point*, na cidade de Londres (1968), retomou o estudo desse tema, sendo o marco inicial da inclusão de recomendações nos documentos normativos da época à respeito do risco desse evento (ELLINGWOOD e LEYENDECKER, 1978). Todavia, foi somente a partir dos ataques terroristas na cidade de Oklahoma (1995) e do *World Trade Center* (2001) nos Estados Unidos da América, que

foram introduzidas novas prescrições nos códigos de projeto, bem como aumentou a conscientização da comunidade de engenharia estrutural sobre a questão do colapso progressivo e a necessidade de utilizar metodologias importantes de projeto.

O colapso progressivo é definido como a propagação de um dano localizado que conduz um caminho de falha que leva ao colapso parcial ou total de uma estrutura, sendo dependente do dano acidental que o iniciou, do grau de redundância do sistema, do efeito de inércia e da energia cinética.

Danos acidentais, como explosões, impactos, ataques terroristas, ações excepcionais, erros humanos e de construção, frequentemente causam danos locais nas estruturas, os quais podem

conceber sérias ameaças quando um ou mais elementos estruturais falham, implicando no colapso progressivo de toda a estrutura ou parte dela (ADAM *et al.*, 2018). Por conseguinte, o colapso progressivo sempre é acompanhado por graves perdas humanas e materiais.

Pela dificuldade de previsão da probabilidade de ocorrência e magnitude dos danos acidentais, não é prático nem possível projetar uma estrutura contra essas ameaças por meio dos métodos tradicionais para cargas convencionais (ADAM *et al.*, 2018). Consequentemente, danos acidentais são frequentemente abordados de forma qualitativa em códigos de construção. No entanto, abordagens qualitativas são muitas vezes inadequadas para garantir a resistência ao colapso (STAROSSEK, 2018).

As baixas probabilidades de ocorrência de eventos extremos não podem ser usadas para justificar sua negligência, porque suas consequências são particularmente severas.

Atualmente, os documentos normativos tendem a incorporar o conceito de robustez e resistência ao colapso nas suas novas diretrizes (ADAM *et al.*, 2018). A robustez de um sistema estrutural é definida como uma medida de sua capacidade de sustentar danos localizados, sem propagá-los de maneira desproporcional à intensidade do evento inicial. A resistência ao colapso é definida como a insensibilidade da estrutura a danos acidentais. Essa é uma propriedade que depende das características do sistema (resistência, ductilidade, redundância e continuidade), mas também, dos tipos de danos acidentais que podem ocorrer na estrutura. Portanto, o colapso progressivo pode ser evitado garantindo a resistência ao colapso.

Como o risco não pode ser eliminado, na prática tem-se buscado metodologias que proporcionem um tempo de resposta para que os usuários das estruturas sejam evacuados antes da ocorrência do mecanismo de reação de falha progressiva dos elementos estruturais. Na Figura 1 ilustram-se os estágios da ocorrência desse mecanismo. O tempo  $t_{id}$  representa o estágio inicial de dano, no qual a falha de um elemento estrutural não gera deslocamentos excessivos na estrutura. Entre os tempos  $t_{id}$  e  $t_{ic}$  caracteriza-se o estágio de propagação de dano, em que a estrutura apresenta redistribuição dos esforços em uma nova posição de equilíbrio. Caso o equilíbrio não seja alcançado, a partir de  $t_{ic}$  até  $t_{colapso}$ , inicia-se o mecanismo de falha progressiva de toda a

estrutura ou grande parte dela. Nesse contexto, surgiu o conceito de estruturas resilientes, que são estruturas capazes de absorver e recuperar-se de um evento extremo.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar e discutir as abordagens disponíveis na literatura para a mitigação da probabilidade de ocorrência do colapso progressivo de estruturas. Dessa forma, proporcionar aos engenheiros civis do Brasil os conceitos fundamentais para projetar estruturas resistentes ao colapso progressivo.

## 2. ABORDAGENS PARA A MITIGAÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO DE ESTRUTURAS

A literatura apresenta quatro abordagens determinísticas empíricas, que são utilizadas para garantir a resistência ao colapso, são elas:

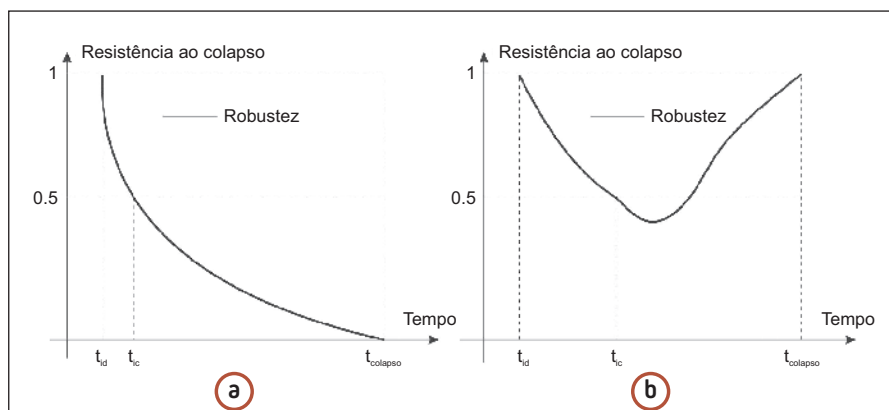
- (i) regras prescritivas de forças de amarração;
- (ii) método dos caminhos de cargas alternativos;
- (iii) método da resistência local específica e;
- (iv) isolamento por segmentação.

Ademais, a comunidade científica apresenta uma abordagem baseada em análise probabilística. Nos itens a seguir são delineadas tais abordagens.

### 2.1 Regras prescritivas de forças de amarração

Os documentos normativos que tratam sobre colapso progressivo comumente focam nas regras prescritivas de forças de amarração (RPFA). Estas visam prover um nível mínimo de redundância, continuidade e ductilidade para a estrutura (FELIPE e HAACH, 2019). As RPFA são fornecidas por meio de tirantes horizontais e verticais obtidos pela prescrição de um requisito mínimo de força de amarração. Tais tirantes são utilizados para prender alguns elementos estruturais pré-selecionados. Como a resistência ao colapso progressivo é abordada implicitamente, as RPFA são consideradas como uma abordagem de projeto indireto (FELIPE e HAACH, 2019).

Na literatura, vários trabalhos sobre a eficiência das RPFA revelaram que, em alguns casos, elas não são eficientes para mitigar o colapso progressivo



► **Figura 1**

Etapas para a ocorrência do colapso progressivo: (a) estruturas não resilientes e (b) estruturas resilientes

(SAGASETA; ULAETO e RUSSELL, 2016). Isso porque as rotações necessárias nas ligações para garantir a ação de membrana/catenária são inatingíveis. Por isso, alguns documentos normativos incluem limites de rotações em seus requerimentos para a força de amarração, por exemplo, o *Department of Defense* (UFC 4-023-03, 2009). Com relação ao comportamento de membrana/catenária de lajes/vigas, esse é o mecanismo capaz de redistribuir as cargas após um dano acidental na estrutura, sendo a última linha de defesa contra o colapso progressivo (ADAM *et al.*, 2018).

## 2.2 Método dos caminhos de cargas alternativos

A abordagem do método dos caminhos de carga alternativos (MCCA) se concentra na avaliação do comportamento da estrutura após a remoção discricionária de elementos estruturais individuais (FELIPE e HAACH, 2019). Por conseguinte, o sistema estrutural deve ser capaz de suportar os carregamentos usuais na ausência de um elemento. Tal abordagem é também determinística como as RPFA, sendo amplamente aceita pelos documentos normativos internacionais (ADAM *et al.*, 2018).

Na presença de danos locais em um elemento estrutural, o MCCA fornece o mecanismo para que as cargas sejam transferidas de um ponto de aplicação para um ponto de resistência. A redistribuição de carga resultante permite que a estrutura mantenha o equilíbrio global após a falha de um elemento. O MCCA é fornecido por regras de projeto (aumento da rigidez e resistência dos membros), e por análises estruturais explícitas (fornecimento de tirantes e ação catenária). Nesse caso, a *American*

*Society of Civil Engineers* (2010) propõe combinações de ações reduzidas na análise da propagação de danos, com o entendimento de que um cenário de falha de elementos estruturais é um evento de baixa probabilidade.

Sendo assim, a finalidade do MCCA é verificar explicitamente a robustez do sistema. Esta verificação consiste em avaliar a capacidade de redistribuição de esforços do sistema após a remoção de um elemento estrutural. No entanto, por causa das hipóteses simplificadoras (análise dinâmica simplificada, linearidade física e linearidade geométrica), usualmente as soluções de projeto do MCCA produzem níveis diferentes de robustez. Desse modo, deve-se aplicar tal abordagem com um nível mínimo de simplificações com o intuito de prover um grau aceitável de resistência ao colapso.

## 2.3 Método da resistência local específica

O método da resistência local específica (MRLE), também denominado de abordagem do projeto do elemento chave (EC), fornece uma resistência extra à estrutura mediante o dimensionamento de elementos estruturais principais para suportar um evento pré-definido. Dessa forma, o engenheiro deve avaliar os esforços solicitantes adicionais impostos pelos efeitos desse evento nas suas combinações de ações, as quais serão utilizadas para projetar a edificação. Sendo assim, a finalidade do MRLE é dimensionar os elementos ditos chaves para resistir a um dano acidental específico. Tal abordagem é o último recurso quando o MCCA é incapaz de corroborar a capacidade de redistribuição de esforços.

Como exemplo, pode-se citar os

pilares de edificações que são dimensionados contra colisões de veículos. Nesse caso, o projetista pode utilizar medidas de proteção não estruturais, as quais empregam dispositivos de proteção, ou aplicar o MRLE assumindo como evento o impacto do veículo.

O EC é definido como o elemento estrutural cuja falha ativa um colapso progressivo. De acordo com Felipe, Haach e Beck (2018), o EC de um sistema em paralelo é definido como o membro  $E_i$  nesse sistema que tem a maior vulnerabilidade no tocante ao colapso progressivo. A identificação do EC é apresentada nos documentos normativos de modo empírico (FELIPE; HAACH e BECK, 2018). Desse modo, alguns elementos estruturais devem ser avaliados, expondo-os a uma carga adicional. Esse valor pode prover um certo nível de robustez à estrutura, porém não é capaz isoladamente de prevenir a falha local.

## 2.4 Isolamento por segmentação

O isolamento por segmentação (IS), também denominado compartimentação, é uma abordagem para limitar a extensão de falha local por uma segmentação da estrutura (STAROSSEK, 2018). Tal abordagem é análoga à estratégia de dividir uma estrutura em compartimentos para confinar um incêndio ao compartimento de origem. Essa estratégia é sobretudo útil em pontes, todavia, não é explicitamente mencionada nos documentos normativos internacionais que tratam do colapso progressivo (STAROSSEK, 2018).

Portanto, o IS é uma técnica que limita fisicamente a extensão da propagação de danos. Isso pode ser alcançado fornecendo: componentes fracos

(fusíveis), que desconectam o restante da estrutura; componentes fortes, que impedem a propagação de danos e componentes de alta ductilidade, que dissipam a energia do dano (FELIPE; HAACH e BECK, 2018).

## 2.5 Abordagem baseada em análise probabilística

A análise probabilística do colapso progressivo foi abordada por vários autores (ELLINGWOOD, 2007; FELIPE; HAACH e BECK, 2018). Sob múltiplas ameaças, a probabilidade de colapso pode ser avaliada com o uso da Equação 1 (ELLINGWOOD, 2007):

$$P[\text{colapso}] = \sum_H \sum_D P[\text{colapso}|D,H] \cdot P[D|H] \cdot P[H] \quad [1]$$

Onde  $P[H]$  é a probabilidade de ocorrência do evento,  $P[D|H]$  é a probabilidade condicional de dano local, dada a ocorrência do evento;  $P[\text{colapso}|D,H]$  é a probabilidade condicional de colapso, dado o dano local  $D$  e o evento  $H$ . Na Equação 1, a soma sobre  $H$  indica as ameaças às quais a estrutura está exposta, e a soma sobre  $D$  representa os diferentes estados iniciais de dano que a estrutura pode experimentar. A probabilidade de ocorrência do evento,  $P[H]$ , pode eventualmente ser escrita em termos de uma taxa anual de ocorrência ( $\lambda_H$ ). Nesse caso, a  $P[\text{colapso}]$  também se torna uma taxa anual (ELLINGWOOD, 2007). Quando a taxa de ocorrência está abaixo do chamado risco mínimo ( $\lambda_H < 10^{-7}/\text{ano}$ ), o impacto é insignificante e o risco pode ser descartado. Por outro lado, para danos acidentais que possam ocorrer ou quando o projetista quer direcionar o estudo dos outros termos na Equação 1, pode-se assumir  $\lambda_H = 1$ . Esse é o caso, por exemplo, da

remoção discricionária de elementos orientada por códigos estruturais.

A mitigação de risco contra o colapso progressivo pode ser alcançada trabalhando-se em três frentes: (i) controlar ou limitar a  $P[H]$ ; (ii) controlar ou limitar os danos locais (termo  $P[D|H]$ ) produzidos pelo evento  $H$  e (iii) controlar ou limitar a propagação de danos (termo  $P[\text{colapso}|D,H]$ ), que eventualmente podem levar ao colapso estrutural parcial ou total. A prevenção da ocorrência do evento geralmente requer ações não estruturais (sociais ou políticas), que podem incluir a proibição de substâncias inflamáveis ou explosivas, a construção de barreiras físicas para deter o impacto do veículo, educação, treinamento e outras (FELIPE; HAACH e BECK, 2018).

O controle do termo  $P[D|H]$  envolve medidas estruturais para fortalecer ou proteger diretamente (com barreiras de segurança, por exemplo) o elemento localmente afetado pelo evento  $H$ . Por outro lado, danos localizados devido a ações acidentais podem ser aceitáveis desde que a capacidade da estrutura seja mantida durante a evacuação de emergência. Assim, controlar o termo  $P[\text{colapso}|D,H]$  envolve análise do comportamento do sistema e propagação de danos. Esse termo pode ser controlado fornecendo redundância, caminhos de cargas alternativos ou segmentação (FELIPE; HAACH e BECK, 2018).

Controlar o termo  $P[\text{colapso}|D,H]$  tem um duplo objetivo: o mais imediato é permitir a evacuação do edifício, reduzindo o dano potencial e o risco à segurança dos usuários. O segundo é permitir que o dano inicial seja reparado, para que o edifício volte a funcionar.

Uma estratégia baseada na teoria da confiabilidade estrutural para iden-

tificar o EC foi proposta por Felipe, Haach e Beck (2018), sendo dada pela Equação 2:

$$EC = \max_i [CV_i \cdot CIC_i] \quad [2]$$

Onde  $CV_i$  é o coeficiente de vulnerabilidade e  $CIC_i$  é o coeficiente de importância para o colapso progressivo. Esses coeficientes são definidos com o uso da Equação 3:

$$CV_i = \frac{P[f_i]}{\sum_{j=1}^n P[f_j]} \quad [3a]$$

$$CIC_i = \frac{P[c_i]}{\max\{P[c_j]\}} \quad [3b]$$

Em que  $P[f]$  é a probabilidade de falha do elemento  $E_i$  dado os distintos modos de falha ( $f$ ) e  $P[c]$  é a probabilidade de ocorrência do caminho de falha  $c$ , sendo calculada pela Equação 4.

$$P[c_i] = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P[f_i] \cdot P[f_j|f_i] \cdot P\left[\bigcup_{\substack{k \\ k \neq i \\ k \neq j}}^n (f_k|f_{i,j})\right] \quad [4]$$

Os caminhos de falha são assumidos como eventos mutuamente exclusivos, de modo que a probabilidade de colapso de um subsistema formado por  $n$  membros em paralelos ( $P[\text{colapso}]$ ) é determinada pela Equação 5.

$$P[\text{colapso}] = \sum_{i=1}^n P[c_i] = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P[f_i] \cdot P[f_j|f_i] \cdot P\left[\bigcup_{\substack{k \\ k \neq i \\ k \neq j}}^n (f_k|f_{i,j})\right] \quad [5]$$

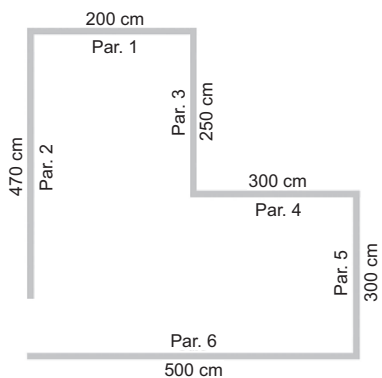
A avaliação da probabilidade do colapso progressivo com certeza é a abordagem mais racional para mitigar seus efeitos. Isso porque medidas para aumentar a robustez da estrutura serão determinadas considerando as incertezas do problema. Dessa forma, caso a Equação (5) resulte



► Tabela 1 – Estatísticas das variáveis aleatórias

Variável	$\mu$	cov	Distribuição	Referência
$f_a$ (kN/cm <sup>2</sup> )	0,252	0,150	Normal	AS 3700 (2021)
t (cm)	14,000	0,012	Uniforme	NBR 6136 (2014)
$g_i$ (kN)	$1,050 \cdot g_{ni}$	0,100	Normal	Ellingwood e Galambos (1983)
$q_i$ (kN)	$1,000 \cdot q_{ni}$	0,250	Gumbel max	Ellingwood e Galambos (1983)

► Figura 2  
Planta de forma da estrutura em análise



em um valor maior que  $10^{-7}$ , o projeto estrutural deve aumentar a resistência local dos elementos estruturais com os maiores valores de CV (Equação 3a) e CIC (Equação 3b). Esta estratégia vai melhorar a continuidade, a ductilidade e a redundância da estrutura, por consequência, vai conduzir a mitigação da ocorrência do colapso progressivo.

### 3. ESTUDO DE CASO

Nesta seção é realizado um estudo de caso em uma estrutura em alvenaria estrutural, conforme ilustrada na Figura 2. O colapso potencial desta estrutura é configurado supondo que uma parede é perdida, assumindo que a probabilidade de falha desta ocorrência é igual à unidade.

As seguintes hipóteses simplificadoras são adotadas:

- Todas as paredes são estruturais com espessura de 14 cm, altura de 280 cm e resistência à compressão característica da alvenaria igual a 1,90 MPa;
- O vão efetivo das paredes é determinado pelas distâncias eixo a eixo de cada elemento;
- Desconsideram-se as aberturas de janelas e a influência das cintas de amarração;
- O modo de falha assumido para as paredes é a compressão axial;
- Consideram-se as lajes infinitamente rígidas;

- Não são levados em conta os modos de falha das lajes.

O levantamento dos quinhões de cargas ( $Q_i$ ) para cada parede é realizado por meio da Equação 6:

$$Q_i = F_r \left( \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} + \frac{e_x \cdot X_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n X_i \cdot A_i^2} + \frac{e_y \cdot Y_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot A_i^2} \right) \quad [6]$$

Onde  $F_r$  é a resultante de carga,  $A_i$  é a área da seção transversal,  $X_i$  é a posição na direção x de aplicação do quinhão  $Q_i$  na parede i,  $Y_i$  é a posição na direção y de aplicação do quinhão  $Q_i$  da parede i,  $e_x$  é a excentricidade em relação ao centro elástico na direção x e  $e_y$  é a excentricidade em relação ao centro elástico na direção y.

O modo de falha considerado é a compressão axial. Por consequência, a equação de estado limite é dado pela Equação 7:

$$g_i(f_a, t, g_i, q_i, l_i, h) = f_a \cdot l_i \cdot t \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h \cdot \sqrt{12}}{140 \cdot t} \right)^2 \right] - (g_i + q_i) \quad [7]$$

Sendo  $f_a$  a resistência à compressão da alvenaria, t é a espessura da parede,  $l_i$  é o comprimento da parede, h é a altura da parede,  $g_i$  é a carga permanente da parede i,  $q_i$  é a carga variável da parede i.

A avaliação da Equação 7 é realizada pela Equação 8:

$$P[g_i \leq 0] = \int_{g_i \leq 0} f_x(x) dx \quad [8]$$

Onde P [ $g_i \leq 0$ ] é o operador de probabilidade e  $f_x(x)$  é a função conjunta de densidade de probabilidade do vetor x. Devido à dificuldade da integração mul-

tidimensional, a Equação 8 é resolvida aqui por meio do *First Order Reliability Method* (FORM). Para maiores detalhes sobre o FORM e sobre confiabilidade estrutural os autores recomendam o trabalho de Melchers e Beck (2018).

A Tabela 1 apresenta as estatísticas das variáveis aleatórias (VA) do problema em estudo. É assumido que as VA são independentes entre si. Na Tabela 1,  $\mu$  é a média da VA, cov é o coeficiente de variação da VA,  $g_{ni}$  é o valor nominal da carga permanente para a parede i calculado via Equação 6 com  $F_{rg} = 1500$  kN e  $q_{ni}$  é o valor nominal da carga variável para a parede i determinado por meio da Equação 6 com  $F_{rq} = 1000$  kN.

A Tabela 2 resume os resultados do problema em análise. Nota-se que as paredes 1 e 3 são as mais vulneráveis, uma vez que apresentam os maiores valores do coeficiente de vulnerabilidade (CV). Observe que este resultado está aderente com a tensão solicitante de cálculo ( $\sigma_{sd}$ ). Isso porque a parede mais carregada/solicitada resulta no maior CV, em virtude deste coeficiente ser determinado no estágio íntegro, em conformidade com a metodologia do *Systematic reliability-based approach to progressive collapse* (FELIPE; HAACH e BECK, 2018).

O coeficiente de importância para o colapso progressivo (CIC) é calculado para cada parede por meio da Equação 3b. Na Tabela 2, observa-se que os elementos mais importantes são as paredes 2 e 1, nesta ordem. Por meio da Equação 2, verifica-se que o elemento chave (EC) é a parede 2, conforme apresentado na Tabela 2. A falha do EC inicia o caminho mais provável para o colapso

► Tabela 2 – Análise probabilística da ocorrência de colapso progressivo

Parede	$\sigma_{sd}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	P [f <sub>i</sub> ]	CV	P [c <sub>i</sub> ]	CIC	CV · CIC
1	1,25	$6,30 \cdot 10^{-4}$	0,2555	$4,80 \cdot 10^{-4}$	0,0671	0,0172
2	1,17	$2,77 \cdot 10^{-4}$	0,1124	$7,15 \cdot 10^{-3}$	1,0000	0,1124
3	1,23	$5,24 \cdot 10^{-4}$	0,2127	$1,94 \cdot 10^{-4}$	0,0271	0,0058
4	1,22	$4,71 \cdot 10^{-4}$	0,1914	$8,60 \cdot 10^{-5}$	0,0120	0,0023
5	1,21	$3,95 \cdot 10^{-4}$	0,1603	$3,67 \cdot 10^{-5}$	0,0051	0,0008
6	1,12	$1,67 \cdot 10^{-4}$	0,0677	$1,87 \cdot 10^{-5}$	0,0026	0,0002
—	—	—	<b>P [colapso]</b>	$7,97 \cdot 10^{-3}$	—	—


progressivo ( $P[c_2] = 7,15 \cdot 10^{-3}$ ). Este caminho de falha contribui com 89,7% da probabilidade de colapso ( $P[\text{colapso}] = 7,97 \cdot 10^{-3}$ ). Esta probabilidade é muito alta, especialmente, porque somente é considerado o modo de falha compressão axial para as paredes. Como a  $P[\text{colapso}] > 10^{-7}/\text{ano}$ , deve-se aumentar a resistência local dos elementos com maiores valores de CV e CIC para minimizar/mitigar a ocorrência do colapso progressivo. Por exemplo, pode-se aumentar a resistência à compressão da alvenaria.

Com a  $P[\text{colapso}]$  mensurada apenas para o modo de falha, a compressão axial conduz a estrutura ter uma alta probabilidade de colapsar. Todavia, esta probabilidade também depende dos outros modos de falha para as paredes (cisalhamento e flexão), bem como dos modos de falha das lajes. Consequentemente, ao levar em conta esses modos de falhas, a  $P[\text{colapso}]$  vai ter um aumento significativo. Outro ponto relevante é o comportamento não linear da estrutura quando submetido a um dano acidental

que neste problema não foi considerado. Para maiores detalhes sobre análise não linear de estruturas sujeitas a falha progressiva, os autores recomendam os trabalhos de Felipe e Beck (2021), Felipe *et al.* (2021) e Felipe *et al.* (2019).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Códigos que tratam sobre o colapso progressivo fornecem algumas recomendações sobre projeto robusto e prevenção do colapso progressivo. No entanto, a análise probabilística do colapso progressivo não foi utilizada pela maior parte desses códigos. Como consequência, os documentos normativos não fornecem maneiras objetivas de

identificar o(s) elemento(s) chave em uma estrutura, nem medidas quantitativas de sua robustez ou vulnerabilidade. A determinação dos elementos mais importantes, especialmente o(s) elemento(s) chave, é um requisito fundamental para projetos que visem minimizar/mitigar a ocorrência do colapso progressivo. Conhecido esse(s) elemento(s), o projetista estrutural pode reforçá-lo(s), aumentando a robustez da estrutura contra eventuais danos acidentais. Desse modo, as perspectivas futuras são inserir a abordagem probabilística nos documentos normativos, de forma a prescrever diretrizes para a redução da probabilidade de ocorrência do colapso progressivo. 

#### ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADAM, J. M.; PARISI, F.; SAGASETA, J.; LU, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, v. 173, p. 122-149, 2018.
- [2] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE/SEI 7-10: Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA, 2010.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [4] AUSTRALIAN STANDARD. AS 3700: Masonry structures. Sydney, 2001.
- [5] DEPARTMENT OF DEFENSE. UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse. Washington, DC, 2009.
- [6] ELLINGWOOD, B. R.; LEYENDECKER, E. Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 104, n. 3, p. 413-423, 1978.
- [7] ELLINGWOOD, B. R.; GALAMBOS, T. V. Probability-based criteria for structural design. *Structural Safety, Elsevier*, v. 1, n. 1, p. 15-26, 1983.
- [8] ELLINGWOOD, B. R. Strategies for mitigating risk to buildings from abnormal load events. *International Journal of Risk Assessment and Management, Inderscience Publishers*, v. 7, n. 6-7, p. 828-845, 2007.
- [9] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. G.; BECK, A. T. Systematic reliability-based approach to progressive collapse. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, v. 4, n. 4, p. 04018039-9, 2018.
- [10] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. H. Discussion about progressive collapse of masonry buildings. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 3, p. 479-485, 2019.
- [11] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. G.; LEONEL, E. D.; BECK, A. T. A comprehensive ductile damage model for 3D truss structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics, Elsevier*, v. 112, p. 13-24, 2019.
- [12] FELIPE, T. R. C.; BECK, A. T. Dynamic analysis of failure paths of truss structures: benchmark examples including material degradation. *Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier*, v. 158, p. 1-22, 2021.
- [13] FELIPE, T. R. C.; HAACH, V. G.; LEONEL, E. D.; BECK, A. T. Reliability analysis of truss structures considering complete failure paths and using the FLHB model. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 4, p. 1-19, 2021.
- [14] MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. *Structural reliability analysis and prediction*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [15] SAGASETA, J.; ULAETO, N.; RUSSELL, J. Structural robustness of concrete flat slab structures. *American Concrete Institute Special Publication*, p. 273-298, 2016.
- [16] SMITH, P. P.; BYFIELD, M. P.; GOODE, D. J. Building robustness research during World War II. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 24, n. 6, p. 529-535, 2010.
- [17] STAROSSEK, U. *Progressive collapse of structures*. London: Thomas Telford Limited, 2018.

