

Colapso Progressivo em Estruturas em Pórtico de Concreto Armado: Revisão de Normas de Projeto e Resultados Bibliométricos de Revisão em Trabalhos Científicos

Guilherme de Paula Lisboa¹
Daniel de Lima Araújo²

Resumo

Eventos extremos (como explosões, impactos de veículos, ações terroristas etc.) podem provocar danos locais a edificações. Caso o evento atinja elementos verticais resistentes, por exemplo, sua propagação pode atingir grande parte ou o todo da estrutura. Esse fenômeno é conhecido por colapso progressivo e despertou o interesse da comunidade científica principalmente após o colapso do edifício A. P. Murrah Federal Building, em Oklahoma em 1995, e das Torres Gêmeas do World Trade Center, em Nova Iorque em 2001. A relevância do tema repercute sobre como projetar as estruturas para que resistam a esses danos locais, restringindo-os à área atingida. Muitas normas e recomendações de projeto de vários países ainda não apresentam considerações explícitas a respeito do assunto. Neste sentido, e atendo-se a estruturas em pórtico de concreto, este artigo apresenta-se como uma revisão acerca do colapso progressivo. São apresentados: um referencial teórico, uma revisão das normas e recomendações de projeto mais referenciadas acerca do tema e das normas brasileiras, resultados bibliométricos de uma revisão sistemática de trabalhos científicos e considerações finais com linhas de pesquisa para trabalhos futuros. Neste sentido, considera-se este artigo uma base direcionadora para pesquisas que se proponham ao estudo do colapso progressivo em estruturas em pórtico de concreto armado.

Palavras-chave: Colapso progressivo; Normas e recomendações de projeto; Revisão sistemática.

1 Introdução

O Bulletin 63 da *fib* (FIB, 2012) o colapso progressivo é um evento relativamente raro, resultante de um dano local a uma estrutura que carece de continuidade, ductilidade e redundância adequadas à prevenção da propagação do dano. A ruína por colapso progressivo ocorre devido a alterações de carregamentos ou de condições de contorno dos elementos, levando, eventualmente, a solicitações estáticas ou dinâmicas superiores à resistência da estrutura. Neste sentido, a menos que o projeto tenha dimensionado elementos suficientemente resistentes a carregamentos excepcionais ou tenha considerado caminhos alternativos de carga que redistribuam adequadamente os esforços, a estrutura como um todo ou em grande parte colapsará. O desenvolvimento do colapso continua, de elemento a elemento, até que: 1) a estrutura encontre equilíbrio; ou 2) descontinuidades

estruturais interrompam o colapso; ou ainda, 3) toda a estrutura entre em ruína (FIB; 2012).

Como encontrado em grande parte da literatura acerca do tema, o colapso progressivo é um tipo de ruptura incremental, em que o dano resultante é desproporcional à causa. Segundo Ellingwood *et al.* (2007), um colapso pode ser considerado progressivo se, em qualquer pavimento, a área horizontal atingida estiver limitada inferiormente por 70 m² (há recomendações que indicam 100 m²) ou 15% da área do piso, o menor entre os dois valores; em se tratando da propagação vertical, é comum se limitar em dois pavimentos. Comparada à definição da referência anterior, esta estabelece parâmetros quantitativos.

A respeito das diferentes definições encontradas na literatura acerca do tema, algumas referências, como Agarwal e England (2008) e Starossek e Haberland (2010), diferenciam colapso progressivo de colapso desproporcional, associando o primeiro a formas de

¹ Mestre em Mecânica das Estruturas, Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil e Ambiental (PPG-GECON), guilhermedepaulalisboa@gmail.com

² Professor Doutor em Estruturas, Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, dlaraujo@ufg.br

propagação de uma ruína local e o segundo a dimensões do dano final muito superiores às da causa inicial. GSA (2003), no entanto, reúne ambas as definições sob o termo colapso progressivo, mas ressalta, em sua versão atualizada posteriormente, que o termo pode ser encontrado como colapso desproporcional em outras referências (GSA; 2013). Neste trabalho, a exemplo de GSA (2013), aborda-se o tema sob o termo *colapso progressivo*.

Apesar de não ser uma prática difundida em muitos países ou em projetos de estruturas não-governamentais, a consideração do colapso progressivo tem sua relevância evidenciada quando levados em conta o risco ao meio ambiente, as perdas econômicas e de vidas humanas. Ainda que edificações infinitamente resistentes sejam ineficazes, é possível reduzir riscos e perdas proporcionando à estrutura capacidade resistente suficiente para que ações de evacuação dos prédios e operações de resgate, por exemplo, sejam realizadas.

As normas e recomendações de projeto que apresentam considerações acerca do colapso progressivo comumente o tratam como consequência de ações anormais sobre a estrutura (termo *abnormal loads*, em tradução literal). A expressão se refere a ações de natureza dinâmica, geralmente relacionadas a impactos de veículos, explosões em sistemas de gás (explosões internas) ou ataques por bomba (explosões internas ou externas) – tratadas como ações excepcionais pela ABNT NBR 8681 (ABNT, 2003) – ou até mesmo erros de projeto ou de execução. Ainda, cabe destacar que estruturas cujos projetos tenham se baseado em códigos que considerem ações de sismos têm ganho indireto de segurança contra colapso progressivo. Mas, conforme ressaltou Yu (2012), os elementos estruturais trabalham sob diferentes estados de tensão quando em situação de sismos (carregamentos cíclicos horizontais) ou quando em situação de colapso (com carregamentos essencialmente verticais), o que leva à necessidade de se considerarem de diferentes formas esses diferentes tipos de ação.

Muitas normas e recomendações de projeto nacionais e internacionais ainda não trazem considerações explícitas acerca do tema. Neste sentido, o objetivo deste artigo é estabelecer uma visão geral acerca do tema no que se refere a estruturas em pórtico de concreto armado. Para tanto, são apresentados, além desta Introdução:

- referencial teórico, com as principais metodologias de consideração do colapso progressivo em projeto, bem como os mecanismos de resistência considerados quando de análise estrutural de situações de colapso (Seção 2);

- revisão de normas e recomendações de projeto (Seção 3);
- resultados bibliométricos de revisão em trabalhos científicos (Seção 4);
- considerações finais dos autores (Seção 5).

2 Referencial Teórico

Em se tratando de como considerar o colapso progressivo nas estruturas de concreto armado, são conhecidas duas metodologias principais: o Método Indireto e o Método Direto. De forma simplificada, as indicações mais abrangentes do primeiro baseiam-se em expressões empíricas para o dimensionamento de armaduras que amarrem os elementos estruturais entre si, conforme abordam Eurocode 2 (CEN, 2004), Ellingwood *et al.* (2007) e o UFC 4-023-03 (DOD, 2009), por exemplo. Já o Método Direto, por meio de análise estrutural, avalia a estrutura projetada a fim de torná-la menos suscetível a eventuais cenários de colapso. Para tanto, realiza o dimensionamento de caminhos alternativos de carga quando da ruína de elementos estruturais específicos, ou garante resistência adequada a elementos-chave na estrutura a fim de se reduzir a gravidade de ruínas localizadas em situações de explosão ou de choques de veículos, por exemplo. Segundo Feng, Wang e Wu (2009), a metodologia dos caminhos alternativos de carga é a mais comum e eficaz para a consideração do colapso progressivo nas estruturas e é, por isso, considerada explicitamente por diversas normas e recomendações de projeto, como o UFC 4-023-03 (DOD, 2009), o Bulletin 63 da *fib* (FIB, 2012) e o GSA (2013).

Tomando-se apenas a metodologia dos caminhos alternativos de carga e restringindo-se as ocorrências de colapso progressivo a estruturas em pórtico, destacam-se na literatura dois principais mecanismos de resistência: o efeito de arco de compressão e a ação catenária, ambos desenvolvidos nas vigas. Ambos são mecanismos de resistência latentes, não comumente considerados em projetos estruturais correntes. O efeito de arco de compressão está associado a ganhos iniciais de resistência pelo pórtico após a ruína de um pilar, estando, no entanto, limitado à ruína da ligação viga-pilar, o que comumente se dá sob pequenos deslocamentos verticais do pilar rompido e pequenos deslocamentos horizontais dos pilares laterais da viga. A ação catenária, por sua vez, é admitida como o mecanismo de resistência última ao colapso progressivo, desenvolvendo-se apenas sob grandes deslocamentos, mas que, caso desenvolva resistência adequada, é capaz de sustentar a estrutura remanescente após a ruína de um pilar, suspendendo-o

(Figura 1(c)). Em estruturas que contam também com lajes, adicionam-se dois mecanismos de resistência: os efeitos de compressão de membrana e de tração de membrana, que são respectivamente similares ao efeito de arco de compressão e à ação catenária, mas ocorrem nas lajes.

Lew *et al.* (2011) avaliaram dois pórticos planos em concreto armado moldado in loco sob a ruína de seus pilares intermediários. O esquema experimental contemplou, para cada pórtico, uma viga contínua sobre três pilares, dos quais foi removido o intermediário (ver Figura 1). Foram obtidos vários resultados em termos de curvas *força-deslocamento vertical* do pilar removido e de tensões nas armaduras durante o carregamento das estruturas. Os autores destacaram três principais ocorrências durante os ensaios, que foram, nesta ordem: 1) esmagamento do concreto na região superior das vigas nas regiões próximas ao pilar intermediário; 2) desenvolvimento de maiores fissuras (aprofundamento e alargamento) devidas à flexão; e 3) junto ao pilar intermediário, rompimento armadura longitudinal inferior das vigas e abertura de grandes fissuras nas ligações viga-pilar. Juntando-se tais observações ao conjunto de resultados obtidos, Lew *et al.* (2011) dividiram o ensaio em três

etapas principais: 1) a formação do efeito de arco de compressão, devido, em grande parte, à restrição horizontal provocada pelos pilares; 2) a formação de rótulas plásticas nas vigas devido ao escoamento das armaduras longitudinais tracionadas e ao esmagamento do concreto sob os esforços de flexão, o que causa a redução da capacidade resistente da estrutura; e 3) a formação da ação catenária, observado a partir do ponto em que o deslocamento do pilar intermediário alcançou valores maiores que a altura da viga e foi caracterizado pelo comportamento de toda a viga à tração, proporcionando ganho de resistência. Os ensaios procederam até que a ruína global das estruturas fosse atingida devido ao rompimento das barras inferiores junto aos pilares. Estas etapas são esquematizadas na Figura 1, em que são também apresentados esboços das curvas *força-deslocamento vertical* do pilar removido, nos quais são delimitados início e fim de cada etapa.

Lowes, Mitra e Altoontash (2003) destacaram que, para que sejam adequadas à representação do colapso de uma estrutura, modelagens computacionais precisam contemplar os mecanismos não-lineares que surgem nas ligações viga-pilar durante o desenvolvimento do colapso. Segundo os autores, esses efeitos são bastante relevantes e são influenciados por

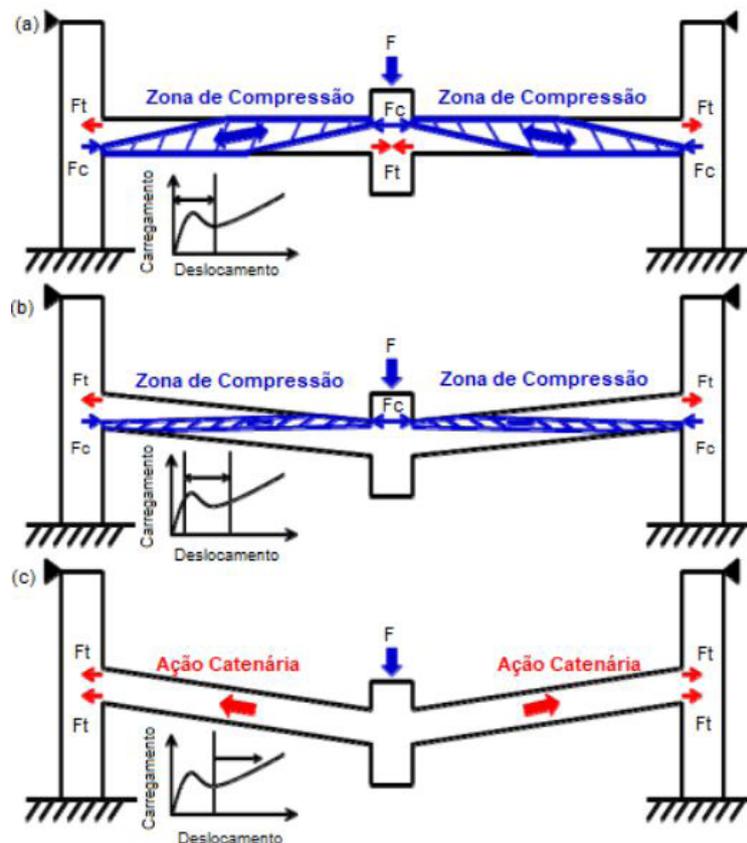


Figura 1 – Mecanismos de resistência desenvolvidos ao longo do ensaio simulando a perda do pilar central. Modificado de Lew *et al.* (2011).

três principais fatores: 1) pela forma de ancoragem das armaduras longitudinais da viga nos pilares; 2) pelo desenvolvimento de tensões e deformações de cisalhamento no núcleo de concreto devidas às tensões de compressão e de tração no perímetro da ligação; e 3) pelo aumento ou redução de resistência e de rigidez do concreto a tensões cisalhantes devido à abertura de fissuras.

Kang e Tan (2016), por meio de ensaios experimentais com esquema de ensaio semelhante ao de Lew *et al.* (2011), simularam a perda do pilar central em quatro pórticos em concreto pré-moldado, cada um com duas vigas sobre três pilares. As ligações e o topo das vigas foram feitos com concreto moldado in loco e o carregamento foi monotônico quasi-estático. Os resultados obtidos também indicaram a relevância do efeito de arco de compressão e de ação catenária nas vigas na resistência da estrutura ao colapso progressivo. No entanto, os autores destacaram que o desenvolvimento desses mecanismos é fortemente influenciado pelos pilares de extremidade e pelas ligações viga-pilar.

3 Revisão de Normas

Nesta seção são apresentadas normativas e recomendações de projeto brasileiras e internacionais. Com relação a estas últimas, as aqui indicadas foram selecionadas por serem comumente encontradas nas citações de trabalhos científicos acerca do colapso progressivo em estruturas de concreto. Além disso, considerou-se necessário também a disponibilidade de versões em português ou em inglês.

Considerações em normas e recomendações de projeto acerca do risco de ocorrência do colapso progressivo passaram a ser feitas apenas após o colapso do Edifício Ronan Point, em Londres em 1968, que era um edifício de 22 andares com estrutura em paredes de concreto pré-moldado, que foi sujeito a ruína de grande parte de sua estrutura devido a uma explosão de gás de cozinha no 18º pavimento.

De maneira geral, percebe-se que não há consenso ou regras universais admitidas pelos diversos documentos. Notam-se, no entanto, diferentes conjuntos de códigos, que podem ser agrupados segundo a metodologia de abordagem do colapso progressivo. Identificadas na *Seção 2* deste trabalho, as duas principais metodologias de consideração desse fenômeno são o Método Indireto e o Método Direto, sendo este último subdividido em Método dos Caminhos Alternativos de Carga e Dimensionamento de Elementos-Chave. As três metodologias são tratadas a seguir.

3.1 Método Indireto

Este método baseia-se no provimento de níveis mínimos de continuidade e de ductilidade às estruturas, o que pode ser conseguido por meio de amarrações entre os elementos estruturais, por exemplo. Em códigos que contemplam categorização de estruturas quanto ao risco de ocorrência de colapso progressivo, esse método é mais comumente recomendado a estruturas com baixo risco. Entretanto, as forças de dimensionamento das amarrações não são unificadas entre os documentos e, naqueles em que são indicadas, não há referências a métodos de análise estrutural. Devido a isso, este método é considerado indireto.

Em se tratando de estruturas de concreto, essas amarrações podem ser consideradas como compostas pelas próprias armaduras passivas dos elementos de concreto, ou por armaduras passivas adicionais, ou, ainda, por cordoalhas de protensão inseridas neles sem aplicação de carga (solicitação apenas sob eventual colapso).

Em se tratando das forças de amarração, essas não são consideradas por todos os códigos que seguem o método indireto. Alguns deles apenas indicam que devem ser tomados cuidados a fim de se minimizar a possibilidade de colapso progressivo, como a ABNT NBR 9062 (ABNT, 2017), ou recomendam detalhamentos de armadura sob situações específicas, como o faz a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) para lajes submetidas a punção. A ASCE 7-05 (ASCE, 2006) apenas indica que devem ser providas resistência, continuidade e ductilidade adequadas à redistribuição de solicitações em caso de ruínas locais nas estruturas, mas sem recomendações explícitas de como realizar tais considerações.

Normas e recomendações como Eurocode 2 (CEN, 2004), Ellingwood *et al.* (2007) e o UFC 4-023-03 (DOD, 2009) apresentam indicações específicas para o dimensionamento de amarrações em diferentes elementos das estruturas. Ademais, esta última traz ainda limitações quanto à capacidade de rotação das vigas a fim de que esses elementos possam ter suas armaduras longitudinais consideradas como amarrações contra o colapso progressivo.

3.2 Método dos Caminhos Alternativos de Carga

Esta metodologia normalmente aborda o problema sem admitir a causa da ruína local. Para tanto, os códigos que a seguem o fazem considerando determinados elementos verticais sob ruína, de maneira que, a partir disso, a análise estrutural avalie a capacidade da estrutura remanescente de redistribuir o acréscimo de solicitações resultantes.

Apesar de, em teoria, os fundamentos nos quais se embasa o método serem bastante objetivos, na prática há uma grande gama de parâmetros de análise a serem adotados, o que pode resultar em diferentes níveis de segurança contra o colapso sob diferentes análises. Dentre esses parâmetros estão: o tipo de análise (se linear estática, não-linear estática ou não-linear dinâmica, por exemplo), a forma de se considerar a não-linearidade física, a combinação de carregamento, o fator de amplificação dinâmica para análises estáticas, a capacidade de deformação das ligações *etc.*

Nesta metodologia, destacam-se os códigos UFC 4-023-03 (DOD, 2009) e GSA (2013), com indicações muito semelhantes entre si. Ambos recomendam métodos de análise linear estática, não-linear estática e não-linear dinâmica. O primeiro método é mais simples e de execução e análise mais fáceis, mas apresenta restrições de aplicação e depende de diversas considerações, incluindo a definição de fatores de amplificação a fim de que sejam contempladas as não-linearidades física e geométrica e ainda os efeitos inerciais. A análise não-linear dinâmica pode ter resultados mais realistas desde que considere adequadamente o amortecimento e as não-linearidades nas ligações entre os elementos, por exemplo. A análise não-linear estática pode representar as não-linearidades física e geométrica, mas necessita de fatores de amplificação que ponderem os efeitos inerciais na estrutura.

3.3 Dimensionamento de Elementos-Chave

Este método é recomendado como último recurso caso não sejam possíveis caminhos alternativos de carga para redistribuição dos esforços. Neste sentido, elementos específicos são dimensionados para resistirem a ações extremas específicas, como o impacto de um veículo ou uma explosão de bomba, por exemplo, de forma a não venham à ruína e não desencadeiem a propagação do colapso. Dessa forma, a análise estrutural segundo esta metodologia é sempre dependente do cenário causador do colapso inicial, isto é, do carregamento.

São exemplos de códigos que abordam esta metodologia Ellingwood *et al.* (2007) e o UFC 4-023-03 (DOD, 2009).

3.4 Análise Crítica das Normas e Recomendações de Projeto Brasileiras e Internacionais

Em se tratando da norma brasileira de projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, ABNT NBR 9062 (ABNT, 2017), é apontado que devem ser

tomados cuidados especiais em fase de projeto a fim de se minimizar a possibilidade de ocorrência de colapso progressivo. Entretanto, não se apresenta nenhuma forma de se fazer isso.

Com relação à norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado, ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014), é indicado pelo documento que deve ser considerado o estado limite último de colapso progressivo. Não há, no entanto, definição de tipologias de edificações em que tal consideração deve ser feita. A norma apenas apresenta recomendações específicas de detalhamento de armaduras longitudinais em regiões de lajes lisas submetidas a punção. Contudo, essas armaduras não são definidas com base em análise estrutural que considere a ocorrência de carregamentos específicos, por exemplo. A não ser por essas situações de projeto, não há definição sequer de amarrações entre elementos estruturais, definidas via método indireto, por exemplo, a fim de se proverem continuidade, ductilidade e integridade estruturais adequadas à prevenção do colapso progressivo.

Isso posto, apesar de a consideração do colapso progressivo ser recomendação normativa, no Brasil a possibilidade de ocorrência desse fenômeno é negligenciada nos projetos de estruturas de concreto, o que se deve, primordialmente, à falta de orientações e metodologias sobre como o tema deve ser abordado e em que situações isso deve ser feito.

Acerca das forças de amarração definidas por normas e recomendações de projeto internacionais (método indireto), aponta-se que são em geral associadas a arranjos estruturais bastante regulares, e, no caso de estruturas reticuladas, com lajes apoiadas em vigas e de conformações retangulares ou quadradas. As forças de amarração são determinadas sem análise estrutural e, em se tratando das amarrações horizontais (isto é, dispostas em vigas e lajes) em um pavimento, em geral, assume-se que as solicitações devidas ao colapso variam linearmente com o vão na direção considerada. É possível, no entanto, que isso não seja uma regra, e que haja variações dependentes da quantidade de elementos estruturais no pavimento e da quantidade de pavimentos, por exemplo. Outro ponto é que, ao contrário do que ocorre no Brasil, estruturas reticuladas em concreto norte-americanas e europeias (origens das principais recomendações com base em forças de amarração) são normalmente contraventadas, o que confere a elas maiores caminhos alternativos de carga e incorre em menor solicitação das amarrações em eventual colapso.

A respeito dos métodos diretos, por serem baseados em análise estrutural, levam a abordagens mais precisas do colapso progressivo em fase de projeto. Das recomendações que se pautam no

dimensionamento de caminhos alternativos de carga, no entanto, que têm definições mais completas em GSA (2013) à data deste texto, não há exemplos de aplicação para todas as metodologias de análise propostas (linear estática, não-linear estática e não-linear dinâmica). Para estruturas em pórtico monolítico de concreto armado, por exemplo, é apresentado apenas um exemplo de análise linear estática de um edifício com conformação retangular. Exemplos de análise não-linear estática ou não-linear dinâmica não são contemplados.

Outro ponto relevante a ser destacado é que as normas comumente não classificam estruturas de forma a definir diferentes níveis de probabilidade de ocorrência do colapso progressivo. Neste sentido, códigos com metodologia única de abordagem desse fenômeno (via método indireto, por exemplo) podem levar a projetos conservadores e pouco econômicos. Dentre os poucos documentos que classificam as estruturas e definem metodologias adequadas a cada nível de probabilidade de ocorrência de colapso progressivo, é notável, no entanto, que essas classificações se restringem a estruturas específicas, geralmente edificações federais e militares.

É evidente que o método direto sempre levará a tratamento mais eficaz do colapso progressivo, principalmente em se tratando de estruturas não contraventadas, como usualmente o são as estruturas reticuladas em concreto no Brasil. No entanto, a depender da tipologia da edificação analisada, pode haver menor probabilidade de ocorrência do fenômeno, bem como menores perdas associadas a eventuais situações de colapso. Considerando-se que projetos e execuções de estruturas assim poderiam ser onerados de forma relevante, é interessante que as estruturas sejam classificadas de forma a direcionar o método de tratamento do colapso progressivo segundo os riscos envolvidos e as perdas associadas. Destaca-se que Ruthes (2020) apresenta proposta neste sentido, com foco à aplicação em projeto de estruturas de concreto brasileiras.

Esse conjunto de fatores evidencia que o tema ainda é pouco conhecido e se mostra como um vasto campo de estudo a ser explorado.

4 Revisão em Trabalhos Científicos

Nesta seção, é apresentada uma revisão bibliográfica em trabalhos científicos acerca do colapso progressivo. Essa revisão se dá aos moldes do que se conhece como mapeamento sistemático (*Mapping Study*), que estabelece um procedimento de revisão com vistas à sumarização do que já é posto ou vem sendo adotado e dos resultados já alcançados por

pesquisas sobre o objeto de estudo, tornando mais fácil a identificação de possíveis novas linhas de estudo, por exemplo. Os resultados obtidos são apresentados em termos bibliométricos.

O levantamento realizado deu-se com base em artigos científicos disponíveis no Portal de Periódicos da CAPES utilizando as seguintes bases de dados: Scopus (Elsevier), ASCE, Web of Science, ScienceDirect Journals (Elsevier), SpringerLink. Realizada entre os dias 13 e 20 de fevereiro de 2019, esta busca utilizou as seguintes strings: 1) “*progressive collapse*” AND “*precast concrete*” (com correspondência exata para ambas); 2) “*progressive collapse*” AND “*concrete*” (com correspondência exata para ambas); e 3) “*progressive collapse*” AND *structure* (com correspondência exata apenas para a primeira).

Destaca-se que, mesmo após o resultado das buscas pelas *strings* propostas, para que fosse incluído como referência a ser aqui apresentada, cada artigo científico deveria obedecer, conjuntamente, aos seguintes critérios de inclusão, aplicados nesta ordem:

- 1) **CRITÉRIO 1** – ter sido publicado entre 1990 e 2019. Com relação à data inicial adotada, segundo ressaltam Adam *et al.* (2018), apenas após o colapso do edifício A. P. Murrah Federal Building, em Oklahoma em 1995, e das Torres Gêmeas do World Trade Center, em Nova Iorque em 2001, a importância da consideração do colapso progressivo em estruturas por parte de normas e recomendações de projeto despertou o interesse da comunidade científica para este tema. Além disso, o grande crescimento na utilização de computadores na solução de problemas complexos observado a partir dos anos de 1990 torna mais relevantes estudos teórico-computacionais desenvolvidos a partir dessa data;
- 2) **CRITÉRIO 2** – ter sido publicado em periódico revisado por pares,
- 3) **CRITÉRIO 3** – estar disponível em uma das seguintes bases de dados: Scopus (Elsevier), Web of Science, ScienceDiretc Journals (Elsevier), SpringerLink, ou ASCE Library (American Society of Civil Engineers);
- 4) **CRITÉRIO 4** – conter alguma das *strings* de busca no título OU no resumo dos artigos selecionados pelos critérios anteriores;
- 5) **CRITÉRIO 5** – relacionar-se diretamente com o tema. Este critério foi aplicado por meio da leitura dos resumos dos trabalhos selecionados pelo Critério 4, considerando-se com relação direta as abordagens de

colapso progressivo em estruturas de concreto. Artigos tratando de colapso de estruturas sob incêndio foram excluídos, principalmente devido ao fato de que há alterações de propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos a altas temperaturas (como módulo de elasticidade, por exemplo), situação à qual não estão comumente sujeitas as estruturas sob colapso progressivo provocado por outras causas que não incêndio. Além disso, desde que tratassem a respeito de considerações teóricas de carregamentos geralmente associados a colapso progressivo, como ondas de explosões ou impactos de veículos, por exemplo, artigos abordando o fenômeno em estruturas metálicas também foram desconsiderados neste critério;

- 6) CRITÉRIO 6 – ser escrito em inglês OU português.

4.1 Seleção dos Trabalhos

Neste item, os artigos científicos segundo os critérios de inclusão aplicados aos resultados retornados à busca no Portal de Periódicos da CAPES, conforme apresentado anteriormente. As etapas a seguir apresentadas foram executadas e documentadas com auxílio da ferramenta Microsoft Excel®.

Destaca-se aqui que os Critérios 1, 2, e 3 de inclusão podem ser aplicados diretamente com o uso das ferramentas de busca avançada oferecidas pelo Portal, ao contrário dos Critérios 4, 5 e 6, que são aplicados sob avaliação individual de cada artigo pelo pesquisador. Neste sentido, e considerando-se a quantidade bastante grande de resultados retornados mesmo após a aplicação dos três primeiros critérios a cada uma das três buscas (como poderá ser constatado mais adiante), seria bastante onerosa a aplicação dos três últimos critérios a todos os trabalhos retornados após a aplicação dos três primeiros. O Portal de Periódicos da CAPES, no entanto, oferece ferramentas para refinamento de resultados, categorizados em tipo de recurso (artigos, resenhas etc.), autor, bases de dados e tópicos, por exemplo. O refinamento por tópicos foi utilizado para que os resultados retornados até a aplicação do Critério 3 fossem reduzidos pela seleção de tópicos apresentados pelo Portal. Os resultados obtidos após essa redução foram também verificados com relação a eventuais repetições, para só então serem aplicados os Critérios 4, 5 e 6.

A busca por artigos no Portal de Periódicos da CAPES deu-se em três etapas, cada uma delas correspondente a uma das três *strings* definidas

anteriormente. Sabendo-se que estruturas em concreto pré-moldado são mais suscetíveis ao colapso progressivo que aquelas em concreto moldado in loco e dando foco maior àquelas, a primeira busca foi realizada com as *strings* “*progressive collapse*” AND “*precast concrete*”, com correspondência exata para ambas. A redução da quantidade de trabalhos retornados conforme a aplicação dos critérios de inclusão pode ser verificada na Figura 2, em que: o primeiro ponto se refere à quantidade total de artigos retornados à busca utilizando-se apenas a combinação de *strings*; os pontos C’s se referem às quantidades de artigos selecionados após a aplicação do critério de índice correspondente; *Tóp. 1* indica o número de artigos após a seleção conjunta dos tópicos *Progressive Collapse* e *Precast Concrete*, nesta ordem, para refinamento dos resultados após o Critério 3 (bases de dados); e *Rept.* indica a quantidade de artigos após a exclusão de resultados repetidos.

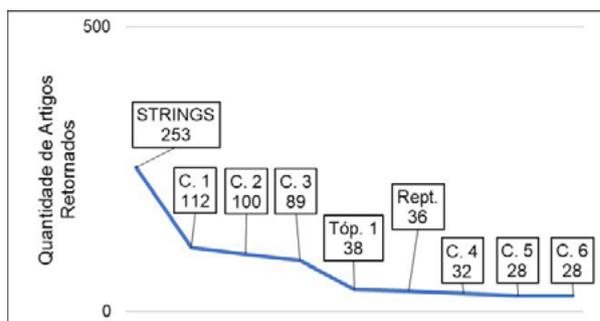


Figura 2 – Redução da quantidade de trabalhos retornados às *strings* “*progressive collapse*” and “*precast concrete*”.

Fonte: Autoria Própria.

A segunda busca foi realizada com as *strings* “*progressive collapse*” and “*concrete*”, com correspondência exata para ambas. A redução da quantidade de trabalhos aderidos aos critérios de inclusão pode ser verificada na Figura 3, em que: *Tóp. 1* indica o número de artigos após a seleção conjunta dos tópicos *Progressive Collapse* e *Concrete*, nesta ordem, e *Tóp. 2* se refere à aplicação do tópico *Frames*, após os anteriores – já que restrição pelos dois primeiros tópicos ainda retornou uma quantidade significativa de artigos e o terceiro tópico não estava disponível de início, surgindo somente após a aplicação dos dois primeiros. O terceiro tópico se justifica dada a proposta deste trabalho em tratar do colapso progressivo em estruturas em pórtico de concreto.

A terceira busca utilizou as *strings* “*progressive collapse*” and *structure*, com correspondência exata apenas para a primeira. A redução da quantidade de trabalhos retornados conforme a aplicação dos

critérios de inclusão pode ser verificada na Figura 4, em que: *Tóp. 1* indica o número de artigos após a seleção conjunta dos tópicos *Progressive Collapse e Reinforced Concrete*, *Tóp. 2* se refere à aplicação do tópico *Explosions*, após os dois anteriores, e *Tóp. 3* se refere ao tópico *Finite Element Method*, aplicado após os três anteriores. O *Tóp. 2* se justifica com base no fato de que boa parte dos colapsos progressivos ocorridos até hoje terem se dado em consequência de explosões. O *Tóp. 3* é justificado devido ao fato de que análises computacionais desse fenômeno são comumente realizadas com base no Método dos Elementos Finitos. Em tempo, chama-se atenção para que, para esta terceira combinação de strings, a base da *ASCE Library (American Society of Civil Engineers)* não estava disponível, sendo selecionadas apenas as outras quatro bases indicadas anteriormente.

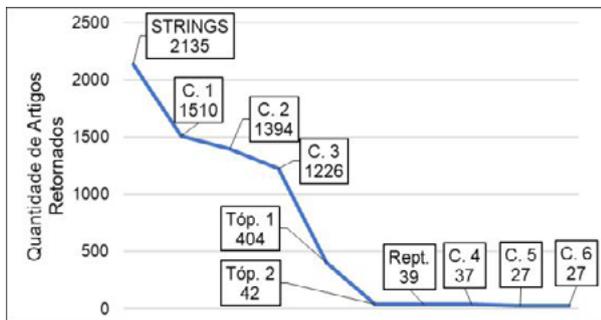


Figura 3 – Redução da quantidade de trabalhos retornados às strings “*progressive collapse*” and “*concrete*”.

Fonte: Autoria Própria.

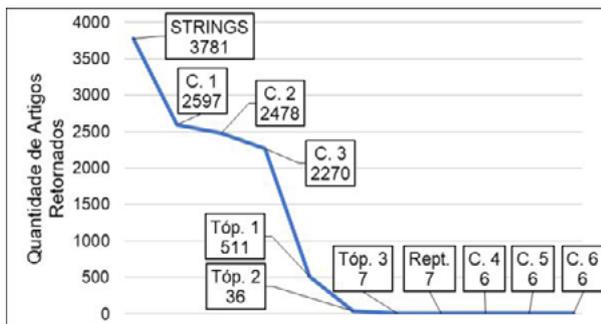


Figura 4 – Redução da quantidade de trabalhos retornados às strings “*progressive collapse*” and *structure*”.

Fonte: Autoria Própria.

Ao final das buscas e da desconsideração de trabalhos não aderidos aos critérios de inclusão admitidos, foi selecionado um total de 61 artigos científicos: 28 da primeira combinação de strings, 27 da segunda e seis da terceira.

4.2 Identificação dos Temas Abordados

Selecionados os artigos após a aplicação de todos os critérios de inclusão, buscou-se identificar os principais temas abordados nos trabalhos selecionados. Tal atividade foi realizada com base na leitura dos resumos desses trabalhos, de forma que, caso determinada abordagem não tenha sido aí explicitada, foi considerada não tratada pelo artigo. Neste sentido, as abordagens dos trabalhos foram classificadas:

- quanto ao ESTUDO, se teórica (numérico e/ou analítico) e/ou experimental;
- quanto à ÊNFASE, se: nas ligações laje-laje, nas ligações viga-laje, nas ligações viga-pilar, em paredes, na ruptura por cisalhamento em pilares de pórticos, em paredes (estruturais ou de preenchimento), em pilares, ou em vigas;
- quanto ao MÉTODO de abordagem. Baseando-se no que é posto por algumas normas, como já comentado, se o método da pesquisa era: Indireto, Direto pela consideração de Caminhos Alternativos de Carga, ou Direto pela consideração de Elementos-chave;
- quanto à ANÁLISE estrutural. Baseando-se também no que é posto por algumas normas, se: linear (estática ou dinâmica), não-linear estática, não-linear quasi-estática ou não-linear dinâmica;
- quanto ao MECANISMO DE RESISTÊNCIA observado, se ocorrem efeitos de arco de compressão ou de ação catenária em vigas ou ações de membrana em lajes, todos associados à formação de caminhos alternativos de carga;
- no caso dos estudos teórico-numéricos, quanto à PRECISÃO DA MODELAGEM, isto é, se macromodelos, utilizando elementos finitos de viga e placa ou casca, ou se micromodelos, com elementos finitos tridimensionais.

Chama-se atenção para o fato de que os itens de classificação apontados não são, de forma alguma, excludentes entre si, de maneira que, em uma mesma classificação (quanto ao estudo, por exemplo), determinado artigo pode apresentar abordagens tanto experimental quanto teórica (numérica, por exemplo). Isso possibilita, ao final de uma classificação, quantidade total de artigos maior que aquela obtida após a aplicação dos critérios de inclusão. Outro ponto é que, ou por falta de maiores informações no resumo de determinado artigo ou ainda pelo tipo de abordagem não ter sido considerada neste trabalho, alguns dos

artigos aderidos aos critérios de inclusão podem não ter contemplado nenhuma das classificações apresentadas.

Para apresentação dos resultados obtidos segundo as classificações listadas, os artigos foram separados por grupos conforme os seguintes temas: 1) trabalhos com abordagem teórica, Figura 5, ou experimental, Figura 6, retornados ao conjunto das strings “*progressive collapse*” and “*concrete*” e “*progressive collapse*” and *structure*; e 2) trabalhos com abordagem teórica, Figura 7, ou experimental, Figura 8, retornados às strings “*progressive collapse*” and “*precast concrete*”. A separação das estruturas em concreto pré-moldado se justifica devido à maior suscetibilidade das estruturas em concreto pré-moldado comparativamente às suas equivalentes em concreto moldado in loco. Portanto, neste trabalho considera-se relevante destacar os artigos científicos nessa linha de

pesquisa, separando-os daqueles referentes a estruturas monolíticas de concreto, por exemplo.

Considerando-se o conjunto dos estudos teóricos e experimentais apresentados na Figura 5 e na Figura 6, nota-se que a ênfase mais recorrente nos trabalhos selecionados se dá com relação às ligações viga-pilar, o que também é percebido quando são levadas em conta as subestruturas mais comumente estudadas experimentalmente (uma viga contínua sobre três pilares formando um pórtico plano de um pavimento) e o fato de que muitos destes estudos servem de base para abordagens teóricas para efeito de calibração de parâmetros de projeto, por exemplo. Neste sentido, e tendo-se também em vista eventuais dificuldades de execução de ensaios experimentais para o estudo de colapso progressivo em estruturas com arranjos mais complexos, isto é, mais próximos dos de edifícios reais, é notável que estudos com ênfase principalmente

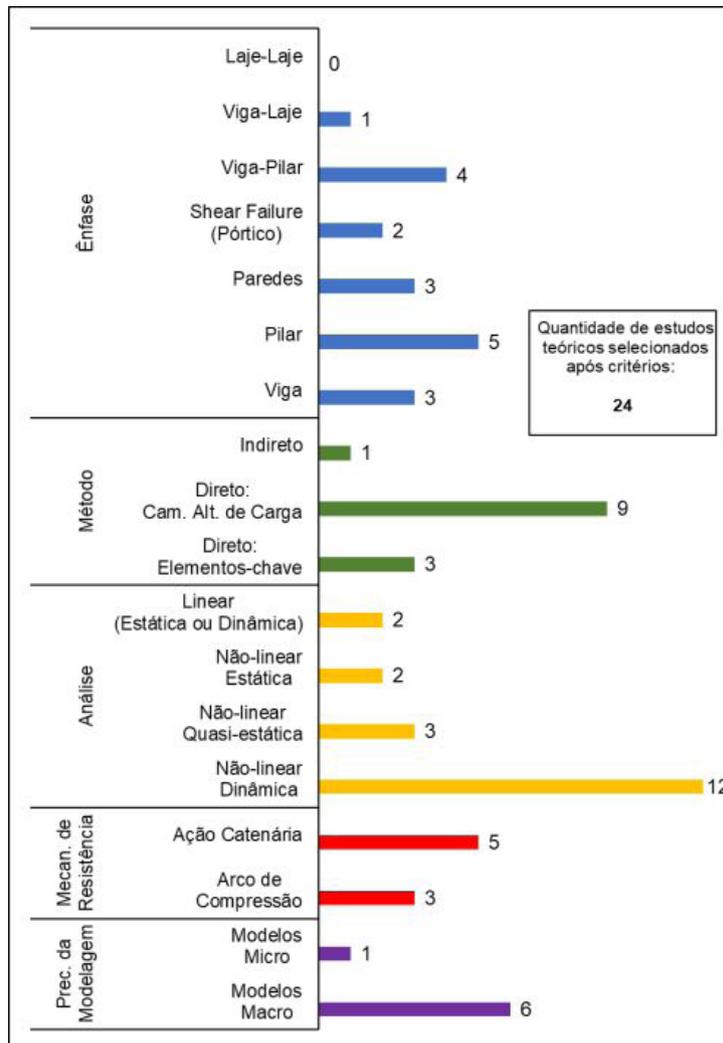


Figura 5 – Classificação dos estudos com abordagem teórica retornados às strings: “*progressive collapse*” AND “*concrete*” e “*progressive collapse*” AND *structure* (24 trabalhos).

Fonte: Autoria Própria.

em remoção de pilares e que, conseqüentemente, considerem métodos diretos por elementos-chave, sejam mais evidentes em estudos teóricos. Sobre arranjos mais complexos, Adam *et al.* (2018) também consideram serem ainda necessários ensaios experimentais em estruturas 3D. Nota-se, também, que poucos estudos dedicaram-se ao colapso progressivo em estruturas compostas por paredes (estruturais e de preenchimento), às ligações viga-laje e à falha por cisalhamento verificada em pilares de pórticos. Também não foram encontrados estudos abordando as ligações laje-laje, para tipos de estruturas em que estas existam, ou sobre a influência destes elementos no comportamento estrutural em colapso progressivo, como também apontam Adam *et al.* (2018).

As dificuldades na realização de ensaios experimentais perpassam também pela forma de se aplicar carregamento às estruturas, haja visto que colapsos progressivos são fenômenos essencialmente dinâmicos na direção vertical, diferentemente do que acontece em terremotos, em que os movimentos predominantes

são horizontais. Neste sentido, análises não-lineares dinâmicas em ensaios experimentais se dão, ou com a utilização de equipamentos especialmente desenvolvidos para tanto (o que é bastante incomum), ou pela consideração de fatores de amplificação dinâmica em ensaios estáticos ou quasi-estáticos, o que faz com que análises dinâmicas sejam mais facilmente desenvolvidas teoricamente. Carregamentos quasi-estáticos são mais exequíveis que os dinâmicos em ensaios experimentais e podem ser aplicados até a ruína das estruturas estudadas, isto é, levando-as a comportamentos não-lineares. Daí, conclui-se ser um campo aberto para pesquisas a realização de estudos experimentais que considerem análises não-lineares dinâmicas, até mesmo para a calibração dos próprios fatores de amplificação dinâmica utilizados em ensaios estáticos ou quasi-estáticos, como bem apontam Adam *et al.* (2018).

A respeito dos métodos de abordagem, o método indireto de avaliação, que resulta, por exemplo, na inserção de cordoalhas de protensão em elementos

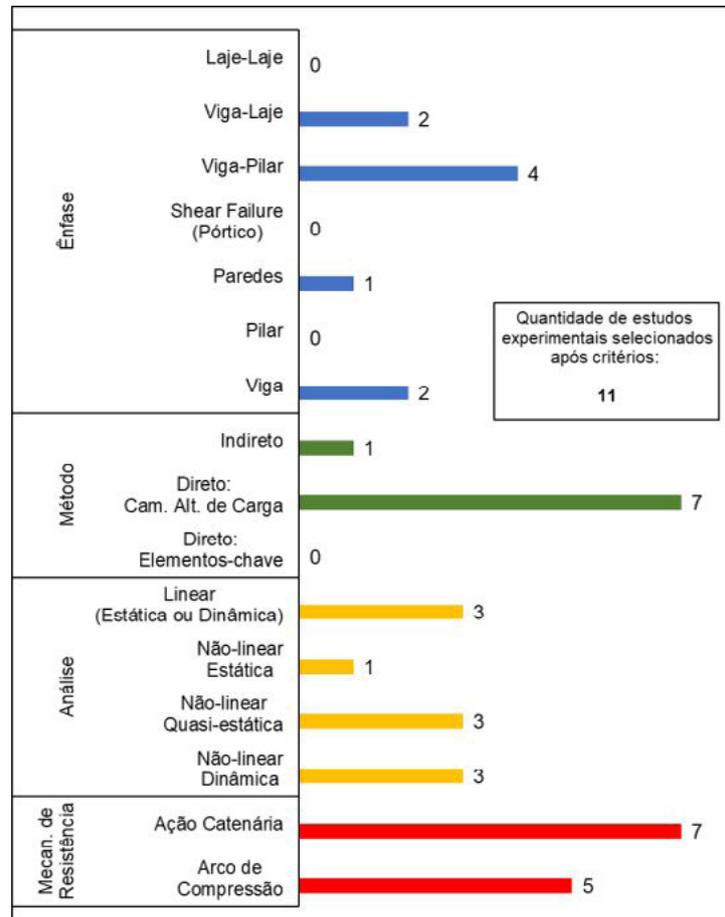


Figura 6 – Classificação dos estudos com abordagem experimental retornados às strings: “progressive collapse” and “concrete” e “progressive collapse” and structure (11 trabalhos).

Fonte: Autoria Própria.

estruturais de concreto, não tem sido objeto comum de estudo, o que também é colocado por Adam *et al.* (2018). Da mesma forma, o dimensionamento de elementos-chave para resistência a carregamentos excepcionais não tem sido uma abordagem comum. Na contramão desses dois métodos, a verificação de caminhos alternativos de carga (método direto), que implica na formação de mecanismos de resistência ao colapso, como o arco de compressão e a ação catenária, por exemplo, tem sido mais estudada.

Em se tratando dos mecanismos de resistência ao colapso progressivo estudados, foi observada maior evidência da ação catenária sobre o efeito de arco de compressão.

Com relação à precisão da modelagem computacional nos estudos teóricos que utilizaram essa metodologia, os macromodelos (modelagem

de estruturas com a utilização de elementos de viga e de placa ou casca, por exemplo) são os mais recorrentemente utilizados em detrimento dos micromodelos (modelagem com elementos tridimensionais). Há trabalhos que se valem de ambos: dos primeiros para modelar a estrutura completa do edifício estudado a fim de se encontrarem as zonas mais solicitadas e, a partir daí, analisar estas últimas com a utilização de micromodelos, por exemplo.

A exemplo do que acontece nas estruturas de concreto em geral (abordadas na Figura 5 e na Figura 6), nota-se maior ênfase no estudo das ligações viga-pilar também para as estruturas em concreto pré-moldado (Figura 7 e Figura 8). As ligações laje-laje e viga-laje não têm sido comumente consideradas. Com relação à ruptura ocorrida por cisalhamento em pilares de pórticos, não foram encontradas abordagens teóricas,

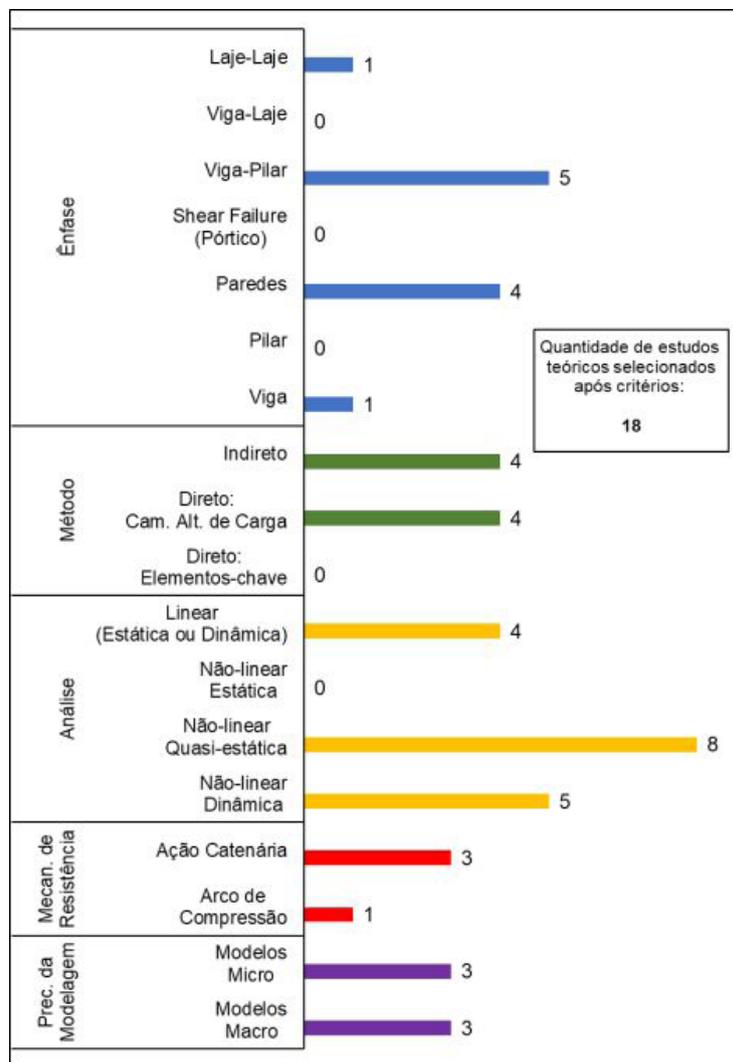


Figura 7 – Classificação dos estudos com abordagem teórica retornados às strings: “progressive collapse” and “precast concrete” (18 trabalhos).

Fonte: Autoria Própria.

mas já há resultados experimentais. As dificuldades de execução de ensaios experimentais com arranjos estruturais mais complexos, já mencionadas, também se fazem presentes nos estudos de estruturas pré-moldadas. Desta forma, abordagens que considerem os pilares e a atuação destes como elementos-chave (método direto) também são escassas aqui, mesmo em estudos teóricos, que poderiam levar em conta, por exemplo, estruturas de edifícios inteiros em concreto pré-moldado, a exemplo do que pode ser visto em estudos de concreto moldado no local. A carência por tais pesquisas é também apontada por Adam *et al.* (2018) quando tratam especificamente das estruturas em concreto pré-moldado. A consideração de paredes (estruturais ou de preenchimento) ainda carece principalmente de estudos experimentais.

Sobre os métodos de abordagem, tanto há trabalhos que consideram os efeitos de amarrações entre elementos (método indireto), quanto aqueles com foco sobre os efeitos de ação catenária e de arco de compressão para provimento de caminhos alternativos de carga (método direto), mas ainda com menos

evidência para os primeiros. Foi encontrado um único trabalho que trata ambos os métodos.

Com relação ao tipo de análise, o que se percebe no caso de estruturas pré-moldadas é o mesmo que o tratado anteriormente: análises não-lineares quasi-estáticas são as mais comumente utilizadas, tanto pelos estudos experimentais quanto pelos teóricos. Dos oito artigos com este último tipo de análise, cinco também apresentam resultados experimentais. Novamente, análises não-lineares dinâmicas são mais recorrentes em estudos teóricos.

Sobre os mecanismos de resistência ao colapso progressivo, semelhante ao observado para estruturas monolíticas, a ação catenária é mais evidenciada frente ao efeito de arco de compressão.

Entre os estudos que utilizam de modelagem computacional, foram encontrados trabalhos que utilizam ou macromodelos ou micromodelos. Diferentemente do observado anteriormente, não foram encontrados estudos que lançam mão de ambas as abordagens em conjunto.

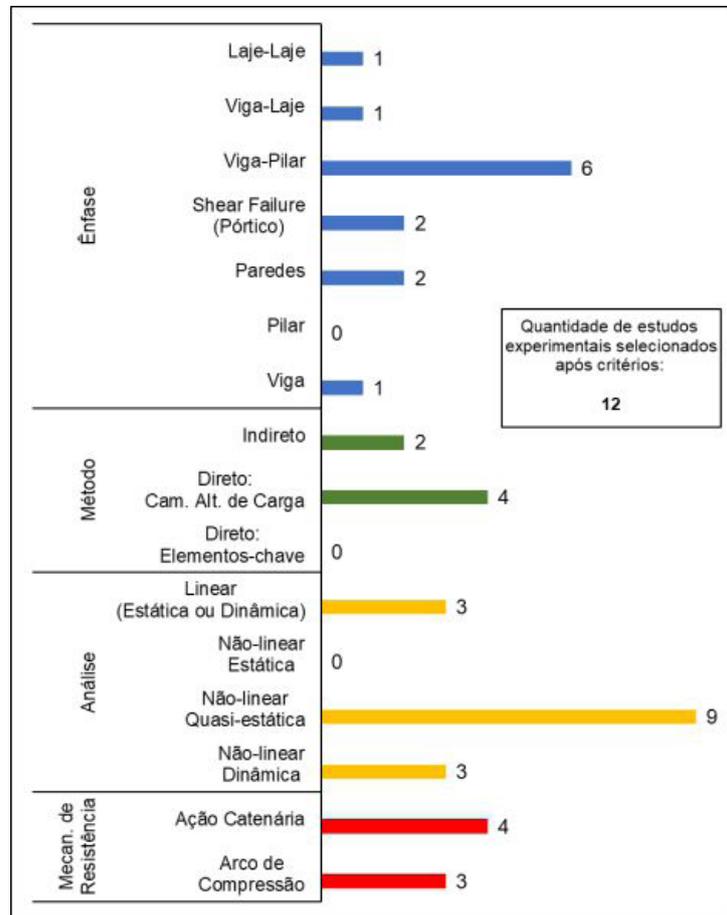


Figura 8 – Classificação dos trabalhos com abordagem experimental retornados às strings: “progressive collapse” and “precast concrete” (12 trabalhos).

Fonte: Autoria Própria.

5 Considerações Finais e Indicações para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos nesta revisão, percebe-se que o colapso progressivo é um tema bastante amplo e ainda pouco conhecido. Possivelmente por isso, muitas normas e recomendações de projeto ainda não apresentem qualquer indicação explícita a respeito. Além disso, considerando-se apenas códigos que efetivamente tratam do tema, não há consenso entre as recomendações apresentadas.

Conforme abordado, o Método dos Caminhos Alternativos de Carga é considerado a forma mais eficaz de tratamento do colapso progressivo nas estruturas. Ainda assim, há diversas formas de abordagem que podem levar diferentes análises de uma mesma estrutura a diferentes níveis de segurança contra o fenômeno. Conjuntos maiores de estudos podem contribuir para o estabelecimento de diretrizes e parâmetros de projeto universalizados.

No que se refere às lacunas de conhecimento sobre o colapso progressivo identificadas por meio dos resultados bibliométricos apresentados.

- Com relação à ÊNFASE, enquanto a maior parte dos estudos focou nas ligações vigapilar, mostram-se pouco estudadas as ligações viga-laje e laje-laje. Essas ligações, no entanto, só podem ser analisadas em estruturas 3D, com arranjos que incluam pavimentos de lajes e vigas. Estudos assim, experimentais e teóricos, também ainda são poucos, tanto em pórticos de concreto armado in loco quanto de concreto pré-moldado.
- Percebe-se baixa ênfase também sobre a ruptura por cisalhamento em pilares de pórticos. Este, no entanto, é um campo de análises relevante, já que o esforço cortante nos pilares laterais de uma viga está intimamente relacionado à capacidade dos primeiros de restringir os movimentos laterais do segundo e, conseqüentemente, de permitir se desenvolvam o efeito de arco de compressão e a ação catenária na viga.
- Em se tratando do MÉTODO de análise, verifica-se que o Método dos Caminhos Alternativos de Carga tem sido o mais utilizado, tanto em estudos teóricos quanto em experimentais. Pouco se observam, no entanto, relações dos resultados obtidos com as forças de amarração propostas por códigos que aderem o Método Indireto. Considera-se que, na ausência de recomendações explícitas para o tratamento do colapso progressivo em projeto, as amarrações sejam bastante

relevantes, uma vez que contribuem para o ganho de redundância, continuidade e ductilidade pela estrutura, ainda que esse ganho não seja quantificado. Além disso, a metodologia das forças de amarração pode ser admitida em estruturas com baixo risco de ocorrência de colapso ou baixo nível de perdas sob eventual colapso em pórticos monolíticos de concreto ou em concreto pré-moldado.

- No que se refere ao tipo de ANÁLISE estrutural, nota-se que análises não-lineares quasi-estáticas têm sido as mais utilizadas. Possivelmente por serem mais factíveis em estudos experimentais, que, por suas vezes, servem de base para etapas de calibração de estudos teóricos. Neste sentido, análises não-lineares dinâmicas mostram-se ainda muito necessárias, já que os resultados obtidos por meio delas podem também ser úteis para definição de fatores de amplificação dinâmica a serem adotados em análises não-lineares quasi-estáticas e análises lineares estáticas.
- Quanto aos mecanismos de resistência contra o colapso progressivo, foi observado foco maior sobre a ação catenária em comparação com o efeito de arco de compressão, o que pode estar associado ao fato de que aquela é responsável pela resistência última das estruturas ao colapso progressivo e está associada ao desenvolvimento de grandes deslocamentos. Ressalta-se ainda, que é possível que estruturas desenvolvam apenas o efeito de arco de compressão sem conseguir atingir a ação catenária. No entanto, percebe-se que aquelas que desenvolvem a ação catenária, desenvolvem antes o efeito de arco de compressão.
- Considerando-se apenas os estudos teórico-numéricos, nota-se que, quanto à PRECISÃO DA MODELAGEM, estudos com macromodelos são mais comuns em estruturas de concreto monolítico que em estruturas em concreto pré-moldado. Ressalta-se que os micromodelos são bastante relevantes para estudo dos efeitos não-lineares nas ligações, por exemplo, mas são de aplicação difícil em estruturas mais complexas, como a de um pórtico espacial multipavimentos, por exemplo. Neste sentido, macromodelos mostram-se necessários. A consideração das não-linearidades nas ligações por meio desses modelos, no entanto, ainda é uma lacuna de conhecimento a ser preenchida.

6 Agradecimentos

Agradecimento especial à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

7 Referências Bibliográficas

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014, 238 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003, 18 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017, 86 p.

ADAM, J. M.; FULVIO, P.; SAGASETA, J.; XINZHENG L. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. **Engineering Structures**, v. 173, p. 122-149, 2018.

AGARWAL, J.; ENGLAND, J. Recent developments in robustness and relation with risk. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, v. 161, n. 4, p. 183-188, 2008.

ASCE/SEI. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05). **American Society of Civil Engineers**, Reston, VA, 2006.

DOD, U. S. UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse. **US Department of Defense, Washington, DC, USA**, 2009.

ELLINGWOOD, B. R.; SMILOWITZ, R.; DUSENBERRY, D. O.; DUTHINH, D.; LEW, H. S.; CARINO, N.J. **Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings**. National Institute of Standards and Technology

Administration – Technology Administration U.S. Department of Commerce. February 2007.

EUROPEANCOMMITTEE OF STANDARDIZATION (EN 1992). **Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. British Standards Institution, 2004.

FIB. BULLETIN 63. Design of Precast Concrete Structures Against Accidental Actions, 72 p., 2012.

GSA (GENERAL SERVICES ADMINISTRATION). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. **Washington, DC: Office of Chief Architects**; 2003.

GSA (GENERAL SERVICES ADMINISTRATION). Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. **GSA Guidelines**; 2013.

KANG, S.; TAN, K. H. Robustness assessment of exterior precast concrete frames under column removal scenarios. **Journal of Structural Engineering**, v. 142, n. 12, p. 04016131, 2016.

LEW, H. S.; BAO, Y.; SADEK, F.; MAIN, J. A.; PUJOL, S.; SOZEN, M. A. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. **NIST Technical Note**, v. 1720, 2011.

RUTHES, H. C. **Análise do comportamento de sistemas estruturais em concreto moldado in loco sob o efeito do colapso progressivo**. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

STAROSSEK, U.; HABERLAND, M. Disproportionate collapse: terminology and procedures. **Journal of performance of constructed facilities**, v. 24, n. 6, p. 519-528, 2010.

YU, J. **Structural behavior of reinforced concrete frames subjected to progressive collapse**. 2012. 300p. Tese de Doutorado. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapura, 2012.