FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JAKELINE BARBOSA MARTINS NASCIMENTO
NATASSIA REALI COSTA

ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE NORMAS BRASILEIRAS E AMERICANA SOBRE COLAPSO PROGRESSIVO

Aracruz
2018

JAKELINE BARBOSA MARTINS NASCIMENTO
NATASSIA REALI COSTA

ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE NORMAS BRASILEIRAS E AMERICANA SOBRE COLAPSO PROGRESSIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Civil das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Aprígio Antônio Barreto Júnior
Coorientador: Prof. M.Sc. Julimara Zampa Bitti Blank

Aracruz

2018

JAKELINE BARBOSA MARTINS NASCIMENTO

NATASSIA REALI COSTA

ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE NORMAS BRASILEIRAS E AMERICANA SOBRE COLAPSO PROGRESSIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Civil das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em 12 de julho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Esp. Aprígio Antônio Barreto Júnior
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

_____

Prof. Esp. Evandro José Pinto de Abreu
Faculdades Integradas de Aracruz
Membro interno

_____

Prof. Me. Robson Moro Aioffi
Faculdades Integradas de Aracruz
Membro interno

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e ao autor.

Aracruz, 12 de julho de 2018.

Jakeline Barbosa Martins Nascimento
Natassia Reali Costa

RESUMO

Este trabalho apresentou um tema importante para a área da Engenharia Civil, o colapso progressivo, pois este evento pode ocorrer através da deterioração de um elemento estrutural da construção, por diversos fatores, impossibilitando a edificação realizar total ou parcial sua função, ou seja, é a propagação de um dano inicial local para outros elementos. Dessa forma, serão apontadas as principais causas desse fenômeno e as ações para realizar sua prevenção, pois este pode promover riscos aos usuários. Além disso, são observadas as abordagens do assunto em normas brasileiras e americana para realizar um estudo técnico comparativo, sendo dado ênfase à norma americana, que possui método de análise do colapso, visto que a norma brasileira ainda não possui uma forma de estudo do problema. A norma americana dá ênfase ao método direto através da apresentação dos requisitos de análise do Método dos Caminhos Alternativos (MCA), onde serão apresentadas as principais considerações para analisar se uma estrutura é suscetível ao fenômeno citado. Por fim, é então apresentado exemplos de construções brasileiras que sofreram o fenômeno citado, evidenciando a necessidade de se tratar sobre o assunto, de forma mais abrangente nas normas brasileiras.

Palavras-chave: Colapso Progressivo. Norma Brasileira. Norma Americana. Método direto.

ABSTRACT

This work presented an important theme for the Civil Engineering area, the progressive collapse, because this event can occur through the deterioration of a structural element of the construction, by several factors, making it impossible for the building to perform its function totally or partially, that is, it is the propagation of a local initial damage to other elements. In this way, the main causes of this phenomenon and the actions to carry out its prevention will be pointed out, as this can promote risks to users. In addition, it is observed the approaches of the subject in brazilian and american standards to carry out a comparative technical study, being emphasized to the american standard, that has method of analysis of the collapse, since the brazilian standard does not yet have a form of study of the problem. The american standard emphasizes the direct method through the presentation of the requirements of analysis of the Alternative Pathways Method (APM), where the main considerations will be presented to analyze if a structure is susceptible to the mentioned phenomenon. Finally, we present examples of Brazilian constructions that underwent the mentioned phenomenon, evidencing the need to deal with the matter, in a more embracing way in brazilian standards.

Keywords: Progressive Collapse. Brazilian Standard. American Standard. Direct method.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
1.1 OBJETIVOS 11
1.1.1 Objetivo geral 11
1.1.2 Objetivo específico 11
1.2 JUSTIFICATIVAS 12
1.2.1 Justificativa acadêmica 12
1.2.2 Justificativa mercadológica 12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO 13
2.1 COLAPSO PROGRESSIVO 13
2.1.1 Principais causas do colapso progressivo 14
2.1.2 Prevenção do colapso progressivo 15
2.2 HISTÓRICO DE ACIDENTES EM CONTRUÇÕES BRASILEIRAS 19
2.3 NORMAS SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO 25
3 METODOLOGIA 26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 27
4.1 ABORDAGEM SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO NBR 6118/2014: PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO 27
4.2 ABORDAGEM SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO NBR 9062/2006: PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO 28
4.3 ABORDAGEM SOBRE COLAPSO PROGRESSIVO NA NORMA AMERICANA 29
4.3.1 Considerações gerais da GSA 29
4.3.2 Método de dimensionamento utilizado pela GSA 30
4.3.2 Método dos caminhos alternativos (MCA) 31
4.3.3.1 Descrição da análise do MCA 32
4.3.4 Definição dos níveis de segurança das instalações 33
4.3.5 Classificação dos elementos da construção em primários e secundários 35
4.3.6 Escolha das regiões para a retirada dos pilares 35
4.3.7 Área de propagação do colapso progressivo 37
4.3.8 Classificação dos elementos de deformação controlada e de esforço controlado 39

4.3.9 Carga resultante de efeito de deformação controlada (QUD) 40
4.3.10 Carga para efeitos de esforço controlado (QUF) 40
4.3.11 Relação demanda capacidade (RDC)..... 43
3.2.12 Número mínimo de sistema de redistribuição de carga..... 44
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS 44
5 CONCLUSÃO 47
REFERÊNCIAS 49

1 INTRODUÇÃO

O colapso progressivo é um tipo de ruptura, no qual o dano final é desproporcional à causa inicial. Esse fenômeno pode advir de falhas que são originadas pela retirada de algum elemento de sustentação ou então por algum dano localizado (LARANJEIRAS, 2011). Sendo que esse dano pode se propagar a outros elementos, podendo ocasionar a perda parcial ou total da estrutura.

As medidas de prevenção do colapso progressivo devem ser adotadas ainda na fase de projeto, pois mesmo que o risco seja pequeno desse fenômeno acontecer, é importante projetar construções que resistam a este tipo de evento, pois dessa forma a estrutura será capaz de redistribuir o carregamento, evitando danos maiores à construção e a seus usuários.

Conforme Laranjeiras (2011), pode-se tomar como referência dois métodos de dimensionamento para evitar o colapso progressivo: o método indireto e o direto. A saber, o método indireto consiste numa análise mais simplista, proporcionando um nível mínimo de resistência para a estrutura. Já o método direto consiste em dimensionar os elementos estruturais de forma que os mesmos sejam capazes de resistir aos carregamentos excepcionais, ou que a estrutura seja capaz de resistir à perda de um elemento estrutural (BAÍA, 2014).

O método direto será retratado neste trabalho, e pode ser dividido em dois grupos: Método da Resistência Local Específica (MRLE), e o Método dos Caminhos Alternativos (MCA). Sendo descrito neste trabalho o MCA, pelo fato de ser abordado na norma americana, e por apresentar requisitos aplicáveis a estrutura para que esta possa resistir à perda de elementos de suporte de carga, de forma que os esforços gerados sejam redirecionados para os elementos adjacentes, sem que haja a propagação de danos.

Como pode-se perceber, pelas afirmações anteriores, existem métodos americanos que foram elaborados para assegurar que a edificação resista à perda de um ou mais elemento de sustentação, sem que o dano se propague pela estrutura. Tais métodos estão presentes nas normas americanas que afirmam que para conseguir tal feito a construção deve ser dimensionada garantindo a continuidade, ductilidade e

redundância. Em contrapartida, ao analisar as normas brasileiras percebe-se que estas têm pouco para acrescentar sobre o assunto, sendo então necessário utilizar outras referências para fazer a análise desse fenômeno, adaptando para realidade brasileira.

Neste contexto, o presente trabalho realizará um estudo técnico comparativo entre a norma americana GSA - *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance* e as normas brasileiras NBR 6118/2014 - Projeto de Estruturas de Concreto e a NBR 9062/2006 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado, com objetivo de identificar as principais diferenças com relação as recomendações e aos métodos de cálculo aplicados para evitar o colapso progressivo, verificando dessa forma se as construções brasileiras estão seguras nesse quesito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar as principais considerações encontradas nas normas brasileiras e americana sobre o colapso progressivo, buscando identificar se as construções brasileiras estão seguras contra esse fenômeno.

1.1.2 Objetivo específico

- Apresentar sobre o colapso progressivo, abordando suas causas e prevenções;

- Retratar as abordagens sobre o assunto em normas brasileiras e americana;

- Dar ênfase à norma americana, GSA, explicitando os pontos mais relevantes, já que esta possui métodos para avaliar se a construção pode ser submetida ao colapso progressivo e também por estabelecer medidas para prevenir tal evento;

- Apresentar exemplos de construções brasileiras que sofreram o colapso progressivo enfatizando a necessidade de se utilizar métodos ou medidas para prevenir tal evento, buscando assim promover a segurança dos usuários e da construção;

- Apresentar comparativo entre as normas brasileiras e americana, de forma a identificar se as construções brasileiras estão seguras contra o colapso progressivo.

1.2 JUSTIFICATIVAS

1.2.1 Justificativa acadêmica

O colapso progressivo é um fenômeno conhecido no meio técnico há alguns anos, principalmente nos Estados Unidos devido ao fato de suas causas estarem relacionadas principalmente às ações excepcionais, como terremotos e furacões.

Esse assunto é pouco estudado no Brasil, devido ao fato da probabilidade de incidência dessas ações serem baixas, porém o fenômeno pode advir de outros fatores como: erros de projeto, excesso de sobrecarga, ou até mesmo pela retirada indevida de algum elemento de sustentação durante alguma reforma.

Dessa forma, o estudo realizado sobre o colapso progressivo é justificado já que permite tornar o tema mais conhecido, pois como já afirmado este assunto não é muito difundido entre estudantes e profissionais da área, visto que, o tema não conta nas ementas da maioria dos cursos de Engenharia Civil das instituições de ensino superior do Brasil.

1.2.2 Justificativa mercadológica

A utilização de métodos que previna o colapso progressivo, permite que as construções possam ser dimensionadas de modo a resistir esse fenômeno, ou seja, a edificação será capaz de restringir os danos, causados por uma fonte externa ou não, aos locais que sofreram as avarias iniciais. Sendo assim, a estrutura irá redistribuir o carregamento após a perda de um elemento vertical de sustentação para os elementos adjacentes, proporcionando tempo necessário para a evacuação dos usuários o que resultará na preservação de vidas, e consequentemente limitação dos efeitos do colapso, dessa forma há redução de prejuízos físicos e financeiros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capitulo serão abordados os principais fundamentos que sustentam e norteiam este estudo, são esses: definição de colapso progressivo, suas principais causas e prevenções, bem como exemplos de construções brasileiras que foram submetidas a esse evento de forma a evidenciar a necessidade de se tratar sobre o tema.

2.1 COLAPSO PROGRESSIVO

Um elemento estrutural, como um pilar ou viga, de uma construção ao sofrer um impacto relevante, de forma que este seja impossibilitado de realizar parcial ou total sua função, é submetido consequentemente a redistribuição dos esforços os quais a estrutura está submetida. Porém, se a edificação não foi dimensionada de forma a proporcionar novos caminhos para essa redistribuição, as forças presentes vão influenciar os elementos que estão adjacentes àquele danificado, produzindo um efeito crescente de sobrecargas que pode resultar num colapso parcial ou até mesmo total da construção.

Dimas (2014) reitera que a falha de resistência do elemento danificado influência nos demais elementos da estrutura, gerando assim um “efeito dominó”. Também afirma que a característica principal do problema apresentado é a desproporcionalidade entre a causa inicial e o colapso ocorrido, ou seja, o dano final é muito maior do que o esperado se considerado o esforço que causou a avaria inicial no elemento da construção.

O evento estudado exige a combinação de uma sobrecarga que cause uma avaria local grave, e uma estrutura que não suporte a redistribuição das cargas e danos (MENEZES, 2014). Além disso, o autor declara que a falha em remanejar o carregamento, é devido à falta de três características da estrutura: continuidade, redundância e ductilidade. Essas características serão definidas mais adiante, de forma a evidenciar sua importância na construção de estruturas que resistam ao colapso progressivo.

Após o apresentado, pode-se afirmar que o colapso progressivo é um tema relevante para a área da construção civil, pois quando devidamente considerado no projeto

estrutural pode salvar vidas, já que proporciona minutos que se tornam importantes na evacuação dos usuários das construções submetidas ao colapso. Por isso, mesmo que as armaduras utilizadas para combater o colapso progressivo serem consideravelmente maiores e mais caras, e ser pequena a probabilidade de um elemento estrutural ser totalmente danificado, é preciso dar a importância necessária a esse tema (ANJOS, 2016).

2.1.1 Principais causas do colapso progressivo

O colapso progressivo está associado à ausência de continuidade e ductilidade dos materiais que compõem a construção, pois quando não apresenta tal característica favorecem a vulnerabilidade estrutural de elementos e suas ligações, sendo assim a edificação possui pouca capacidade de absorver e dissipar a energia resultante de avarias localizadas (BITTARELLO, 2013). Entre as principais causas do colapso progressivo destacam-se:

a) erro de projeto e construção;

De acordo Anjos (2016), erros de projeto e de construção são fontes determinantes para ocorrência de colapso em edificações, pois pode ocorrer mesmo quando é utilizado mão de obra qualificada e normas adequadas. Por esse motivo, percebe-se que um bom projeto gera diversos benefícios, já que permite uma correta execução da obra e por isso diminui a probabilidade de ocorrência de colapso na estrutura.

Outro ponto relevante é a supervisão detalhada por parte do engenheiro responsável pela obra, pois essa pode evitar possíveis erros nas etapas de construção, como as falhas nas fases: de execução e de dimensionamento (BAÍA, 2014). Pois, tais erros podem contribuir para ocorrência do colapso.

b) sobrecarga; e

O excesso de peso na construção pode gerar esforços que não foram previstos no projeto, ocasionando falhas nos elementos estruturais mesmo que se tenha feito a majoração de cargas e minoração de resistência, podendo, dessa forma, levar a estrutura ao colapso (MENEZES, 2014).

c) ações excepcionais.

Caracterizadas por ter uma duração curta e uma baixa possibilidade de ocorrência na estrutura, entretanto é importante que sejam consideradas nos projetos mesmo que proporcione um aumento considerável no custo da construção. De acordo com Baía (2014), incluem-se nesta categoria: explosões de gás e de bombas; impacto de veículos ou aeronaves na estrutura; e ações ambientais extremas como inundações, tornados, entre outras. Contudo, para o dimensionamento considerando essas ações, é necessário utilizar critérios específicos, o que torna o método pouco prático.

A saber, as causas citadas anteriormente podem ser evitadas com um bom controle de gestão e qualidade, sendo recomendado identificar a sensibilidade da edificação ao colapso progressivo, pois como já afirmado a ausência de continuidade no sistema e a deficiência de ductilidade contribuem para vulnerabilidade dos elementos e das ligações da estrutura (BITTARELLO, 2013).

2.1.2 Prevenção do colapso progressivo

Um projeto estrutural dimensionado de modo a resistir ao colapso progressivo não segue os padrões do atual mercado, pois neste projetam-se estruturas mais flexíveis e esbeltas, sendo que uma construção resistente ao colapso abordado se caracteriza por serem estruturas mais rígidas as quais aumentam consideravelmente o custo da construção (DIMAS, 2014). Segundo o mesmo autor, deve ser considerado no projeto principalmente a ação das cargas permanentes, pois estas contribuem para manter um nível de resistência e ductilidade adequados, os quais contribuem na prevenção do evento citado.

Quando a probabilidade de a estrutura ser submetida ao colapso progressivo for baixa, isto é, quando a incidência de cargas acidentais for reduzida, é importante apontar razões que fundamente o aumento do custo de projeto e da construção da obra, de forma a justificar a utilização de meios para combater ao colapso citado (DIMAS, 2014). Essa principal razão seria promover a segurança dos ocupantes da edificação, que podem sofrer consequências severas, decorrentes do colapso progressivo total ou parcial da edificação.

Dessa forma, pode-se perceber a importância de se construir obras que sejam capazes de combater ao fenômeno citado mesmo havendo aumento em seu custo, para isso a construção deve atender a três critérios importantes, são esses:

a) redundância;

Caracteriza-se por proporcionar a existência de caminhos alternativos que permitem uma redistribuição de cargas mais adequada, isso após ocorrer um eventual dano à estrutura (MENEZES, 2014). Numa estrutura redundante ao ocorrer uma modificação de carga em um de seus apoios, esta redistribui os esforços para outros apoios. E para que a estrutura obtenha tal característica é necessário que o espaçamento dos pilares da construção, em pórtico, seja limitado e as de vigas de transição sejam evitadas (ANJOS, 2016).

Um bom exemplo desse tipo de estrutura, que possui caminhos alternativos para redistribuição dos esforços, no caso da ocorrência de algum impacto em seu apoio, é a estrutura da pista de pouso na Ilha da Madeira a qual está ilustrada na figura 1.

Figura 1 – Estrutura do aeroporto da Ilha da Madeira

Fonte: LARANJEIRAS (2011)[1]

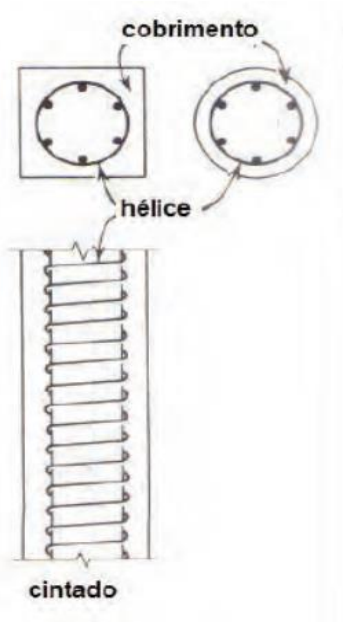
[1] Disponível em:<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>. Acesso em: 05 mar. 2018.

b) ductilidade; e

No caso de ocorrência de colapso, espera-se que os elementos e as conexões da estrutura suportem as deformações resultantes da perda de algum elemento crítico. A ductilidade caracteriza-se pela capacidade que a estrutura tem de manter sua resistência, mesmo quando acompanhada de cargas com intensas deformações (DIMAS, 2014).

Pode-se alcançar a ductilidade na estrutura através dos pilares cintados por estribos helicoidais conforme ilustra na figura 2, esses suportam grandes deformações antes de ocorrer o colapso, pois absorvem mais energia do que um pilar comum, contribuindo na promoção de tempo importante e necessário para retirada dos usuários antes da ocorrência do evento citado (LARANJEIRAS, 2011).

Figura 2 – Pilar cintado



Fonte: LARANJEIRAS (2011)[2]

c) continuidade.

Permite uma melhor redistribuição vertical ou horizontal do carregamento pela estrutura, e concede resistência a inversões de esforços, necessária após a retirada de um apoio (BAÍA, 2014). Dessa forma, a continuidade é o atributo que permite a

[2] Disponível em:<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>. Acesso em: 05 mar. 2018.

conexão adequada entre os componentes da construção, garantindo a redistribuição de cargas entre lajes, vigas e pilares.

Pode-se citar como exemplo de construção que possui essa característica, as estruturas sem juntas e aparelhos de apoio, também conhecidas como “estruturas integrais”, conforme ilustra a figura 3, as quais permitem a continuidade necessária para prevenção do colapso progressivo, atendendo também as exigências de durabilidade e baixo custo de manutenção.

Figura 3 – Estrutura integral

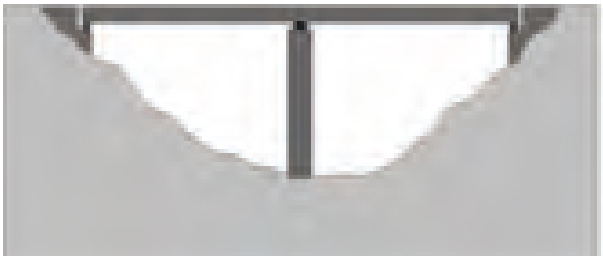
Fonte: LARANJEIRAS (2011)[3]

Uma característica importante desse tipo de estrutura de ligações sem juntas e aparelhos de apoio, é que na transmissão de carregamento não há concentração de tensões e esforços. Gerando assim, através da continuidade, uma ligação mais coesa entre os elementos e, portanto, uma estrutura resistente ao colapso progressivo (LARANJEIRAS, 2011).

Já na transmissão de cargas em estruturas convencionais, ou seja, com juntas e aparelhos de apoio, figura 4, há concentração de tensões e esforços próximo ao apoio. O que torna essa região crítica, dificultando ou impedindo assim a transferência de cargas, resultando numa construção menos resistente ao colapso progressivo (LARANJEIRAS, 2011). As estruturas pré-fabricadas são um exemplo desse tipo de estrutura, que são mais favoráveis a sofrer o colapso, pois nem sempre garantem a continuidade entre elementos.

[3] Disponível em:<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>. Acesso em: 05 mar. 2018.

Figura 4 – Estrutura convencional



Fonte: LARANJEIRAS (2011)[4]

De forma geral, para que um elemento estrutural seja resistente ao colapso, as características de redundância e continuidade, devem evoluir simultaneamente. Pois, sem a continuidade o excesso de apoio que a redundância proporciona é ineficaz, visto que não haverá a redistribuição de esforços em casos de colapso (DIMAS, 2014).

2.2 HISTÓRICO DE ACIDENTES EM CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS

A seguir serão descritos exemplos de construções brasileiras que sofreram o colapso progressivo:

a) edifício atlântico;

Edifício construído no ano de 1994, localizado na cidade de Guaratuba no Paraná, sua estrutura era composta de concreto armado, possuindo lajes maciças, pilares e vigas, sendo utilizados blocos sobre estacas na fundação. O desabamento da edificação ocorreu no ano de 1995, envolvendo 36 vítimas, sendo 29 mortos e 7 feridos (ROCHA e SANTOS, 2017).

Na época do desabamento, a estrutura estava passando por reformas na qual os pilares estavam sendo reforçados. A execução da reforma iniciou numa sexta-feira, durante o dia, e foram interrompidas no período da noite, sendo que a tragédia ocorreu no sábado, durante período da manhã, quando os trabalhadores já estavam na obra. As vigas e os pilares estouraram durante o momento do desabamento (SANTOS, 2012).

[4] Disponível em:<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>. Acesso em: 05 mar. 2018.

Conforme depoimentos dos mestres de obras e pedreiros que trabalhavam no local, cerca de cinco pilares de um total de quarenta estavam totalmente esmagados na região do “colarinho”, local entre a base da fundação e o início da viga que suporta os pilares do edifico (SANTOS, 2012).

O laudo do Instituto de Criminalística do Paraná, apontou que uma das causas poderia ter sido a construção de uma piscina com capacidade de 5.000 litros e a utilização de uma caixa d’ água, ambas não previstas no projeto da estrutura (ROCHA e SANTOS, 2017). Dessa forma, o possível esmagamento, deve-se pela aplicação de sobrecarga acima do que a estrutura suportava, e pela falta de manutenção preventiva.

A figura 5, demonstra os destroços do Edifico Atlântico.

Figura 5 – Destroços do Edifico Atlântico

Fonte: SANTOS (2012, p. 36)

b) edifício Itália;

O Edifício Itália localizava-se na cidade de São José do Rio Preto, em São Paulo, sofreu seu desabamento no ano de 1997, não deixando vítimas fatais e nem feridos. Entretanto, ocasionou a implosão de mais dois edifícios que integravam o condomínio, o Edifício Espanha e Portugal, devido ao risco de desabamento (SANTOS, 2012).

Somente não houve vítimas, pois na semana do evento os moradores ouviram estalos e acionaram a equipe de bombeiros, então foi constatado que a construção iria entrar

em colapso, e por isso foi realizada a evacuação da edificação (SANTOS, 2012). Essa construção não apresentava nenhum tipo de fissuração.

O laudo da perícia apontou as seguintes causas para o desabamento: erros no cálculo da fundação e excesso de peso em um dos pilares, com uma pressão de 40% a mais que a determinada incialmente no projeto da estrutura (SANTOS, 2012). Ainda segundo o mesmo autor, o laudo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) afirmou que houve erros no projeto da fundação, provocando o afundamento de duas estacas, e ainda foi levantada a possibilidade de o solo ter contribuído no desabamento.

A figura 6, demonstra os escombros do Edifício Itália.

Figura 6 – Escombros do Edifício Itália

Fonte: SANTOS (2012)

c) edifício Gisele;

O edifício se localizava na cidade de Jaboatão dos Guararapes, em Pernambuco, sendo que seu desabamento ocorreu no ano de 1977, envolvendo 42 vítimas, sendo 22 mortos e 20 feridos (SANTOS, 2012).

Na época do ocorrido, a construção do prédio ainda estava sendo concluída, porém no térreo já se abrigava uma agência bancária. Foi apontada como principal causa para o desabamento, o acréscimo de um pavimento na construção que não estava previsto no projeto estrutural. O edifício devia possuir sete andares, mas acabou com total de oito (GOETHE, 2012).

d) edifício Areia Branca;

Esse edifício também se localizava na cidade de Jaboatão dos Guararapes, em Pernambuco, e foi construído no ano de 1978, possuindo 12 pavimentos com lajes pré-moldadas e fundações do tipo sapatas isoladas. Seu desabamento ocorreu no ano de 2004, deixando 4 mortos.

Segundo o laudo do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco (CREA-PE), o desabamento ocorreu pela ruptura dos pilares na região de ligação com as sapatas, essa ruptura foi ocasionada pelos seguintes fatores: ausência de cobrimentos; utilização de estribos finos que contribuíram para flambagem das barras longitudinais, em grande parte nos pilares; e devido a degradação do concreto nos pescoços dos pilares e das sapatas (SANTOS, 2012).

A figura 7, demonstra os escombros do Edifício Areia Branca.

Figura 7 – Destroços do Edifício Areia Branca

Fonte: SANTOS (2012, p. 41)

e) edifício Real Class; e

Este edifício de concreto armado desabou no ano de 2011, em Belém do Pará. A construção tinha 34 pavimentos, estava na fase de acabamento e em decorrência de seu colapso provocou a morte de 3 pessoas. Sendo que o colapso da estrutura ocorreu de forma repentina, acontecendo logo após uma forte chuva. As figuras 8 e 9 demostram a construção antes e depois do desabamento (SANTOS, 2012).

Figura 8 – Edifício Real Class antes do desastre

Fonte: SANTOS (2012, p. 43)

Figura 9 – Edifício Real Class após o desabamento

Fonte: SANTOS (2012, p. 43)

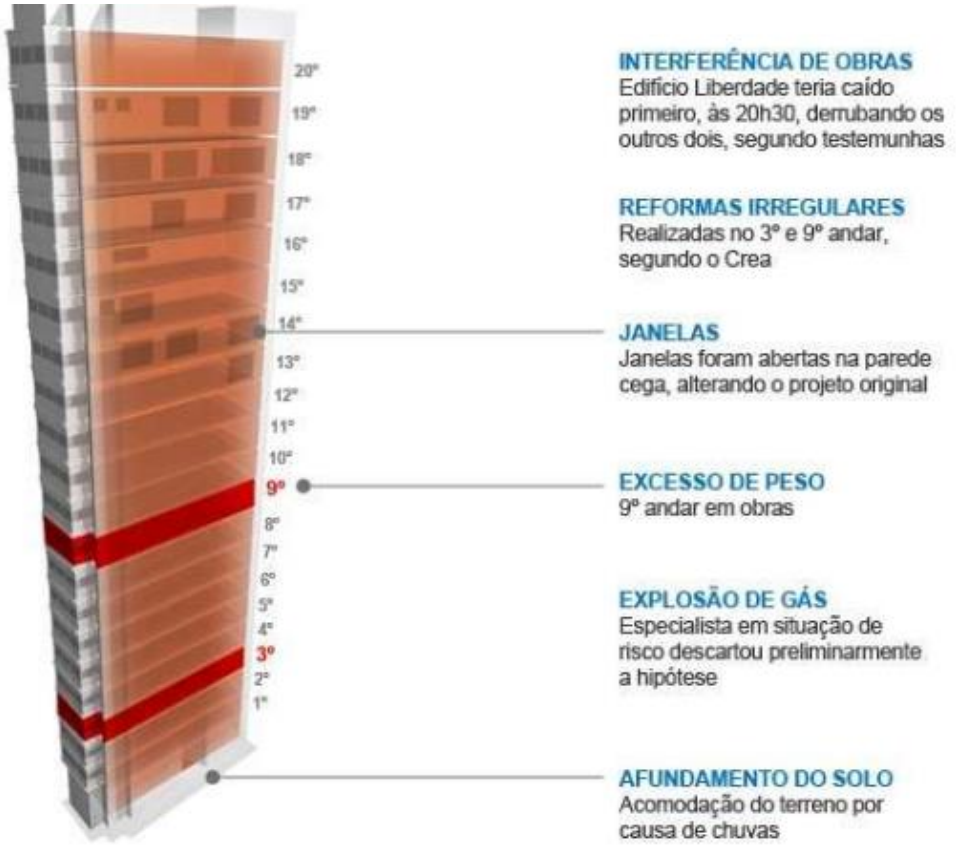
O laudo técnico realizado pela Faculdade de Engenharia Civil (FEC) coordenado pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Pará (CREA-PA), conclui que o incidente resultou de falhas nos cálculos estruturais, pois a edificação entrou em colapso quando foi submetida a uma elevada combinação de cargas verticais e horizontais decorrentes da tempestade, verificando que o projeto não atendia às recomendações da norma com relação a carregamentos verticais e de vento. Além disso, foi observado que vários pilares do pavimento térreo não possuíam resistência

suficiente para suportar os carregamentos atuantes, por isso colapsaram sem apresentar fissuras.

f) edifício liberdade.

O desabamento do Edifício Liberdade ocorreu no ano de 2012, no Rio de Janeiro. Essa construção era composta de 20 pavimentos e em decorrência de seu desmoronamento derrubou 2 prédios vizinhos e vitimou 22 pessoas. A figura 10 ilustra as possíveis causas que influenciaram no desabamento da edificação (TERRA, 2012).

Figura 10 – Possíveis causas do desabamento do Edifício Liberdade



Fonte: CÂMARA (2012, p. 21).

De acordo com laudo de Câmara (2012), o edifício sofreu o colapso devido ao surgimentos de sobrecargas resultantes do acréscimo de pavimentos ao coroamento do prédio e pela inclinação sofrida pela construção na década de 70, também atribuiu como causa do desastre o enfraquecimento da estrutura consequente da corrosão das ferragens provocada por infiltrações em rachaduras, fissuras e trincas, sendo que

essas patologias são resultados das deformações estruturais sofridas pelo prédio ao longo de sua vida útil.

2.3 NORMAS SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO

Através de pesquisas sobre o colapso progressivo pode-se verificar que existem poucas normas brasileiras que possibilitem o estudo do assunto, isto pode ser resultado da baixa ocorrência desse evento em construções brasileiras, já que é rara a incidência de fenômenos naturais no país em escala que provoquem impactos relevantes sobre suas edificações, e além disso não há registros de atentados terroristas.

O colapso progressivo pode ser provocado por outras ações além das citadas anteriormente, as quais necessitam somente incapacitar um elemento estrutural para que a construção possa se tornar suscetível à ruína. Dessa forma, é perceptível a necessidade de identificar quais normas brasileiras que retrataram sobre fenômeno, para assim abordar suas principais considerações, comparando suas abordagens com a da norma americana, a qual possui diretrizes para prevenção e verificação desse evento na construção.

Através dos estudos realizados, as normas que serão utilizadas no presente trabalho, serão: as normas brasileiras NBR 6118/2014 - Projeto de Estruturas de Concreto e NBR 9062/2006 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado, e a norma americana GSA - *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*.

3 METODOLOGIA

Inicialmente é realizada uma revisão bibliográfica com objetivo de obter informações sobre o tema retratado, isso através da metodologia de análise e sistematização de literaturas como revistas científicas, monografias, dissertações e sites eletrônicos.

Em seguida, é descrita a abordagem sobre o tema nas normas brasileiras: NBR 6118/2014 - Projeto de Estruturas de Concreto e NBR 9062/2006 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado, e também na norma americana GSA - *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*, de forma a identificar quais são os requisitos utilizados para proteção das construções contra o colapso progressivo.

São então apresentados exemplos de construções que sofreram o colapso progressivo no Brasil, de forma a demonstrar que mesmo não havendo incidência de eventos naturais em grande escala ou ataques terroristas, como em outros países, este evento pode advir de outros fatores.

Posteriormente é realizada uma comparação entre essas normas, destacando suas principais diferenças na abordagem desse assunto, buscando assim identificar se as normas brasileiras que fazem referência ao tema, proporcionam através de suas medidas a proteção para as diversas formas de construções existentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

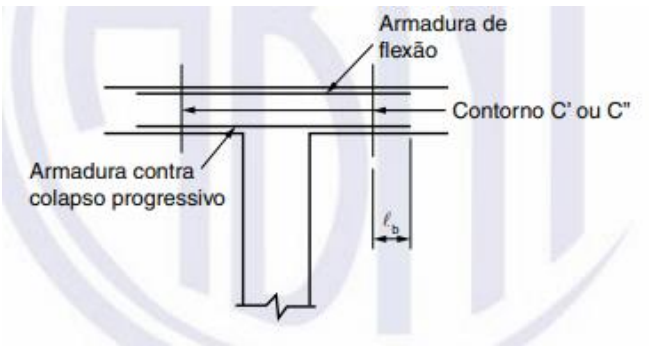
4.1 ABORDAGEM SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO NBR 6118/2014: PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO

Analisando a abordagem do assunto nessa norma, verifica-se que é estabelecido em seu item 19.5.4 o seguinte: "*Para garantir a ductilidade local e a consequente proteção contra o colapso progressivo, a armadura de flexão inferior que atravessa o contorno C deve estar suficientemente ancorada além do contorno C*". Sendo utilizada para verificar se a estrutura está suficientemente ancorada a seguinte expressão:

$$\mathbf{A_{s,ccp}\ F_{yd} \geq 1{,}5\ F_{Sd}} \qquad (1)$$

A equação apresentada anteriormente, afirma que a somatória das áreas das barras inferiores as quais cruzam cada uma das faces do pilar multiplicada pela resistência de cálculo da armadura passiva ao escoamento do aço, deverá ser maior ou igual a 1,5 vezes a força de tração de cálculo da armadura. Essa prevenção ao colapso busca promover a ductilidade da estrutura, sendo que para garantir essa característica a armadura de flexão inferior, que se localiza no encontro de lajes e pilares, deve ser suficientemente ancorada. Esse meio de prevenção é somente aplicável para lajes sem vigas (SANTOS, 2012). Tal armadura é ilustrada na figura 11.

Figura 11 – Armadura para combater o colapso progressivo

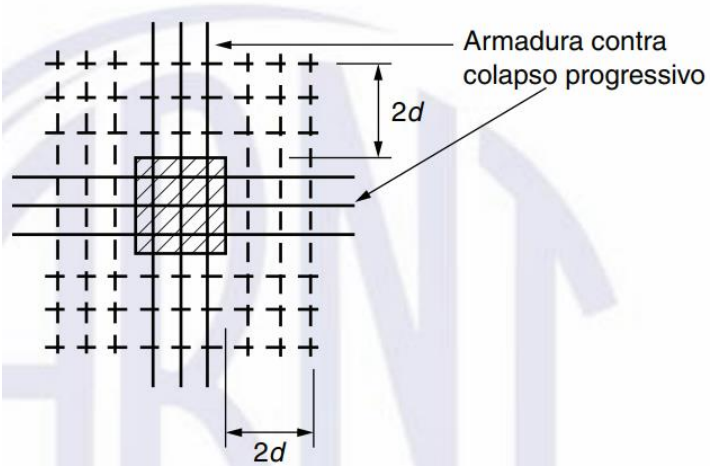


Fonte: ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014, p. 168.)

A referida norma afirma em seu subitem 20.3.2.6, que para lajes protendidas e sem vigas, pode-se dispensar a utilização da armadura passiva contra o colapso progressivo se ao menos um dos cabos, localizados em cada direção ortogonal, passar pelo interior da armadura longitudinal que se encontra na seção transversal

dos pilares ou componentes de apoio das lajes cogumelos de edifícios considerados residenciais e comerciais. A figura 12 ilustra a armadura nas direções ortogonais utilizadas contra o colapso em estudo.

Figura 12 – Armadura localizada nas direções ortogonais, contra o colapso progressivo



Fonte: ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014, p. 173.)

Pode-se perceber que mesmo a norma citada indicar a verificação do estado limite último de colapso progressivo, essa somente apresenta a prevenção desse evento quando a construção for composta por lajes sem vigas, sendo assim a NBR 6118 se reserva quanto a prevenção desse fenômeno nas demais formas de estruturas existentes.

4.2 ABORDAGEM SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO NBR 9062/2006: PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

A outra norma brasileira que retrata o assunto, faz uma prévia referência ao colapso progressivo, pois essa afirma em seu item 5.1.1.4: *"*Devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo*".* Entretanto a norma não especifica quais seriam esses cuidados e detalhes necessários que devem ser executados.

A partir do apresentado, pode-se verificar que as normas brasileiras não possuem um método que identifique se a construção pode ficar suscetível e/ou previna o colapso progressivo para todas as formas de construções existentes, já que não expõem o assunto de forma detalhada e somente trata de sua prevenção para lajes sem vigas.

Em contraste, existem normas americanas que conferem maior importância ao tema abordado, que apresentam em suas determinações ações para combater o evento citado, a seguir será apresentado essa norma.

4.3 ABORDAGEM SOBRE O COLAPSO PROGRESSIVO NA NORMA AMERICANA

Existem várias normas americanas que retratam sobre o colapso progressivo, pois suas construções são mais suscetíveis ao problema referido, já que na América do Norte existe a incidência de ataques terroristas, de frequentes terremotos e outros eventos naturais que afetam diretamente a estabilidade da estrutura de suas edificações.

Pode-se citar como exemplo de norma americana que buscar garantir a integridade dos usuários e construções, *a General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (*Administração de Serviços Gerais de Análise de Caminhos Alternativos e Diretrizes de Projeto para Resistência ao Colapso Progressivo – GSA/2016), que possui uma forma de análise para dimensionar e verificar se a edificação pode ser submetida ou não ao colapso progressivo.

Essa norma tem como finalidade reduzir o potencial de colapso progressivo em construções novas e existentes, pertencentes ao governo federal, dispondo de diretrizes que contribuem para um nível consistente de proteção das instalações. Fornecendo também uma metodologia para minimizar o potencial de colapso progressivo, a qual utiliza os procedimentos de análise do caminho alternativo do UFC 04-023-03 (Design dos Edifícios para Resistir ao Colapso Progressivo [31]).

A GSA (2016) caracteriza-se por ter abordagem de risco onde as medidas são determinadas através da identificação da necessidade de segurança da construção, por esse motivo as medidas adotadas são proporcionais ao risco identificado. Essa identificação do nível de proteção é determinada pelo *Facility Security Level* (FSL), ou seja, Níveis de Segurança de Instalações (NSI).

4.3.1 Considerações gerais da GSA

A norma, em seus subitens 3.2.11.2 e 3.2.11.2.1, afirma que para ajudar na análise da construção, esta deve ser apresentada com elementos e componentes modelados tridimensionalmente em programa apropriado, sendo que o estudo da estrutura pode ser realizado com dois tipos de carregamento: efeito de deformação controlada (QUD) ou efeitos de esforço controlado (QUF). Sendo necessário, após a definição de qual análise a ser utilizada, fazer a classificação dos elementos que compõem a edificação em primários e secundários, bem como definir qual o tipo de carregamento que atua em cada componente.

A norma reitera, em seu subitem 3.2.11.2.2 que é necessário verificar se o modelo possui a quantidade de detalhes estruturais que proporcione uma correta redistribuição de esforços verticais dos elementos, como o carregamento de pisos e telhado, para os elementos primários.

A seguir serão exemplificadas as medidas estabelecidas pela GSA para garantir a segurança da construção contra o colapso progressivo, sendo que todas as diretrizes apresentadas são definidas para a análise estática linear.

4.3.2 Método de dimensionamento utilizado pela GSA

Existem basicamente dois métodos de abordagem para prevenção do colapso progressivo: método indireto e o método direto. Consoante Baía (2014), no método indireto a resistência ao colapso progressivo é feita de forma implícita, onde são fornecidos níveis mínimos de resistência, continuidade e ductilidade para a estrutura. Já o método direto, ao qual será dado ênfase no presente trabalho por ser utilizado pela norma em estudo, tem por objetivo dimensionar as estruturas principais de uma construção de forma que estas tenham capacidade de transferir o aumento de carregamento para elementos adjacentes quando estiverem submetidas aos efeitos de uma avaria.

Dessa forma, pode-se perceber que o método direto consiste no estudo da estrutura quando esta perde um elemento estrutural, sendo que este elemento deve ser pré-

determinado, visando identificar as deformações e tensões que resultam do dano acidental (FELIPE, 2017).

Ainda segundo o mesmo autor, com a utilização do método direto busca-se estruturar a construção de forma que sobre o efeito de uma sobrecarga, a qual impossibilite uma peça estrutural realizar a atividade para que foi construída, esta encontre caminhos para a redistribuição do carregamento, sendo utilizado neste caso o Método dos Caminhos Alternativos (MCA). A seguir esse método será apresentado, em seus detalhes, sendo descrito como é utilizado para promover a segurança das construções contra esse fenômeno.

4.3.3 Método dos caminhos alternativos (MCA)

A GSA (2016) aborda que o Método dos Caminhos Alternativos (MCA) é utilizado para atender os requisitos necessários para evitar o colapso progressivo, proporcionando resistência para estrutura, para que a mesma seja capaz de resistir e transferir os esforços que surgirão devido à perda de um elemento vertical de suporte.

Esta norma afirma que o MCA minora o risco do evento e garante assim que a construção suporte o carregamento produzido pelo novo vão, criado pela retirada do pilar. Sendo assim, são limitados os danos a uma área isolada e é possível desenvolver uma edificação redundante e equilibrada em toda a sua extensão vertical.

Nesse método, podem ser utilizados os três procedimentos de análise: estática linear, estática não linear e dinâmica não linear. Porém, no presente trabalho, será dado ênfase na análise estática linear, pelo fato de ser mais prática, já que foi verificado sua utilização em diversos trabalhos e por também ser empregado pela instituição governamental americana *U.S. General Services Administration*. A propósito, essa análise considera que a formulação geométrica é baseada em pequenas deformidades, que o material é definido como linear elástico. É também considerado que a estrutura na qual foi retirado um elemento vertical pré-determinado deverá ser submetida, de uma só vez, ao carregamento.

4.3.3.1 Descrição da análise do MCA

Para o emprego do MCA, a estrutura primeiramente é dimensionada de forma usual para as combinações dos estados limite último, e posteriormente deve passar por uma simulação na qual será identificado seu comportamento após a retirada repentina e predeterminada, de elementos verticais de suporte de carga, sendo retirados um de cada vez em locais considerados críticos. Esses locais críticos são regiões onde há maior possibilidade de ocorrência do colapso progressivo, devido ao aumento do carregamento resultante da retirada do elemento. Após a retirada desse elemento ocorre a redistribuição dos esforços, e para verificar se a construção suportará o novo carregamento a GSA apresenta uma nova combinação de carga para que essa análise seja efetuada.

Após o referido anteriormente, deve-se comparar essas novas solicitações obtidas através dos diagramas, com as resistências últimas dos elementos, sendo que por meio de um critério de aceitação será possível determinar o grau de risco desse componente sofrer o fenômeno do colapso progressivo. Esse critério de aceitação é denominado relação demanda capacidade (RDC) o qual será descrito mais adiante.

Por tanto, se o elemento estrutural em torno do pilar removido não for capaz de suportar aos novos esforços, o que poderá ser percebido pela verificação anteriormente descrita, pode-se então considerar que a construção é suscetível ao colapso progressivo. E por tanto, deve-se redimensionar os elementos estruturais buscando identificar quanto sua armadura deve aumentar de forma que a construção contraponha aos esforços do evento abordado, e assim assegure uma edificação resistente ao colapso (MENEZES, 2014). Além disso, é importante ressaltar, que o método exposto é empregado somente para estudo da influência causada pela retirada de elementos verticais da construção.

A seguir serão descritas as principais considerações, referente a análise utilizada para dimensionar a estrutura e verificá-la, de acordo com a GSA (2016). De forma tornar a construção segura contra o colapso progressivo.

4.3.4 Definição dos níveis de segurança das instalações

Em seu item 2.3 a GSA (2016) especifica os critérios para determinação dos *"Facility Security Levels" (FSL)*, ou seja, "Níveis de Segurança de Instalações" (NSI), onde as instalações são categorizadas conforme a análise de vários fatores relacionados à segurança, como a probabilidade de ser alvo de ataque terrorista, bem como o valor e importância da construção.

A avaliação dos riscos se baseia na identificação dos possíveis eventos críticos que podem ocorrer devido ao tipo de utilização da construção. Essa classificação é realizada, pois a partir desta é definido se os requisitos do MCA serão aplicáveis a tais instalações ou não.

O governo americano é o responsável por fazer a determinação final do NSI, especificamente no que se refere à aplicabilidade das diretrizes para evitar o colapso progressivo, onde o risco deve ser aceito ou medidas de segurança devem ser tomadas para reduzi-lo. No subitem 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3, a norma aborda as seguintes orientações em relação aos níveis de segurança das instalações:

a) NSI I & II;

Para os edifícios que forem classificados nesses níveis, que geralmente são os que possuem baixa ocupação e nível de risco, independentemente do número de pavimentos, as diretrizes para evitar o colapso progressivo não são necessárias nos projetos.

b) NSI III & IV; e

Para os edifícios com essa classificação com quatro ou mais pavimentos, devem utilizar procedimentos do método de caminhos alternativos e redundância para evitar o colapso progressivo. A saber, não são considerados como pavimento, locais com baixa ocupação, exemplos destes: estacionamentos e coberturas.

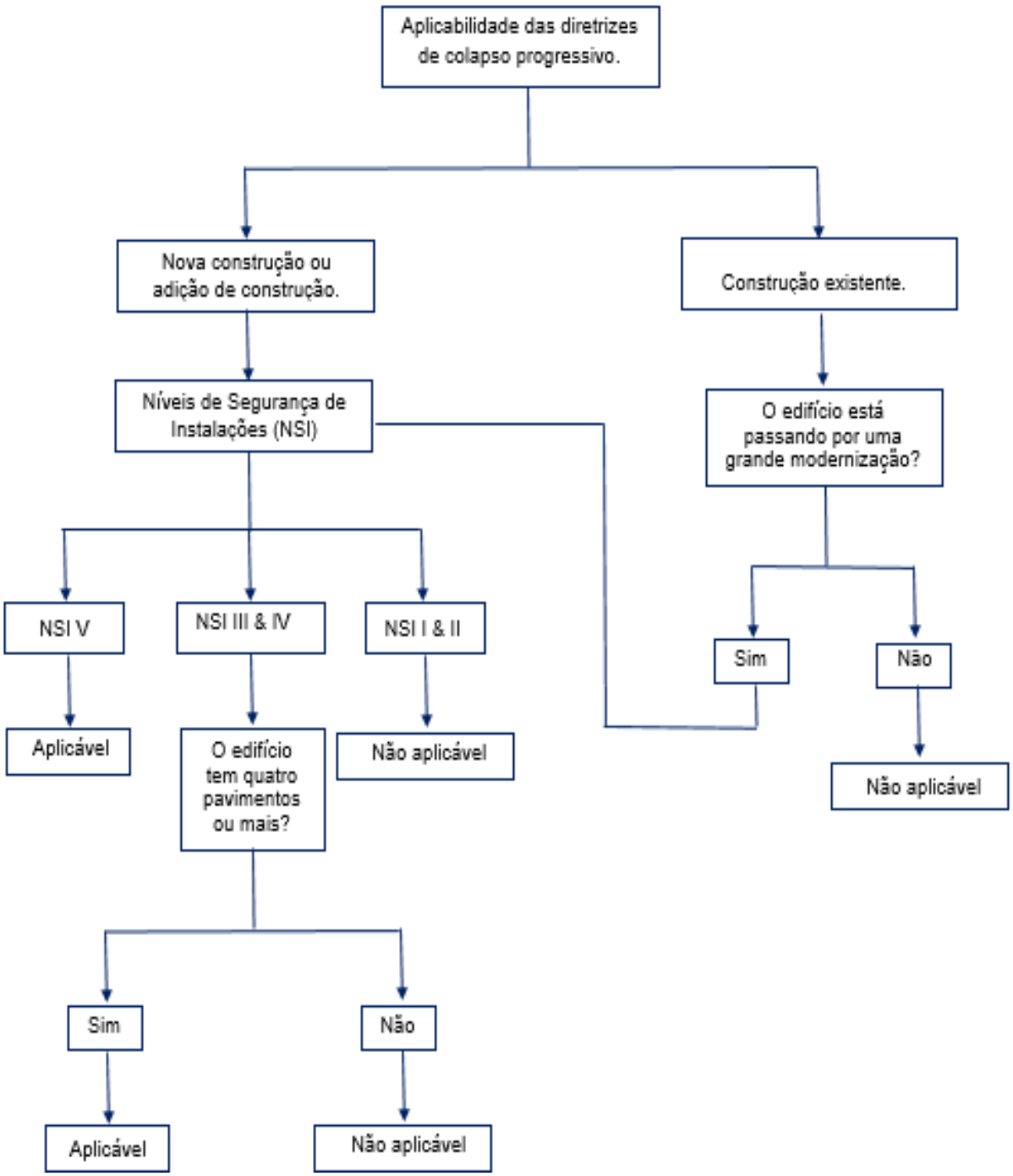
c) NSI V.

Para edifícios com essa classificação, independentemente do número de pavimentos, devem ser utilizados procedimentos do método de caminhos alternativos para evitar

o colapso progressivo, não sendo necessário aplicar os requisitos para obter redundância na estrutura.

A figura 13 ilustra quando deve ser aplicado as diretrizes para evitar o colapso progressivo através da determinação do NSI.

Figura 13 – Fluxograma de aplicabilidade do MCA



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 6.)

4.3.5 Classificação dos elementos da construção em primários e secundários

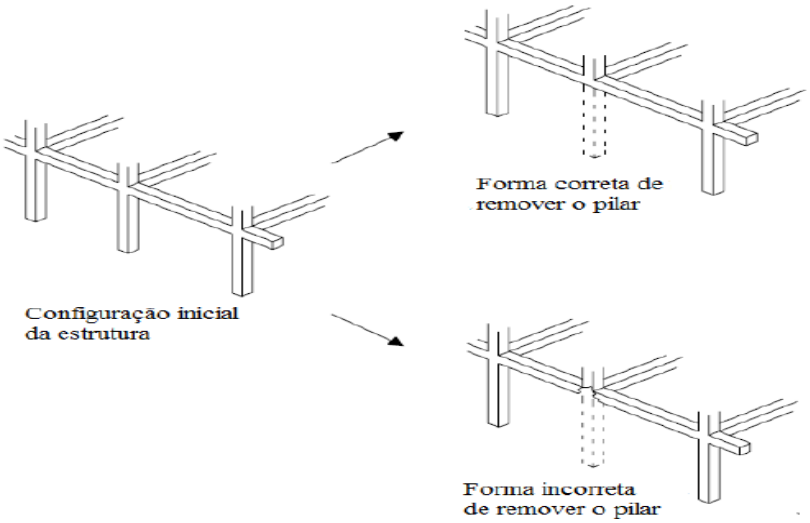
A GSA (2016) afirma que os elementos primários, são as lajes, vigas e pilares, ou seja, são aqueles que proporcionam ao sistema estrutural a resistência necessária para resistir à retirada de elemento vertical de suporte de carga. Já os secundários, serão todos os outros elementos que não contribuem para a resistência do colapso progressivo.

4.3.6 Escolha das regiões para retirada dos pilares

No seu item 3.2.9 a norma aborda que os elementos verticais de suporte de carga são removidos conforme o nível de segurança exigido para cada tipo de edifício. Para os edifícios classificados em NSI III & IV, as retiradas ficam limitadas ao térreo e subsolos, mesmo que esses ambientes sejam acessíveis ou não ao público. Já para os classificados em NSI V, os elementos devem ser removidos em cada pavimento, para ser realizado um estudo mais preciso dos efeitos do colapso progressivo.

A norma aborda que para cada pilar que for removido, a continuidade do elemento que este suporta deve ser mantida, conforme ilustra a figura 14. Dessa forma, a estrutura se mantém estabilizada, e assim será capaz de resistir às novas solicitações que surgirão devido à remoção do pilar, transferindo-as para os elementos adjacentes.

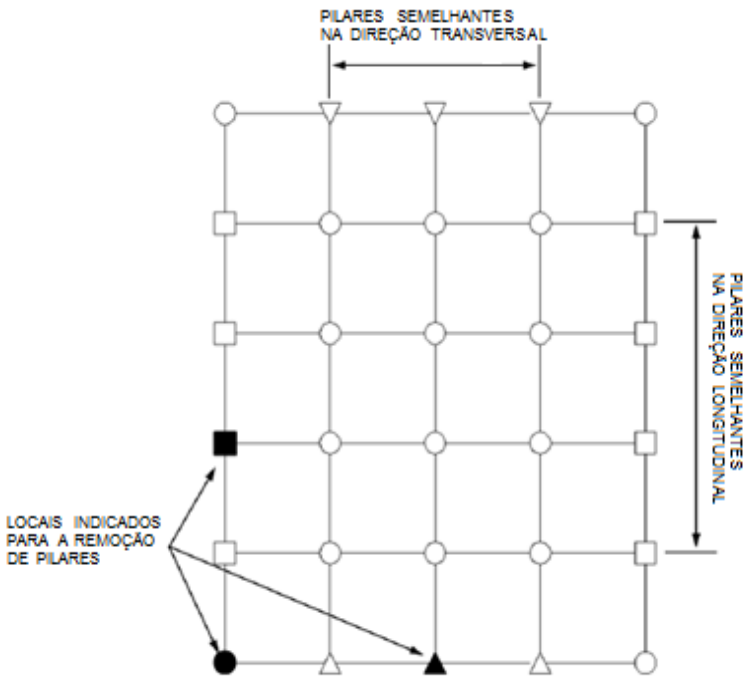
Figura 14 – Remoção de um pilar



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 12.)

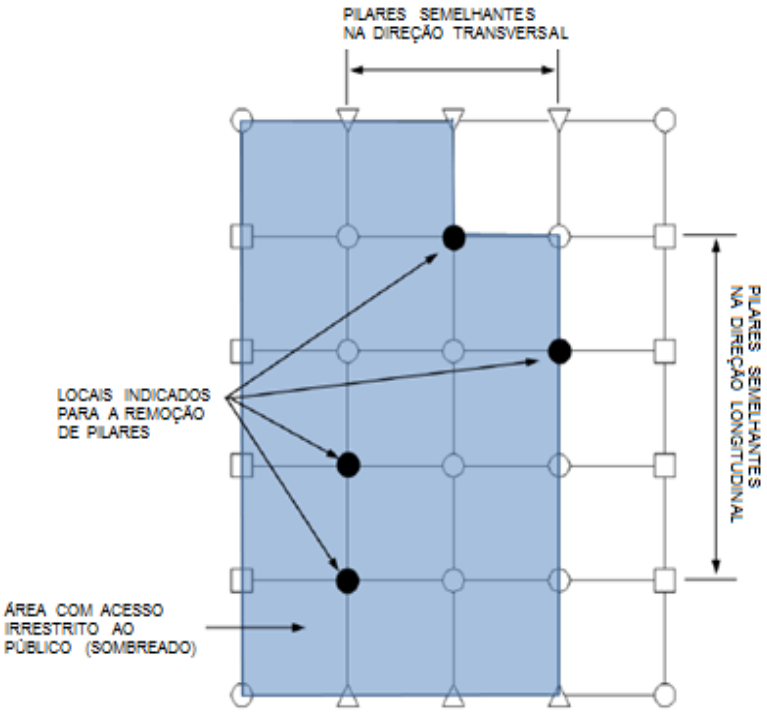
No subitem 3.2.9.2.2 e 3.2.9.2.3 a GSA (2016) determina os locais para remoção dos pilares externos e internos, sendo que para os pilares externos, é indicado escolher aqueles que estão próximos, ou na metade do lado maior e menor da construção, além desses, é indicado retirar os pilares externos localizados nos cantos, conforme ilustra figura 15. As orientações para remoção dos pilares internos são semelhantes às especificações anteriormente citadas, executando as que se referem aos de canto e adjacentes ao do canto, além disso, deve-se dar atenção às áreas médias a cada lado que compõe a planta. Também é necessário retirar pilares que se encontrem em locais onde o usuário tem livre acesso, conforme ilustra a figura 16.

Figura 15 – Locais indicados para retirada dos pilares externos



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 15.)

Figura 16 – Locais indicados para retirada dos pilares internos



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 15.)

Para ambos os casos, também podem ser removidos pilares localizados em locais críticos, que o engenheiro responsável pelo projeto julgar necessário. Como exemplo desses locais, pode-se citar: regiões em que a geometria da planta muda significativamente, como por exemplo cantos recortados.

4.3.7 Área de propagação do colapso progressivo

A GSA (2016) aborda no subitem 3.2.10.1 que uma construção existente satisfaz os requisitos exigidos no método dos caminhos alternativos, se para análise que for utilizada (estática linear, estática não linear e dinâmica não linear) nenhum dos elementos da estrutura exceder o limite dos critérios de aceitação, descritos mais adiante. Alternativamente, caso os limites dos critérios de aceitação sejam ultrapassados, a construção deverá ser projetada novamente, de modo a reparar os elementos que não estão conformes, além disso, análises adicionais também podem ser realizadas para demonstrar que a falta dos elementos estruturais que forem retirados, não resultará em um colapso progressivo.

A norma define, o colapso progressivo, no seu subitem 3.2.10.2 como aquele em que a extensão do dano ultrapassa o limite das áreas de colapso não progressivo, em casos que haja por exemplo, a retirada de um pilar. Essas áreas de colapso não progressivo, são definidos segundos os seguintes critérios:

a) para áreas externas;

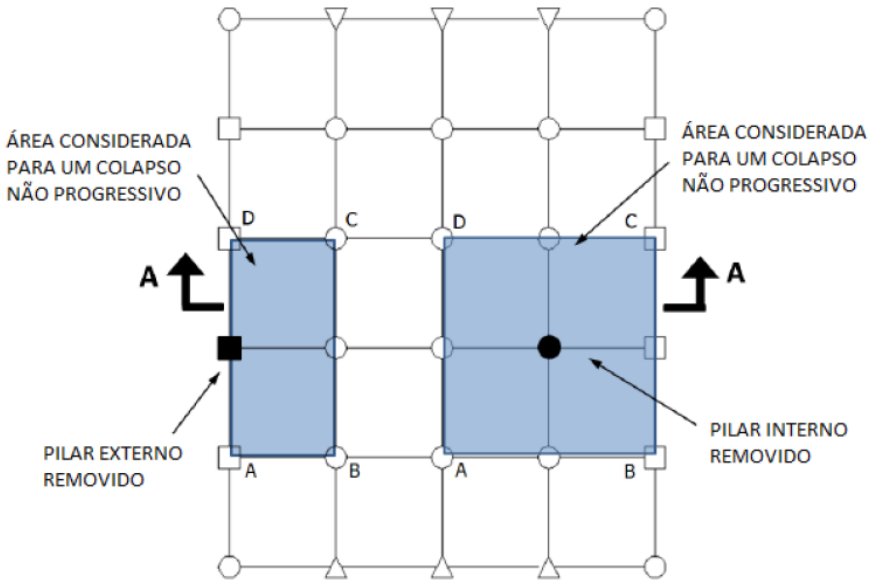
O colapso não progressivo é considerado no nível do piso diretamente acima e ao lado do elemento retirado, não devendo exceder 15% da área total do piso, para cada andar respectivamente;

b) para áreas internas.

O colapso não progressivo é considerado no nível do piso diretamente acima e ao lado do elemento retirado, não devendo exceder 30% da área total do piso, para cada andar respectivamente.

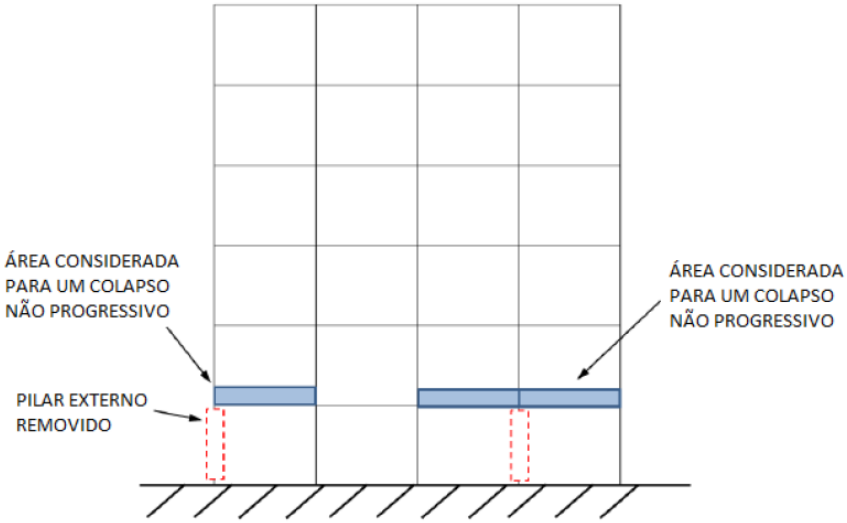
Nas figuras 17 e 18 são indicados os limites de propagação do colapso não progressivo, pois indica os locais onde estão os elementos diretamente ligados aos pilares que foram retirados.

Figura 17 – Planta: área do colapso não progressivo



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 18.)

Figura 18 – Corte: área do colapso não progressivo



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 18.)

Pode-se perceber que o dano do colapso progressivo, além de atingir os elementos diretamente ligados ao elemento retirado, pode atingir ou se propagar para outros vãos e pavimentos da construção.

4.3.8 Classificação dos efeitos de deformação controlada e de esforço controlado

De acordo com Ferreira (2016), o documento *Unified Facilities Criteria - Design of Buildings to Resist Progressive Collapse* (UFC-DBR-PC) afirma que os esforços atuantes nos elementos primários e secundários são classificados em efeitos de deformação controlada e efeitos de esforço controlado.

Os esforços atuantes nos elementos primários e secundários são considerados como efeitos de deformação controlada, quando a resistência do elemento é proporcional a deformação imposta ao mesmo, até que o limite de sua resistência seja atingido, sendo que após isso a resistência não diminui à medida que é aumentada a deformação.

Porém, os esforços atuantes nos elementos primários e secundários podem ser considerados efeitos de esforço controlado quando a resistência do elemento é proporcional a deformação, até que o limite de sua resistência seja atingido, sendo que após isso sua resistência diminui repentinamente a zero.

Essa classificação é realizada para determinar qual combinação de carga deve ser utilizada no dimensionamento da estrutura, as quais serão descritas a seguir.

4.3.9 Carga resultante de efeito de deformação controlada (QUD)

Segundo a GSA (2016) em seu subitem 3.2.11.4.1, para calcular essa ação é necessário aplicar simultaneamente a combinação de carga demostrada a seguir:

$$QUD = GLD + G \tag{2}$$

O carregamento proveniente das áreas de pisos acima do pilar removido deve ser majorado, sendo que esse aumento de carga deve ser aplicado nos vãos adjacentes e em todos os pavimentos acima do elemento retirado. Esse carregamento é descrito pela fórmula a seguir:

$$GLD = \Omega LD * [1.2 * D + (0.5 * L \; ou \; 0.2 * S)] \tag{3}$$

Onde:

$GLD =$ carga aumentada para efeito de deformação controlada;

$D =$ carga estática incluindo cargas de fachada (lb/ft² ou kN/m²);

$L =$ carga dinâmica incluindo sua redução para não exceder o valor máximo de 50 lb/ft² ou 244 kN/m²;

$S =$ carga referente a neve (lb/ft² ou kN/m²);

$\Omega LD =$ fator de aumento de carga para calcular efeitos de deformação controlada.

Abaixo está descrito o cálculo de cargas verticais para vãos não carregados com GLD, o que é mostrado na figura 19.

$$G = 1{,}2 * D + (0{,}5 * L \; ou \; 0{,}2 * S) \tag{4}$$

Onde: $G =$ cargas de gravidade.

4.3.10 Carga para efeitos de esforço controlado (QUF)

De acordo com o subitem 3.2.11.4.2, a aplicação desse carregamento é análoga ao QUD, descrito pela combinação a seguir:

$$QUF = GLF + G \quad (5)$$

Sendo que o carregamento proveniente das áreas de pisos acima do pilar removido deve ser majorado, esse aumento de carga deve ser aplicado aos vãos adjacentes e em todos os pavimentos acima do elemento retirado. O carregamento é demonstrado pela equação:

$$GLF = \Omega LF * [1.2 * D + (0.5 * L\ ou\ 0.2 * S)] \quad (6)$$

Sendo:

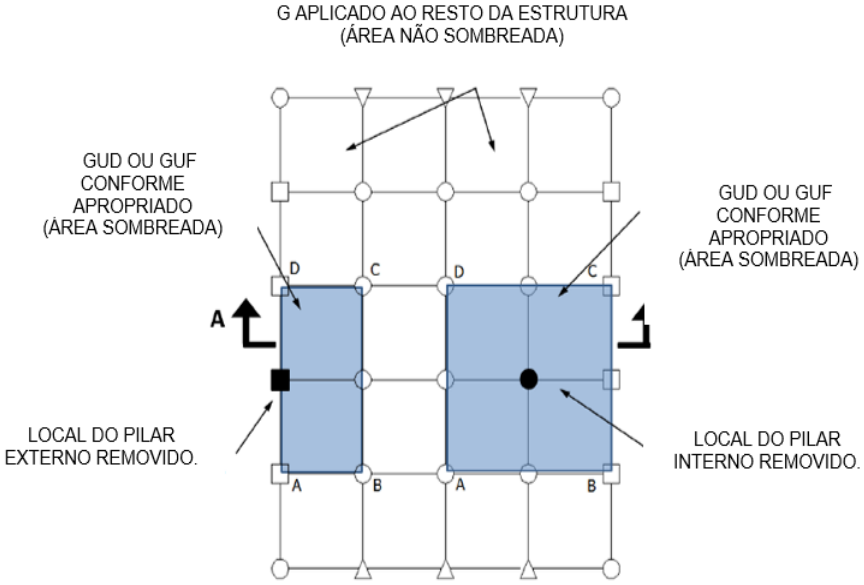
$GLF =$ cargas aumentadas para efeitos de esforço controlado;

$\Omega LF =$ fator de aumento de carga.

Já para áreas de pisos afastados do elemento retirado, o carregamento deve ser determinado de acordo pela equação das cargas de gravidade (G), já apresentada anteriormente. Também é importante ressaltar que o fatores de aumento de carga, ΩLF e ΩLD, são definidos de acordo com o tipo de material e estrutura.

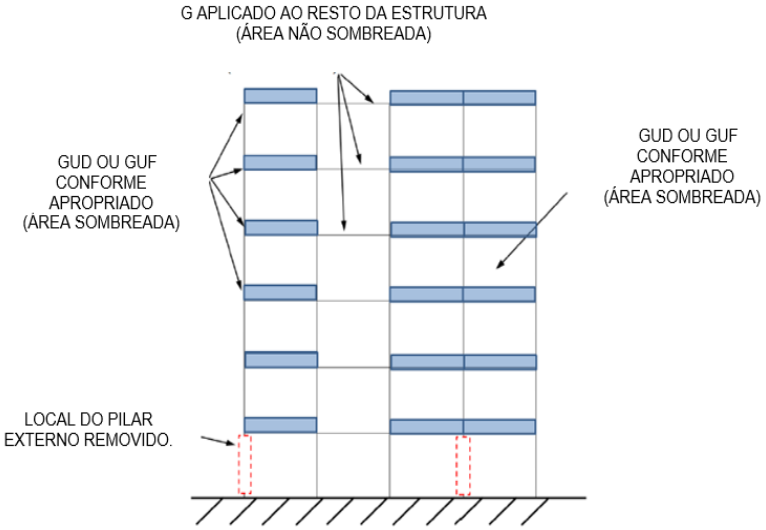
Nas figuras 19 e 20, serão ilustrados os locais das aplicações do carregamento após a retirada dos pilares. Essas figuras demonstram onde será aplicado o novo carregamento para os elementos adjacentes ao elemento vertical removido, e também o local de aplicação do carregamento para elementos não adjacentes, porém que irão influenciar na coluna retirada.

Figura 19 – Planta-baixa que ilustra locais de remoção de colunas e de aplicação de carga para estudo do MCA



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 23.)

Figura 20 – Corte que ilustra a remoção das colunas e locais de aplicação de carga para estudo do MCA



Fonte: General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance (2016, p. 23.)

4.3.11 Relação demanda capacidade (RDC)

Esta relação, encontrada no subitem 3.2.11.1.2 da GSA (2016), busca identificar se a estrutura suportará os efeitos de uma avaria inicial ou irá sofrer o colapso progressivo, isso a partir da determinação de limites os quais serão descritos a seguir.

Primeiramente será mostrado a verificação para o momento fletor.

$$RDC = \frac{QGSA}{Qu} \leq 2 \ (\ para\ estruturas\ típicas) \tag{7}$$

$$RDC = \frac{QGSA}{Qu} \leq 1{,}5 \ (\ para\ estruturas\ atípicas) \tag{8}$$

Sabendo que, o valor de QGSA corresponde aquele encontrado no diagrama gerado após a remoção do pilar, e Qu corresponde ao valor calculado através do método convencional de cálculo, essa informação também é válida para a verificação do esforço cortante e normal. É importante ressaltar que para o esforço de momento fletor, valores de RDC maiores que 2 expressam um grande risco de ocorrer o colapso progressivo. Já valores entre 1 e 2 afirmam que a estrutura é capaz de redistribuir os esforços para os elementos que estão adjacentes (GSA, 2016). Para os esforços normais que atuam nos pilares os valores limitantes são os mesmos utilizados do momento fletor.

Já para a verificação dos esforços cortantes, tem-se:

$$RDC = \frac{VGSA}{Vu} \leq 1 \tag{9}$$

Sendo que o valor encontrado deve ser menor ou igual a 1, segundo a norma. Mas, caso os valores excedam os limites supracitados, deve-se efetuar o redimensionamento das armaduras para que os elementos em estudo possam combater a esse colapso, essas armaduras são nomeadas como armaduras ótimas, isso quando se trata de estrutura típicas (GSA, 2016).

4.3.12 Número mínimo de sistema de redistribuição de carga

A norma aborda, em seu subitem 3.4.2.1, o número mínimo de sistema de redistribuição de cargas que devem ser incorporadas ao projeto estrutural. Esse valor é determinado pela equação apresentada:

$$n \geq N/3 \tag{10}$$

Sendo:

$\mathrm{n} =$ número de sistemas de redistribuição de carga vertical. Esse valor deve ser arredondado para o próximo inteiro;

$N =$ número de andares da construção.

Sendo importante ressaltar que o espaçamento (e) entre os sistemas de redistribuição de carga não deve exceder a distância de três andares do edifício.

$$\mathrm{e} \leq 3 \text{ andares} \tag{11}$$

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS

Ao realizar um estudo comparativo entre as normas, pode-se perceber que a norma brasileira NBR 6118/2014 apresenta recurso contra o colapso somente para lajes sem vigas, pois determina um tamanho de ancoragem para a armadura de flexão inferior, para garantir a ductilidade local da estrutura, e assim promover a proteção contra o colapso progressivo. Com relação as lajes protendidas, a mesma norma, afirma que se pelo menos um cabo, localizado em cada direção ortogonal, passar no interior da armadura longitudinal a qual se localiza na seção transversal do pilar, é possível dispensar o emprego de armadura passiva que combata o colapso citado. E a NBR 9062/2006, determina que os projetistas tomem precauções especiais no dimensionamento geral da estrutura, bem como nos detalhes construtivos, entretanto, a norma não especifica quais os requisitos devem ser atendidos para evitar esse evento.

Já a norma americana, GSA, utiliza o Método dos Caminhos Alternativos (MCA) para dimensionar a estrutura de forma que esta possa resistir ao colapso progressivo, e verificar se os requisitos adotados são suficientes para evitar esse fenômeno. Para tanto, especifica que deve ser realizada a classificação da estrutura de acordo com o seu nível de segurança (NSI), para identificar a aplicabilidade das diretrizes para evitar o evento. Também determina a necessidade de classificar os elementos em primários e secundários, e identifica se as ações atuantes nesses elementos são de esforço controlado ou de deformação controlada.

Outra medida indicada é a realização de uma modelagem tridimensional da construção, para assim efetuar a análise do comportamento da estrutura após a remoção do elemento vertical. Além disso, é apresentado os locais para retirada desses elementos verticais, afirmando ser necessário retirar um de cada vez, em regiões consideradas críticas. Sendo que após a retirada dos pilares ocorre a redistribuição dos esforços, e por isso a norma apresenta novas combinações de carga, que são definidas de acordo com a classificação dos efeitos, para serem utilizadas no dimensionamento.

Essas combinações são utilizadas para gerar os diagramas de esforços solicitantes na estrutura, necessários para verificar se a construção suportará o novo

carregamento, isto através da aplicação do RDC. E por fim é apresentado como identificar a quantidade de sistema de redistribuição de carga para a construção, bem como o espaçamento entre estes.

Considerando o que foi apresentado, e ao realizar a comparação entre as abordagens que as normas citadas trazem, pode-se perceber que há uma grande diferença entre as medidas tomadas nessas abordagens. A GSA (2016) trata o assunto de forma mais ampla, em suas nuances, já que possui um vasto conjunto de medidas contra o fenômeno em estudo, sendo importante ressaltar que neste trabalho somente foi apresentado a abordagem geral dessa norma, sobre o colapso progressivo, pois esta possui medidas preventivas para os diferentes tipos de construção, como: estruturas metálicas, de madeira, de concreto armado e alvenaria estrutural.

Por outro lado, ao analisar as normas brasileiras, perceber-se que essas possuem uma abordagem simplista sobre o tema, já que a NBR 6118/2014 somente orienta a prevenção do colapso progressivo para um tipo de estrutura existente, e a NBR 9062/2006 apesar de afirmar a necessidade de tomar medidas contra o esse fenômeno, não as especifica. Por isso, pode-se afirmar que as normas brasileiras são bem omissas em relação a esse requisito.

Devido ao afirmado, constata-se que a norma brasileira deveria possuir uma combinação de carga para ser aplicada à construção, para que esta suporte os carregamentos que surgirão após a perda de um elemento estrutural vertical, promovendo assim a ductilidade da estrutura. A saber, essa combinação deve ser utilizada após o dimensionamento realizado pelo modo convencional e deve possuir componentes que respeitem as nuances de cada forma de estrutura existente no Brasil.

Além disso, é necessário desenvolver procedimentos para verificar se a medida anteriormente citada garante a segurança contra o colapso progressivo. Essas medidas tornam-se relevantes, já que podem evitar acidentes estruturais como os citados no subitem 2.3 presente neste trabalho.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo retratar sobre o colapso progressivo através da apresentação de seu conceito, suas principais causas e prevenção, já que esse tema não é muito conhecido pela maioria dos estudantes e profissionais da área. Devido às informações apresentadas o estudo do colapso progressivo se torna importante, já que, quando considerado nos cálculos estruturais podem salvar vidas, pois proporcionam tempo adequado para remoção de pessoas, caso a estrutura sofra um impacto relevante o qual comprometa um ou mais elementos estruturais.

Além disso, foram demonstradas as formas de abordagem sobre o assunto nas normas brasileiras e americana de forma a identificar os pontos relevantes e suas principais diferenças. Através do estudo realizado, pode-se afirmar que a norma brasileira trata o assunto de uma forma mais simplicista, isso devido a comparação desta com a norma americana, pois essa abrange somente medidas relativas à armadura para apenas uma forma de estrutura. Já a norma americana estabelece orientações que utiliza o Método dos Caminhos Alternativos (MCA) o qual busca dimensionar a estrutura de forma que esta possa redistribuir as cargas para elementos adjacentes, isso após perda de um elemento vertical de suporte.

Através da comparação entre as normas, pode-se perceber que a GSA trata de forma mais detalhista o dimensionamento de estruturas que resistam ao colapso progressivo, pelo fato de nos Estados Unidos (EUA) ser frequente a ocorrência de terrorismo e fenômenos naturais, como: terremoto, furacão e tornado. Diferentemente, no Brasil, não há incidência de ataques terroristas, e no caso de fenômenos naturais, em sua maioria, seus efeitos não possuem grande influência na estabilidade das construções, porém como abordado, existem exemplos de construções brasileiras que já sofreram esse fenômeno, sendo suas causas resultado de outros fatores, como: explosões, sobrecargas, impactos de veículos em elemento estrutural, erros de projeto e retirada indevida de elemento de sustentação

Por isso, pode-se identificar que a norma brasileira garante somente a proteção para construções sem vigas, e por isso é evidente a necessidade de se fazer estudos, acadêmicos e técnicos, de forma promover a segurança para todas as formas de estruturas existentes.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos, 2014. Disponível em:<https://engcivil20142.files.wordpress.com/2017/08/nbr-6118-2014-projeto-de-estruturas-de-concreto-procedimento-versc3a3o-corrigida.pdf>. Acesso em 03 mar. 2018.

ABNT NBR 9062/2006, Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado, 2006. Disponível em:< https://www.passeidireto.com/arquivo/24767415/nbr-9062---2006-----projeto-e-execucao-de-estruturas-de-concreto-pre-moldado>.Acesso em: 04 mar. 2018.

ANJOS, F. F. C; **Avaliação das armaduras contra o colapso progressivo em estruturas de concreto armado**. 2016. Monografia – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:< http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016650.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2018.

BAÍA, R. O. D; **Análise de uma edificação considerando o colapso progressivo**. 2014. Monografia-Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:< http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009426.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2018.

BITTARELLO, G. **Colapso progressivo de estruturas de concreto pré-moldado**. 2013. Monografia. Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em:< http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1485/1/PB_DACOC_2013_1_03.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2018.

CÂMARA, L. A; Parecer Técnico de engenharia: avaliação das causas do desabamento do Edifício Liberdade. 2012. Disponível em:< https://benhuser.files.wordpress.com/2010/07/desabamento-do-ed-liberdade.pdf> Acesso em: 13 jun. 2018.

DIMAS, T. S; **Análise de estruturas de edifícios sujeitas a ações acidentais**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Geotecnia) – Universidade Nova de Lisboa. 2014. Disponível em:< https://run.unl.pt/bitstream/10362/14018/1/Dimas_2014.pdf>. Acesso em 27 fev. 2018.

FELIPE, T. R. C; **Novo método para avaliação do riso do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural**. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de Estruturas)-Universidade de São Paulo. 2017. Disponível em:< http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07032017-105034/en.php>. Acesso em: 01 mar 2018.

FERREIRA, D. A. D; **Dimensionamento de edifícios de betão armado resistentes ao colapso progressivo**. 2016. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa. 2016. Disponível em:<

https://run.unl.pt/bitstream/10362/19811/1/Ferreira_2016.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2018.

GOETHE, P; Tragédia em forma de poesia. **Diário de Pernambuco**, 2012. Disponível em: <http://blogs.diariodepernambuco.com.br/diretodaredacao/2012/06/12/tragedia-em-forma-de-poesia/>. Acesso em 15 jun. 2018.

GSA – U.S. General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance, 2016. Disponível em: < https://www.gsa.gov/cdnstatic/Progressive_Collapse_2016.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2018.

LARANJEIRAS, A. C. R; **Colapso progressivo dos edifícios - breve introdução**. 2011. Disponível em:< http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/58-artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>. Acesso em: 05 mar. 2018..

MENEZES, R. L. G. A. **Análise de um edifício com lajes lisas considerando o colapso progressivo**. 2014. Monografia. Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:< http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014088.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2018.

ROCHA, M.L; SANTOS, G. F; **Estudo qualitativo do desabamento do edifício atlântico.** 2017. Monografia. Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tuiuti do Paraná. Disponível em:< http://tcconline.utp.br/media/tcc/2018/01/ESTUDO-QUALITATIVO-DO-DESABAMENTO.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2018.

SANTOS, M. A. T. R; **Estudo de viabilidade de edifícios em concreto armado projetados para permitir a ruptura de qualquer dos seus pilares na base**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia das Construções) – Universidade Católica de Pernambuco. Disponível em:< http://www.unicap.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=825>. Acesso em 12 jun. 2018.

TERRA; No Rio, 7 serão indiciados por queda do Edifício Liberdade. 2012. Disponível em:<https://www.terra.com.br/noticias/brasil/policia/no-rio-7-serao-indiciados-por-queda-do-edificio-liberdade,19b8c280d01da310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em: 13 jun. 2018.