

Colapso progressivo: estudo de uma edificação residencial

Valmir Stani Fell Júnior¹, Rebeca Jéssica Schmitz²

¹Universidade do Vale do Taquari / valmir.felljr@gmail.com

²Universidade do Vale do Taquari / rebeca.j.schmitz@gmail.com

Resumo

O colapso progressivo, de acordo com LARANJEIRAS (2011), pode ser definido como uma reação em cadeia em que a ruptura de um elemento estrutural gera a ruptura total ou parcial da estrutura. Como os danos causados tem proporção muito maior do a ruptura local inicial, esse fenômeno também é conhecido como colapso desproporcional. O acidente com o edifício Ronan Point em 1968, em Londres, motivou o estudo deste fenômeno que ainda não é abordado de forma satisfatória nas normas brasileiras. Tendo em vista a necessidade de familiarização e investigação do tema, o trabalho tem como objetivo verificar a suscetibilidade ao colapso progressivo de um edifício residencial de 12 pavimentos em concreto armado que fora dimensionado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Para análise estrutural e dimensionamento do edifício foi utilizado o *software* CAD/TQS na versão 19. A análise de colapso progressivo seguiu o manual *General Services Administration* (GSA). Optou-se pela retirada de um pilar de fachada do pavimento térreo, e após isso através de uma nova análise da estrutura através do Método dos Caminhos Alternativos de Carga (MCAC) foram definidos os novos esforços a que a estrutura está sujeita. A partir disto calculou-se a relação demanda capacidade (RDC) para os elementos estruturais. Pode-se verificar que somente os elementos no entorno do pilar retirado tiveram seus esforços majorados. Constatou-se que o edifício é suscetível ao colapso progressivo e o simples transpasse das armaduras garantindo a continuidade e aumentando a ductilidade não seria suficiente para conter uma possível ruptura parcial. A falta de redundância na distribuição dos elementos estruturais é a principal causa da dificuldade em se criar caminhos alternativos de carga que mantenham a integridade da estrutura.

Palavras-chave

Colapso Progressivo; Métodos dos Caminhos Alternativos de Carga; Concreto Armado.

Introdução

LARANJEIRAS (2011) define o colapso progressivo como a propagação de uma ruptura inicial localizada, que pode gerar a ruína total ou parcial de uma estrutura. Também pode ser chamado de colapso desproporcional pois o dano gerado é desproporcional à causa que levou ao dano inicial. Dentre os eventos que podem culminar no processo de colapso progressivo estão fenômenos extraordinários como terremotos, atentados terroristas, explosões, colisão de veículos, entre outros. FELIPE (2017) ressalta que essas ações, classificadas como excepcionais, segundo a NBR 8681 (ABNT, 2004) muitas vezes são desprezadas pelos projetistas pela baixa probabilidade de ocorrerem.

Além disso, as normas de projeto de estruturas são bastante brandas e pouco esclarecedoras sobre este tópico, ficando em aberto a necessidade de verificação de colapso progressivo e sem poucas orientações de como fazê-lo.

De fato, foram registrados acidentes, como em 1968 quando o edifício Ronan Point de 22 andares, em Londres, teve parte de sua estrutura rompida após uma explosão de gás de cozinha no 18º andar. A estrutura que contava com paredes de concreto pré-moldadas protendidas, teve uma de suas paredes portantes externas completamente destruída, o que gerou sobrecarga nas demais e levou à ruptura dos elementos próximos em todos os andares. Este foi um marco que impulsionou a pesquisa e estudo deste fenômeno. LEYENDECKER E BURNETT (1976) apud LIM (2004) estimam que entre 15 e 20% do colapso de edifícios se dá devido ao colapso progressivo.

Dentro deste contexto, este trabalho busca trazer uma contribuição ao tema, avaliando a suscetibilidade quanto ao colapso progressivo de um edifício de 12 pavimentos em concreto armado, dimensionado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Colapso progressivo

GRIFFITHS ET AL. (1968) apud LIM (2004) explicam que após a ruptura inicial, que é local e compreende um ou mais elementos estruturais, os carregamentos se dividem na estrutura remanescente de forma que se criam caminhos alternativos para distribuição das cargas. Ocorrida a redistribuição, os elementos estruturais terão as solicitações alteradas de forma que se em um deles a nova solicitação for superior à resistência ocorrerá nova ruptura local. Se a estrutura perder muitos elementos se caracteriza a ruptura total ou parcial devida ao colapso progressivo, sendo este tipo de comportamento comum a estruturas aporricadas como edifícios.

LARANJEIRAS (2011), com base em normativas internacionais, define que pode-se considerar que houve colapso progressivo quando a área na ruptura horizontal da edificação, superar os 15% da área total do piso envolvido ou ultrapassar 100m². Já em casos de propagação vertical, considera-se quando a ruptura atingir mais de dois pavimentos.

Segundo HORNOS ET AL. (2015), as causas que originam o colapso progressivo nas edificações ocorrem fundamentalmente devido a três motivos: erros de projeto, ações variáveis abusivas que não foram consideradas no projeto estrutural e ações extraordinárias, capazes de incrementar solicitações na estrutura acima daquilo que fora considerado em projeto.

Os critérios existentes, nas diversas normas mundiais, concordam quanto à importância de a estrutura resistir à perda de elementos estruturais, fazendo com que esse dano não se propague por toda a estrutura. Todos os estudos apontam que a maneira mais eficaz de se evitar o colapso progressivo é fazer com que a estrutura atenda a requisitos mínimos que são: redundância, ductilidade e continuidade.

Para LARANJEIRAS (2011), a redundância estrutural caracteriza-se pela existência de diferentes maneiras de redistribuição de esforços em um sistema previamente danificado. Exemplo disso é lembrado pelos autores HORNOS ET AL. (2015), o ataque terrorista sofrido pelo Pentágono no dia 11 de setembro de 2001, nos Estados Unidos, que apesar de ter parte da estrutura danificada não houve colapso progressivo pois a proximidade dos pilares fez com que a redistribuição de carga ocorresse sem levar a ruptura da edificação.

É importante ressaltar que a redundância na estrutura será benéfica para que situações de carregamentos anômalos que geram rupturas localizadas não se propaguem. Sendo que após o evento, é importante que o elemento estrutural danificado seja recomposto, para que volte a existir o nível de segurança estimado em projeto.

A ductilidade de uma estrutura pode ser compreendida como a capacidade de plastificação dos elementos estruturais. Essa característica está relacionada com a ocorrência de grandes deformações, postergando assim, sua ruptura total (LARANJEIRAS, 2011). Para o caso de estruturas em concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) menciona no item 19.5.4 que deve ser feita a passagem de armaduras inferiores sobre os pilares, localizados em sistemas de lajes sem a utilização de vigas (lajes planas), protegendo a estrutura contra uma eventual perda de algum apoio.

É importante destacar que o colapso progressivo não está restrito a estruturas em concreto armado, tanto que LIM (2004) faz um estudo voltado a estruturas metálicas. Entretanto devido ao enfoque deste trabalho, o concreto armado será mais evidenciado. Por final, a continuidade nas estruturas é uma característica que age em semelhança com a ductilidade, pois a mesma possui como função principal melhorar a redistribuição de esforços após ocorrer a perda de algum elemento estrutural. Esse critério se relaciona com o monolitismo e a hiperestaticidade estrutural, fornecendo assim uma redistribuição de esforços nos sentidos horizontal e vertical (HORNOS ET AL., 2015).

Prevenção ao colapso progressivo

ELLINGWOOD (1981) apud LIM (2004) coloca três possibilidades de reduzir o risco ao colapso progressivo: evitar que ocorra o evento que desencadeie o processo, uso de métodos indiretos de projeto ou uso de métodos diretos de projeto. Segundo o referido autor, controlar o evento que possa desencadear o colapso progressivo é uma medida que não aumenta a resistência da estrutura ao colapso, na verdade são medidas construtivas. Exemplo disso seria a instalação de barreiras que protejam contra colisão de veículos, maior controle na distribuição de gás e materiais inflamáveis.

O método indireto não exige ao calculista a reanálise da estrutura às ações excepcionais que podem vir a ocorrer. Baseia-se em uma aplicação genérica que consiste em prescrever resistências mínimas entre os elementos estruturais, garantindo assim a continuidade e a devida amarração entre esses componentes, resultando em uma estrutura robusta, estável e econômica. A continuidade da estrutura pode ser obtida pela amarração dos elementos estruturais, utilizando armaduras em posições apresentadas na figura 1 (LARANJEIRAS, 2011).

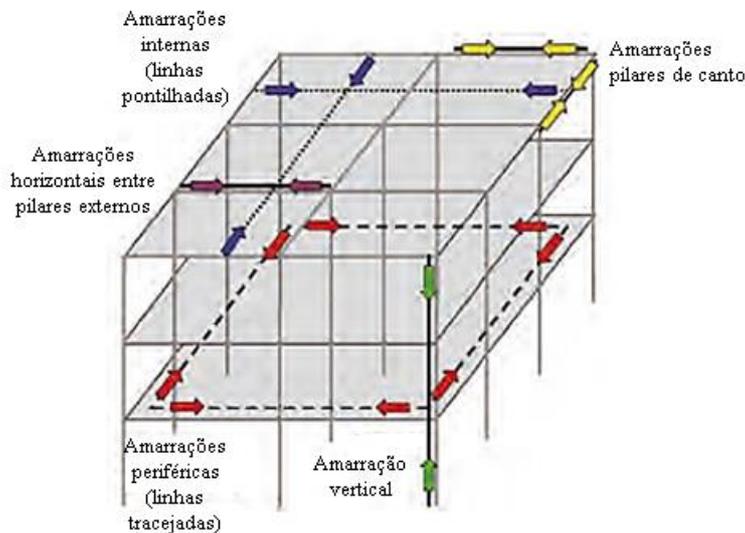


Figura 1 – Diferentes tipos de amarrações que previnem colapso progressivo (fonte: LARANJEIRAS, 2011)

Métodos diretos são aqueles em que é feita uma análise numérica verificando explicitamente a resistência ao colapso progressivo. Existe dois meios de se obter a resistência contra o colapso progressivo através dessa concepção: Método da Resistência Localizada Específica (MRLE), Método de Caminhos Alternativos de Cargas (MCAC).

Segundo LIM (2004), o MRLE consiste em dimensionar elementos específicos da estrutura para suportar as ações excepcionais esperadas. Este método é mais adequado quando é possível estimar com acurácia o valor das cargas excepcionais.

O MCAC é um método que também prevê um dano concentrado em um elemento, mas analisa as possibilidades de redistribuição dos carregamentos para os elementos estruturais próximos caso o elemento afetado venha a romper. Esse método está alicerçado na redistribuição das cargas para elementos adjacentes. LARANJEIRAS (2011) salienta que este método não exige a caracterização específica do que teria provocado a falência de um suposto elemento estrutural, logo esse método caracteriza-se por uma abordagem independente da ação excepcional.

A criação de caminhos alternativos para os carregamentos está atrelada a um sistema estrutural que tenha os atributos de redundância, ductilidade e continuidades, também citados nos métodos indiretos.

Verificação de risco ao colapso progressivo

Conforme já relatado, não há, nas normas brasileiras, nenhuma indicação que auxilie nesse processo. Portanto, para esse trabalho, utilizou-se o guia de diretrizes de projetos para a análise de colapso progressivo do *United States (U.S) General Services Administration (GSA) – Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects* (GSA, 2003). Este guia visa garantir que, na ocorrência de alguma inoperância estrutural, os danos da estrutura sejam limitados através da aplicação do MCAC.

A verificação do nível de vulnerabilidade da estrutura quanto ao colapso progressivo é dada pela relação demanda-capacidade (RDC). Sua expressão é colocada na equação 1, conforme o GSA (2003).

$$RDC = \frac{S_d}{R_d} \quad (1)$$

Sendo:

S_d = esforço solicitante de cálculo em um determinado componente na situação danificada;

R_d = esforço resistente de cálculo, sem ponderação, em um determinado componente.

De acordo com o GSA (2003), os elementos que devem ser considerados severamente danificados e colapsados são aqueles cujos valores de RDC excederem os valores expostos abaixo:

- a) $RDC \leq 2,0$ – estruturas com configuração típica;
- b) $RDC \leq 1,5$ – estruturas com configuração atípica.

A estrutura cujos elementos estruturais estiverem dentro dos limites estabelecidos será considerada como uma estrutura com um baixo risco de sofrer um colapso progressivo.

Estudo de caso: caracterização do edifício

O edifício em estudo possui 12 pavimentos, com 33 m de altura e pé direito médio de 2,8 m. Trata-se de uma edificação residencial, sendo: 2 pavimentos de subsolo, pavimento térreo, 5 pavimentos tipo, 2 pavimentos de cobertura e ainda o pavimento de reservatórios.

O projeto estrutural foi desenvolvido pela *Privilège* Engenharia, sendo a mesma empresa responsável pela sua execução. A estrutura é concebida no sistema de vigas, pilares e lajes em concreto armado moldados no local. As lajes são do tipo treliçadas pré-fabricadas, sendo utilizadas tabelas cerâmicas e EPS para enchimentos. O concreto utilizado para as vigas e lajes é o C25, e para os pilares, concreto C30. Já o aço utilizado para as armaduras é o CA-50, com tensão de escoamento igual a 500 MPa.

A edificação em estudo foi modelada e projetada utilizando o *software* de cálculo estrutural TQS V19, através de um pórtico espacial associado a grelhas equivalentes de lajes. Os esforços causados pelas cargas horizontais e verticais são calculados no pórtico espacial, já nas lajes, há somente os efeitos gerados pelas ações verticais. Os esforços da grelha das lajes são transferidos para o pórtico espacial, havendo assim a integração entre os dois modelos. Essa opção de modelo estrutural é denominada pelo *software* de Modelo IV – Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios. A etapa de dimensionamento e detalhamento que também é realizada com o *software* respeita as definições da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os carregamentos aplicados ao modelo seguiram as prescrições da NBR 6120 (ABNT, 1980). As cargas verticais permanentes consistem no peso próprio da edificação composto por elementos estruturais e não estruturais, para os quais obedeceu-se o peso específico definido na referida norma.

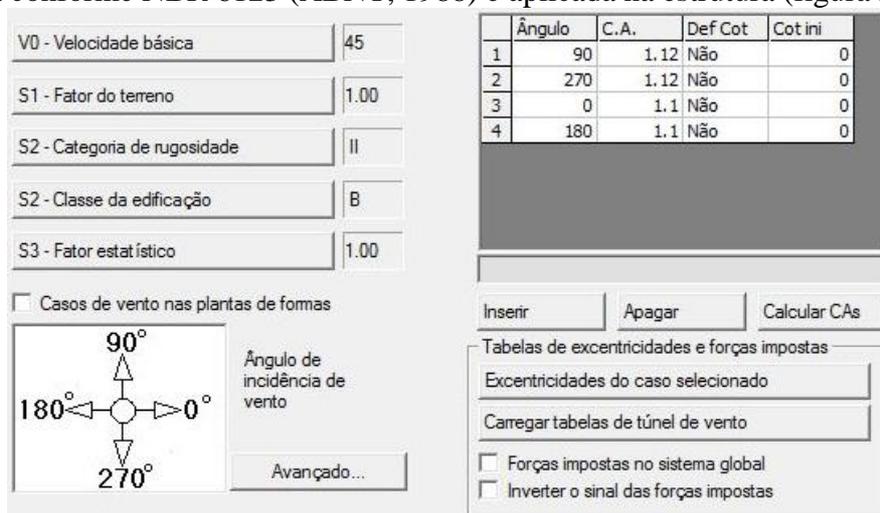
Os carregamentos verticais acidentais são devidos ao uso da estrutura e tem seu valor definido conforme a utilização de cada área. No caso deste edifício:

- a) subsolos são destinados a vagas de estacionamento;

- b) térreo possui 3 apartamentos e o restante da sua área é destinada para uso comum dos moradores, como salões de festas e terraços;
- c) pavimentos-tipo possuem 8 apartamentos;
- d) pavimentos destinados para a cobertura possuem 4 apartamentos do tipo duplex;
- e) pavimento reservatório é formado por uma área de reservatórios de fibra.

Os carregamentos horizontais aplicados na estrutura foram aqueles gerados devido à ocorrência dos ventos e desaprumos da estrutura. Diante da análise global da estrutura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve que o desaprumo não deve necessariamente ser superposto ao carregamento de vento, e que de uma forma genérica, deve ser considerado o mais desfavorável.

A carga de vento é inserida no modelo informando velocidade básica do vento, característica do terreno e vizinhança, coeficientes de arrasto. A carga de vento é calculada conforme NBR 6123 (ABNT, 1988) e aplicada na estrutura (figura 2).



Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1.12	Não
2	270	1.12	Não
3	0	1.1	Não
4	180	1.1	Não

Figura 2 – Ação do vento

De acordo com o GSA (2003), a remoção de um elemento chave deve ser realizada com o intuito de se gerar um “iniciador de carga”. Optou-se por suprimir um pilar que esteja vulnerável, por isso, o elemento a ser removido foi o pilar P37 (figura 3), suprimindo-se o lance que vai do térreo ao segundo pavimento. Esse lance foi escolhido pois encontra-se no *hall* do prédio, logo, exposto a ameaças como colisão de veículos. Além disso, esse lance possui pé-direito maior que os demais pavimentos, igual a 3,12 m. Para facilitar a identificação dos dois modelos em estudo, a situação original de projeto, ou seja, sem a remoção do pilar, será chamada de “situação normal”. Já o modelo em que foi retirado um lance do P37, será denominado “situação danificada”.

Resultados

A figura 4 apresenta o diagrama de momentos fletores nas vigas do pavimento térreo, tanto para situação normal quanto para a danificada. Analisando ambos os casos estudados, pode-se perceber que após a retirada do elemento P37, o diagrama de momento fletor das vigas próximas a esse pilar (V415, V430 e V431) muda significativamente, enquanto que as demais permanecem sem variações consideráveis.

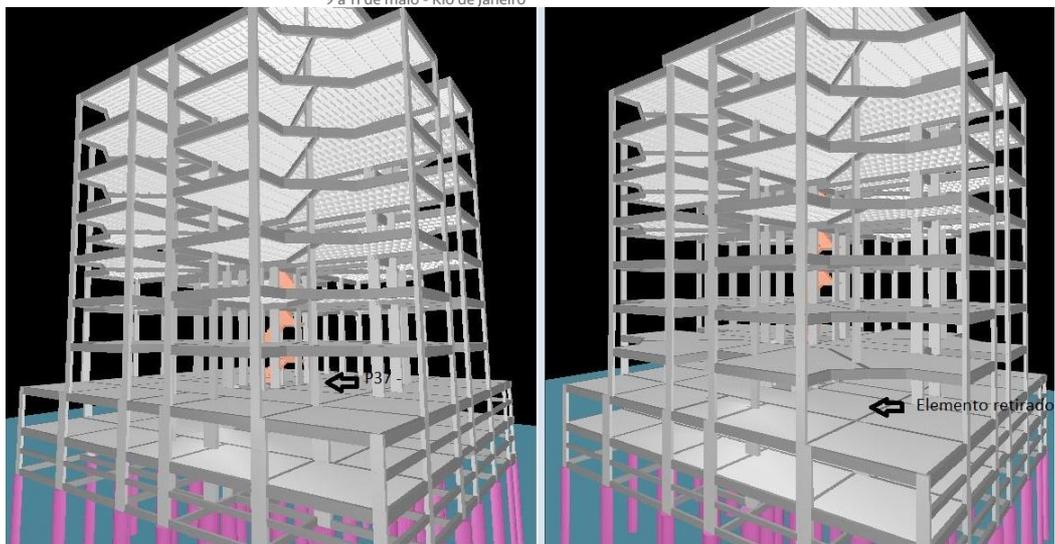


Figura 3 – Elemento estrutural a ser removido

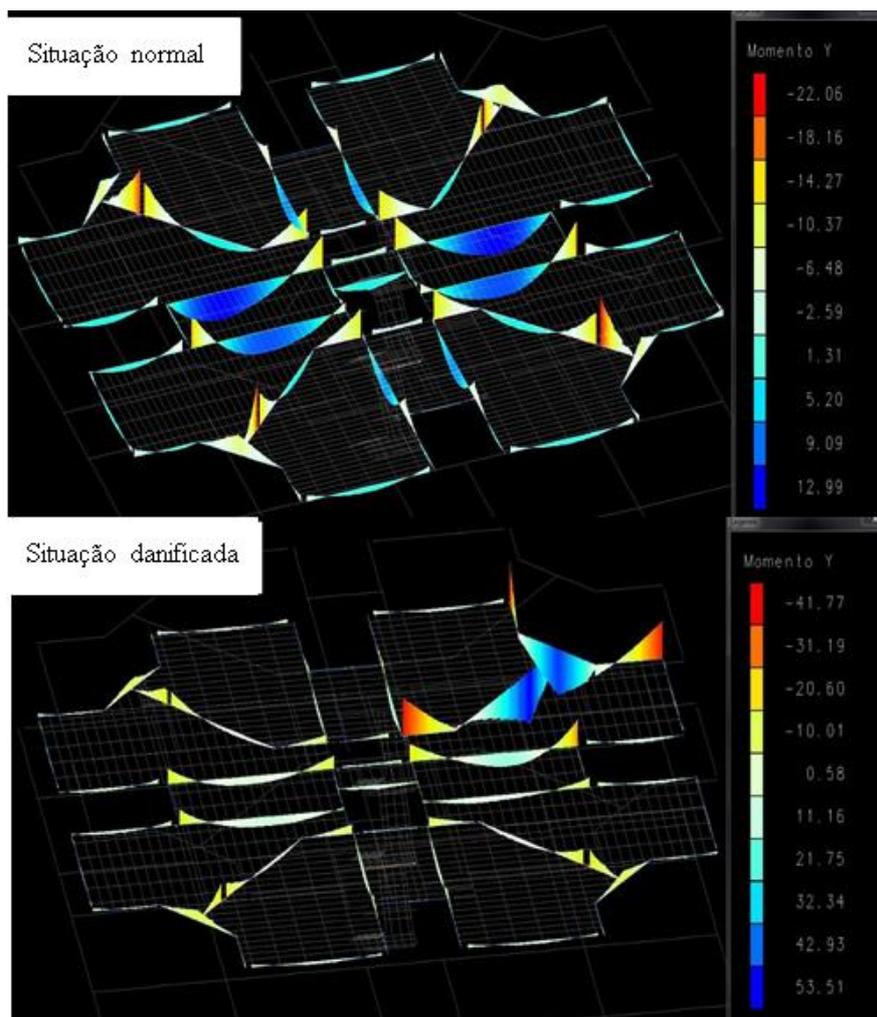


Figura 4 – Momento fletor nas vigas do pavimento térreo

Logo, essas vigas são as responsáveis por transferir e redistribuir os carregamentos neste pavimento, fazendo com que outros pilares recebam essas solicitações que antes eram absorvidas pelo pilar P37.

A tabela 1 apresenta o comparativo das cargas normais entre os pilares existentes no pavimento em que foi retirado o elemento estrutural. Os pilares que apresentaram acréscimo superior a 10% nas cargas normais, que estão grifados, foram os responsáveis por absorver as solicitações do P37.

Tabela 1 – Comparativo de cargas normais

Pilar	Situação Danificada (tf)	Situação Normal (tf)	%	Pilar	Situação Danificada (tf)	Situação Normal (tf)	%
P8	63,5	59,4	106,90	P27	200,6	201,8	99,41
P9	47,5	54,2	87,64	P28	208,5	190,5	109,45
P10	50,3	55,7	90,31	P29	55	56,4	97,52
P11	61,8	58,8	105,10	P30	120,6	123,8	97,42
P13	182,9	167,5	109,19	P31	113,1	122,4	92,40
P14	173	162,5	106,46	P32	59,3	56,6	104,77
P15	62,8	60,4	103,97	P33	128,5	153,6	83,66
P16	251,3	233,8	107,49	P34	228,5	160,5	142,37
P17	251,9	235,2	107,10	P35	61,1	59,6	102,52
P18	64,9	61,3	105,87	P36	254,3	242	105,08
P19	200,3	196,8	101,78	P37		245,3	0,00
P20	204,1	198,7	102,72	P38	136,6	59,7	228,81
P21	57	56,1	101,60	P39	185,3	174,9	105,95
P22	193,9	195,8	99,03	P40	185,6	169,2	109,69
P23	176,6	205,9	85,77	P42	59	58,2	101,37
P24	53,5	54,8	97,63	P43	47,3	53,1	89,08
P25	87,4	101,1	86,45	P44	55,7	58,1	95,87
P26	73,2	98,6	74,24	P45	145,4	62,5	232,64
				Σ	4500,3	4504,8	99,90

Uma vez que os pavimentos-tipo possuem uma configuração estrutural, de certa forma, com dupla simetria, a edificação é composta por quatro quadrantes semelhantes. Admite-se que a redistribuição de esforços na “situação danificada” será realizada pelas vigas V415, V430 e V431 e pelos pilares P34, P38 e P45. A figura 5 representa em forma gráfica esses elementos danificados, sendo os elementos em verde as vigas citadas e em vermelho tem-se os pilares citados.

Visando dar prosseguimento ao trabalho, estudou-se a hipótese fictícia de que as armaduras detalhadas nas vigas supracitadas tivessem sido transpassadas de forma correta a fim de garantir a ductilidade e continuidade da estrutura. Adotou-se, ao longo do comprimento, a maior área de aço das armaduras longitudinais superiores e inferiores do detalhamento original.

Considerando isso buscou-se identificar qual o valor de RDC para estes elementos. A estrutura analisada foi classificada como estrutura típica pois se trata de um pórtico, que

apesar de possuir vigas em balanço, ainda está dentro de um projeto sem significativas peculiaridades. Dessa forma o limite para que a estrutura seja considerada vulnerável ao colapso progressivo é 2,0.

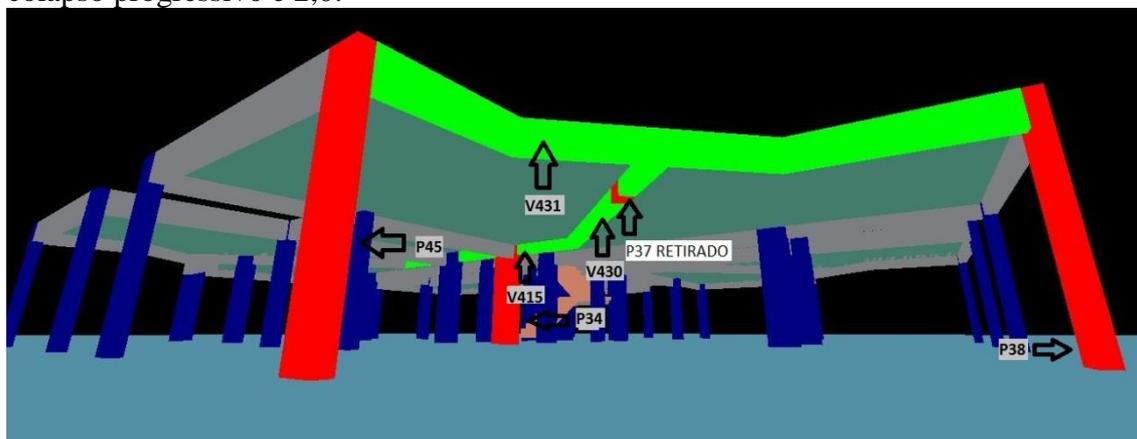


Figura 5 – Vigas e pilares sobrecarregados na situação danificada

Na tabela 2 são apresentados os valores dos esforços solicitantes e resistentes de cálculo para as vigas em estudo, bem como o valor de RDC para cada uma delas. Foram omitidos valores de força cortante pois não demonstraram valores de RDC relevantes. Sabe-se que os momentos resistentes de cálculo são dimensionados através das armaduras geradas na situação normal de projeto, ou seja, sem a perda do P37. Já os esforços atuantes, são aqueles ocasionados após a perda desse elemento, situação danificada.

Tabela 2 – Valores de RDC para as vigas mais afetadas

Pav.	Viga	Momento fletor negativo			Momento fletor positivo		
		Msd (tf.m)	Mrd (tf.m)	RDC	Msd (tf.m)	Mrd (tf.m)	RDC
Térreo	V415	65,22	31,16	2,09	12,30	12,73	0,97
	V430	2,90	34,78	0,08	117,10	11,05	10,60
	V431	34,50	17,56	1,96	42,70	5,49	7,78
5 pavimentos tipo	V515	26,90	20,23	1,33	5,00	11,11	0,45
	V530	2,00	29,60	0,07	28,70	8,45	3,40
	V531	31,30	17,56	1,78	15,40	5,49	2,81
	V615	26,73	20,23	1,32	3,90	5,49	0,71
6º Pavimento	V630	2,00	29,60	0,07	27,20	8,45	3,22
	V631	31,50	17,56	1,79	15,20	5,49	2,77
	V715	43,17	51,53	0,84	0,00	36,95	0,00
7º Pavimento	V730	2,00	7,26	0,28	28,30	43,06	0,66
	V731	21,20	36,95	0,57	10,00	17,56	0,57

Analisando os dados da tabela 2, verifica-se que, apesar de se estender as armaduras longitudinais nos apoios, gerando continuidade, a estrutura em estudo apresenta grande potencial ao colapso progressivo. Isso fica evidente, principalmente, com os dados das vigas V430 e V431, que tiveram seu momento atuante invertido de forma significativa,

fincando com valores de RDC altíssimos, muito em virtude desse pavimento ter se tornado uma espécie de pavimento de transição.

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo trazer uma contribuição ao estudo do colapso progressivo fazendo a análise da vulnerabilidade de um edifício residencial em concreto armado dimensionado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). A análise do edifício foi feita com o *software* TQS versão 19, sendo, primeiramente feita a modelagem e o dimensionamento com todos os elementos estruturais e em seguida retirou-se um pilar da fachada do térreo (P37).

A abordagem pelo MCAC visa verificar a redistribuição dos carregamentos entre os elementos estruturais remanescentes. A retirada do pilar fez com que as cargas se distribuíssem, principalmente, para as vigas e pilares nas proximidades do pilar danificado. O diagrama de momento fletor das vigas V415, V430 e V431 além de sofrer inversão, apresentou pontos em que o valor do momento dobrou. Os pilares P34, P38 e P45 foram os que tiveram maior aumento na força axial, enquanto os demais tiveram aumentos menores que 10%. O pilar P45, que foi o mais afetado, teve sua carga aumentada em 132%.

Analisando valores de RDC para as vigas, acredita-se que a ruptura do pilar P37 desencadearia o colapso progressivo, levando a uma ruptura parcial da estrutura abrangendo as vigas e pilares no seu entorno. A justificativa para isso é a falta de redundância no projeto estrutural, pois o transpasse de armaduras, buscando a continuidade e ductilidade, não é suficiente para conter o processo de ruptura em cadeia. De forma que a perda de um elemento sobrecarrega poucos elementos, o que gera um valor de solicitação que extrapola, e muito, a resistência dos mesmos.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estrutura de Edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. NBR 6123: Cargas devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003, revisão 2004.
- _____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.
- General Services Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for New Federal Buildings and layout modernization projects. US, 2003.
- HORNOS, F.; TEIXEIRA, H. N.; DELBONE, R. B. Colapso Progressivo em Estruturas de Concreto Armado. Trabalho de conclusão de curso (Graduado em Engenharia Civil), Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2015.
- LARANJEIRAS, A. C. R. Colapso Progressivo dos Edifícios – Breve introdução. TQS News, São Paulo, v. 33, n. 8, p.36-47, Agosto 2011.
- LIM, J. Progressive Collapse Analyses of Steel Framed Moment Resisting Structures. Tese (doutorado) Civil Engineering. Department of Structures, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 2004.
- FELIPE, T. R. C. Novo método para avaliação do risco de colapso progressivo em edifício de alvenaria estrutural. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.