

Estudo Comparativo do Colapso Progressivo em uma Estrutura de Concreto Armado com Lajes Nervuradas

Mariana Nunes Souza¹, Túlio Cezar B. de Melo²

¹ Universidade Veiga de Almeida / Graduada de Engenharia Civil / maari-soouza@hotmail.com

² Universidade Veiga de Almeida e Universidade Federal Fluminense / Prof M. Sc./
tuliocesar.bm@gmail.com

Resumo

O colapso progressivo consiste na propagação de um dano inicial de maneira desproporcional. A NBR-6118 (2014) não aborda de maneira detalhada este mecanismo, sendo necessário recorrer a códigos internacionais. O estudo acerca do colapso progressivo é relevante, uma vez que seus efeitos podem acarretar na ruína total ou parcial da edificação, podendo comprometer a vida dos usuários e causar um relevante prejuízo financeiro. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre as metodologias de prevenção do colapso progressivo, de acordo com o comportamento de uma edificação em concreto armado, utilizando os critérios das normas GSA (2013), NISTIR (2007) e ASCE (2005). A pesquisa foi executada numa edificação de 10 pavimentos aporticada, em laje nervurada, e modelada em elementos finitos, com o auxílio do programa SAP2000. As metodologias de prevenção utilizadas foram o método indireto e o método dos caminhos alternativos de carga, uma vez que ambos são os mais sugeridos pelas referências normativas internacionais analisadas. Além disso, foi realizado um estudo comparativo acerca da eficiência de cada método aplicado à edificação em estudo. Com essa avaliação os resultados obtidos foram satisfatórios, já que proporcionaram a sobrevivência da estrutura e a segurança dos ocupantes. O método dos caminhos alternativos de carga foi o mais indicado para o edifício, pois foi capaz de analisar o comportamento da estrutura de maneira global após o colapso local de determinados elementos estruturais. Isto ocorreu porque este método redimensionou os elementos-chave, obtidos após uma análise inicial, a resistirem aos esforços solicitantes.

Palavras-chave

Colapso Progressivo; Concreto Armado; Laje Nervurada; Método dos Caminhos Alternativos de Carga.

Introdução

O colapso progressivo segundo o ASCE 7-05 (2005) é definido pelo processo o qual há a propagação de um dano inicial local e que acarretará na ruína de toda a ou parte considerável dela. Essa falha pode ser ocasionada por uma ação excepcional como uma explosão, uma ação sísmica, uma sobrecarga ou até mesmo devido à má execução da construção. Erros de projeto e a ausência de manutenção também podem desencadear o processo de colapso.

O colapso progressivo começou a ser estudado após o caso do edifício Ronan Point, que em 1968, no Reino Unido, sofreu uma explosão de gás no 18º andar, isso resultou no

colapso da estrutura, uma vez que afetou os andares superiores e inferiores. No Brasil, o notório caso do edifício Palace II, no Rio de Janeiro, tornou-se um exemplo de colapso progressivo, já que, devido à falência de dois pilares, associada a erros na execução do projeto e ao uso de materiais de baixa qualidade, houve seu completo colapso deixando dezenas de mortes.

No tocante às normas de dimensionamento, a NBR-6118 (2014) não dá detalhes em relação as medidas preventivas do colapso progressivo, somente há uma recomendação sobre a utilização de armaduras, não havendo também uma explicação da importância ou do porquê de evitá-lo. Porém isso não ocorre nas normas estrangeiras GSA (2013), NISTIR (2007) e ASCE (2005). Elas definem que há um ganho de sobrevivência da estrutura, uma vez que a mesma poderá ser utilizada após o colapso e ainda há vidas que são salvas, uma vez que muitos casos envolvem ataques terroristas ou terremotos.

A partir disso, o objetivo desse artigo competiu em realizar um estudo comparativo de um edifício de 10 andares que foi projetado para resistir ao colapso progressivo. O mesmo foi dimensionado em concreto armado com lajes nervuradas. Após a verificação segundo a NBR-6118 (2014) realizou-se uma verificação de acordo com o método indireto e outra de acordo com o método dos caminhos alternativos de carga, ambos segundo as normas estrangeiras já citadas. O *software* utilizado foi o SAP2000, com o intuito de modelar e analisar a estrutura citada.

O edifício foi modelado no programa de elementos finitos SAP2000, no qual foram utilizados elementos do tipo *frame* para dimensionar os pilares, as vigas e as lajes nervuradas. A laje nervurada foi modelada com vigas de seção T. Foi utilizado o concreto com resistência de 40 MPa e barra de aço CA-50, a carga adicionada foi de 11,37 KN/m, que corresponde às cargas permanentes e às sobrecargas do projeto.

A estrutura foi analisada de acordo com a sua geometria. Retiraram-se os pilares P1 e P5, em seguida a edificação foi reanalisada com uma avaliação da distribuição de carga nos pilares restantes e nas vigas de seção T, que passam pelo pilar P5. Os pilares foram avaliados quanto a carga axial e ao momento e as vigas foram avaliadas quanto ao cisalhamento e ao momento.

Colapso progressivo

Conforme LARANJEIRAS (2011) quando há a perda de um elemento estrutural há um aumento dos esforços e das deformações. Com a finalidade de evitar que essa nova redistribuição de esforços horizontais e verticais acarrete o colapso progressivo há a necessidade de redundância, continuidade, ductilidade, robustez e integridade estrutural do elemento estrutural. Existem dois métodos para projetar estruturas contra o colapso progressivo: o método indireto e o método direto.

O método indireto consiste em uma aproximação simplificada, que fornece a estrutura um nível mínimo de conectividade entre os componentes estruturais, ou seja, são acrescentados itens que aumentam a robustez e a integridade estrutural. De acordo com BITARELLO (2013) a resistência estrutural conseguida é devida à disposição dos pilares, à escolha do sistema estrutural, ao dimensionamento das peças e ao detalhamento das ligações. Ele é aconselhável para edifícios mais simples e também é considerado como um nível primário para a proteção contra o colapso progressivo BAÍA (2014).

No método direto a resistência ao colapso progressivo é obtida através do aumento da resistência de elemento-chave a uma específica ação excepcional (método da resistência localizada específica) ou através de um projeto para que a estrutura possa transferir as cargas em torno de um determinado local de ruptura (método dos caminhos alternativos de carga).

Considerações normativas

A norma ASCE 7-05 prevê que as edificações concebidas contra o colapso progressivo devem ser projetadas de acordo com tal norma caso apresentem um risco para eventos extraordinários de 10^{-6} a 10^{-4} por ano ou superior. E então após a verificação de risco, serão projetadas com um *layout* que reduza os vãos ao longo das seções das paredes transversais.

O ASCE 7-05 ainda aborda que o método dos caminhos alternativos de carga deve permitir a falha local, promovendo a redistribuição dos esforços. Diz que se deve realizar o reforço das lajes para possíveis ações catenárias e mudanças na direção do vão, além disso deve fornecer carga nas partições interiores e considerar a ação das vigas nas paredes. Já sobre o método indireto ressalta-se a promoção do fornecimento de níveis mínimos de força, continuidade e ductilidade, isso é conseguido amarrando elementos principais e fornecendo ancoragem nas paredes, também considera a utilização de um sistema estrutural redundante, dúctil e uma construção compartimentada.

A norma GSA relata que o colapso progressivo é caracterizado se a propagação horizontal comprometer o compartimento estrutural associado ao membro removido e a propagação vertical foi de 170 m² do piso diretamente acima de um pilar externo removido ou 330 m² do piso diretamente acima de um pilar interno removido.

Este código também aborda que o método dos caminhos alternativos de carga deve ser feito com a remoção de um pilar, de um compartimento estrutural ou de 9 m de parede. Para a aplicação de uma análise linear, deve-se limitar a Relação Demanda-Capacidade (DCR) para 2 (construção típica) ou 1,5 (construção atípica). Sobre o método indireto ele aborda que deve ser usado elementos laterais e verticais redundantes e detalhados para continuidade e ductilidade, além de que deve ser projetado contra inversão de carga e falha de cisalhamento.

A NBR 6118 (2014) na seção 19.5.4 que é intitulada de Colapso Progressivo descreve que a fim de garantir ductilidade local e a proteção contra o colapso progressivo, a armadura de flexão inferior em lajes lisas deve estar ancorada além do contorno estipulado pela norma.

Estrutura analisada

A estrutura analisada nesse artigo é composta por 10 pavimentos de dimensões 13,29m e 22,63m, possui 32,40 m de altura e pés-direitos de 3,24m. O concreto utilizado foi o C40 e o aço CA-50. As vigas do perímetro da edificação são de 20cmx80cm e as vigas internas são vigas de seção T com dimensões de 120cmx35cm, na maior direção, e 70cmx35cm, na menor direção. A laje nervurada é composta com vigas de seção T com dimensões de 26cmx54cm, e espaçadas 0,76 cm uma da outra. Os pilares do entorno são de 120cmx27cm e o pilar interno de 120cmx45cm. Além do peso próprio, as cargas

atuantes na estrutura são uma sobrecarga na laje de $4,5\text{kN/m}^2$ e uma carga permanente de $1,0\text{kN/m}^2$. Já em relação a alvenaria foi considerada uma carga permanente de $2,3\text{kN/m}^2$.

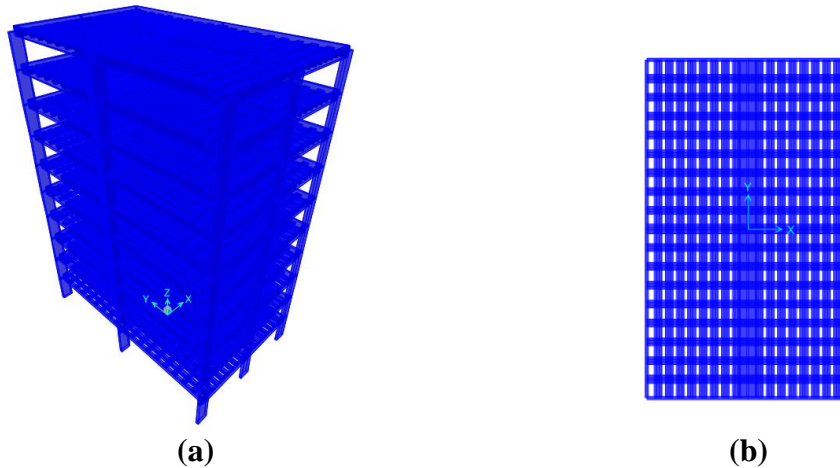


Figura 1: Estrutura 3D modelada no SAP2000 (a) e pavimento modelado no SAP2000 (b).

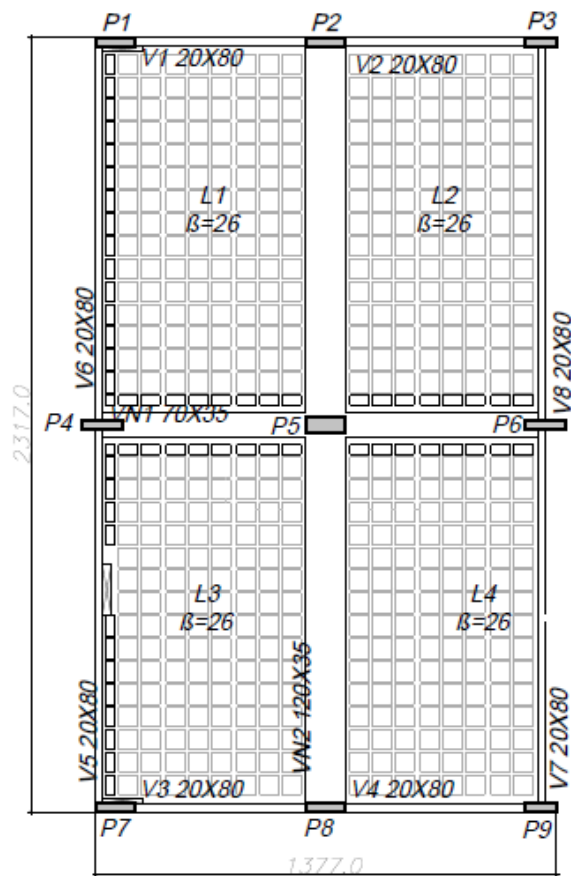


Figura 2: Planta de fôrmas do edifício.

Resultados

Após a retirada do P1 obteve-se um aumento na carga axial nos pilares 2 e 4, isso ocorreu devido a redistribuição de esforços. Nos pilares P2 e P4, que são os pilares adjacentes ao P1, esse aumento foi significativo, uma vez que o P2 teve um acréscimo que corresponde a quase 50% da carga axial inicial. Os demais pilares sofreram um pequeno decréscimo da carga. Isso pode ser verificado nas Tabelas 1, 2 e 3.

Já com a retirada do P5 houve mudanças significativas nas cargas axiais dos pilares P4 e P6 da estrutura, e também houve uma mudança significativa nas vigas que estão apoiadas sobre o mesmo. Na VN1 houve uma inversão de esforços, que consiste na inversão dos sinais, tanto com relação ao cisalhamento, quanto com relação ao momento. Já na viga VN2 não houve mudanças significativas, isso se deve ao fato de que as vigas nessa direção estão apoiadas sobre as vigas na direção do VN1, o que acarreta que essa sofra mais com a mudança de esforços.

O método indireto foi aplicado ao caso do P1 com o aumento das dimensões das vigas V1 e V6 para 35cmx80cm, para o primeiro pavimento. Com isso percebeu-se que a redistribuição de esforços altera significativamente as solicitações a que a estrutura está sujeita, uma vez que os momentos aumentaram de forma drástica da condição de equilíbrio para a condição de dano.

O método dos caminhos alternativos de cargas adotou que os pilares do primeiro pavimento seriam de dimensões 90cmx35cm e com um acréscimo de quatro barras de aço, de mesmo diâmetro e comprimento na maior direção e o decréscimo de um ferro na menor direção. As vigas V1 e V6, também do primeiro pavimento seriam de dimensões 35cmx50cm, houve também um acréscimo de duas barras de ferro na largura da viga. Com esse método averiguou-se que os pilares P2 e P4, pilares que mais sofreram com a perda do P1, tiveram nos seus momentos uma diminuição significativa, enquanto os outros valores se alteraram tanto mais quanto para menos, porém de maneira não tão expressiva quanto o P2 e P4.

No caso do método indireto com a retirada do P5, houve um aumento da base da viga que sofreu com a inversão de esforços, que foi a viga VN1, a viga passou a ter 90cmx35cm. Apesar das mudanças ainda manteve-se a inversão de esforços na VN1, conforme as Tabelas 4 e 5.

Já o método dos caminhos de cargas alternativos alterou o tipo de viga seção T para vigas normais 40cmx20cm, nele também manteve-se a inversão de esforços quanto ao cisalhamento, porém o momento conseguido se assemelha ao caso sem a perda do P1, isso pode ser visto nas Tabela 4 e 5.

Tabela 1: Antes da retirada dos pilares – resultados obtidos no SAP2000

PILAR	Força axial (kN) antes da retirada dos pilares	Força axial (kN) com a retirada do P1	Força axial (kN) com a retirada do P5
P1	-3361,53	-	-3498,13
P2	-5118,28	-9507,99	-5948,54

P3	-3361,53	-1822,43	-3498,13
P4	-5658,99	-6693,23	-9536,04
P5	-10058,99	-10085,34	-
P6	-5658,99	-5487,21	-9536,04
P7	-3361,53	-3235,36	-3498,13
P8	-5118,28	-5056,93	-5948,54
P9	-3361,53	-3112,35	-3498,13

Tabela 2: Momentos

PILAR	Momento (kNm) sem a retirada do pilar		Momento (kNm) com a retirada do P1	
	Base	Topo	Base	Topo
P1	36,85	-72,97	-	-
P2	79,68	-159,02	-552,58	-1337,38
P3	36,85	-72,97	-887,19	-676,19
P4	-71,00	157,18	-454,21	-101,46
P5	0,00	0,00	-641,77	-424,02
P6	71,00	-157,18	-313,30	-413,02
P7	-36,85	72,97	-90,64	74,33
P8	-79,68	159,02	-52,55	-10,18
P9	-36,85	72,97	-6,35	-110,68

Tabela 3: Aplicação dos métodos com a retirada do P1- resultados obtidos no SAP2000

PILAR	Método Indireto Momentos (kNm)		Método Direto Momentos (kNm)	
	Base	Topo	Base	Topo
P2	-480,96	1334,90	-750,94	-167,74
P3	-832,54	-568,56	-733,08	-748,21
P4	-431,08	-96,34	-55,51	-307,08
P5	-614,03	-394,71	-483,60	-327,76
P6	-299,38	-393,26	-418,57	-430,45
P7	-94,07	87,51	70,64	-120,27
P8	-56,42	-0,28	-11,80	-79,94
P9	-7,36	-115,30	-116,27	-29,76

Tabela 4: Vigas - resultados obtidos no SAP2000

VIGA	Antes da retirada do pilar P5				Depois da retirada do pilar P5			
	Cisalhamento(kN)		Momento(kNm)		Cisalhamento(kN)		Momento(kNm)	
VN1	-253,36	254,03	-319,4	161,14	-664,92	-157,52	1736,4	1101,02
VN2	-192,68	192,68	-308,08	211,99	-290,22	290,22	932,08	343,83

Tabela 5: Aplicação dos métodos com a retirada do P5 - resultados obtidos no SAP2000

VIGA	Método Indireto				Método Direto			
	Cisalhamento(kN)		Momento(kNm)		Cisalhamento(kN)		Momento(kNm)	
VN1	-667,37	667,37	-1799,3	1221,26	-616,83	616,83	-1658,70	1094,97
VN2	-253,45	253,45	-833,91	313,28	-230,85	230,85	-803,21	289,16

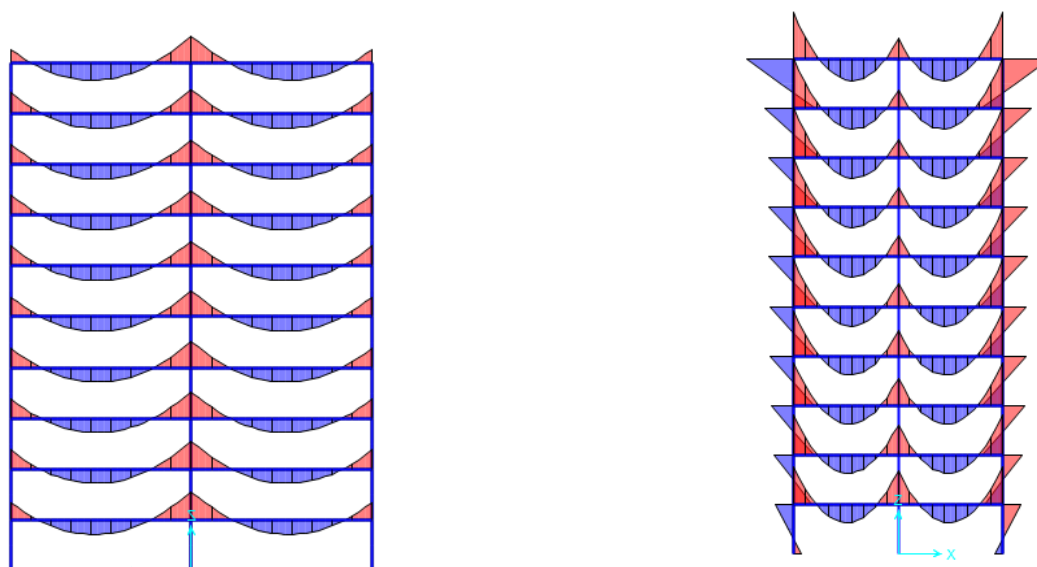


Figura 3: Diagrama de momentos do edifício antes da retirada do P1

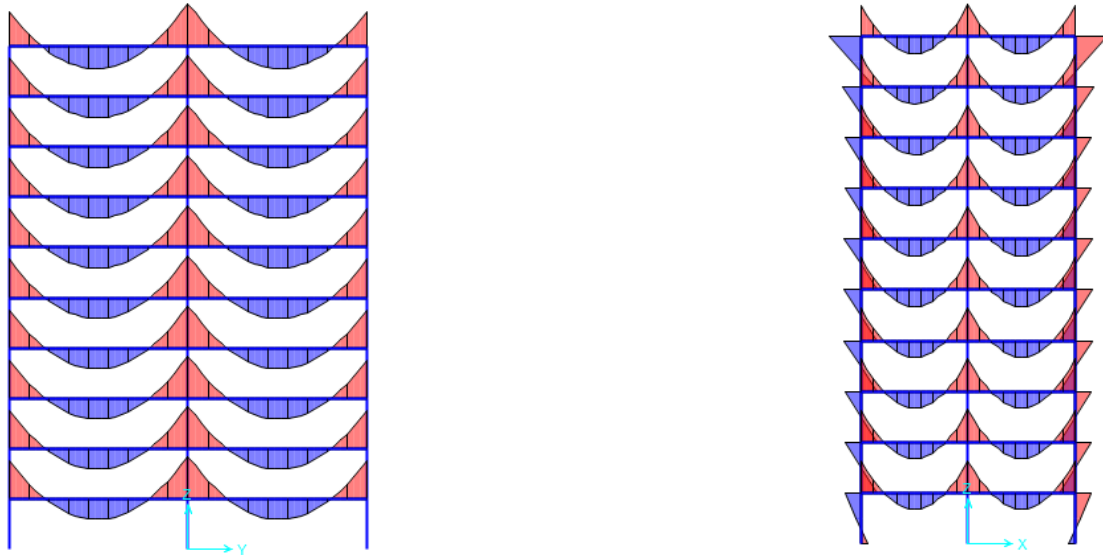


Figura 4: Diagrama de momentos do edifício antes da retirada do P5

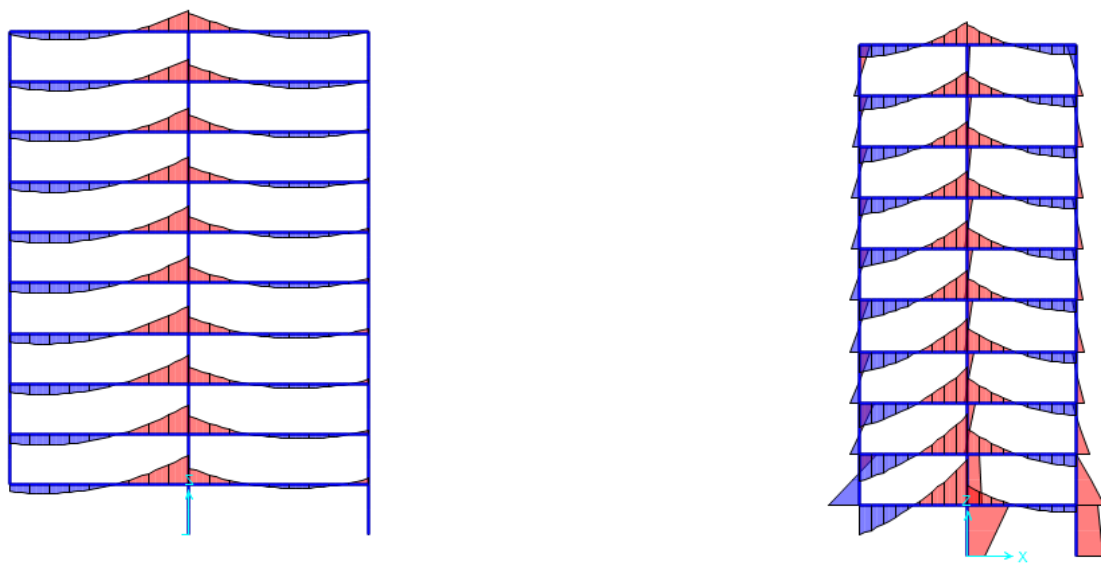


Figura 5: Diagrama de momentos do edifício com a retirada do P1

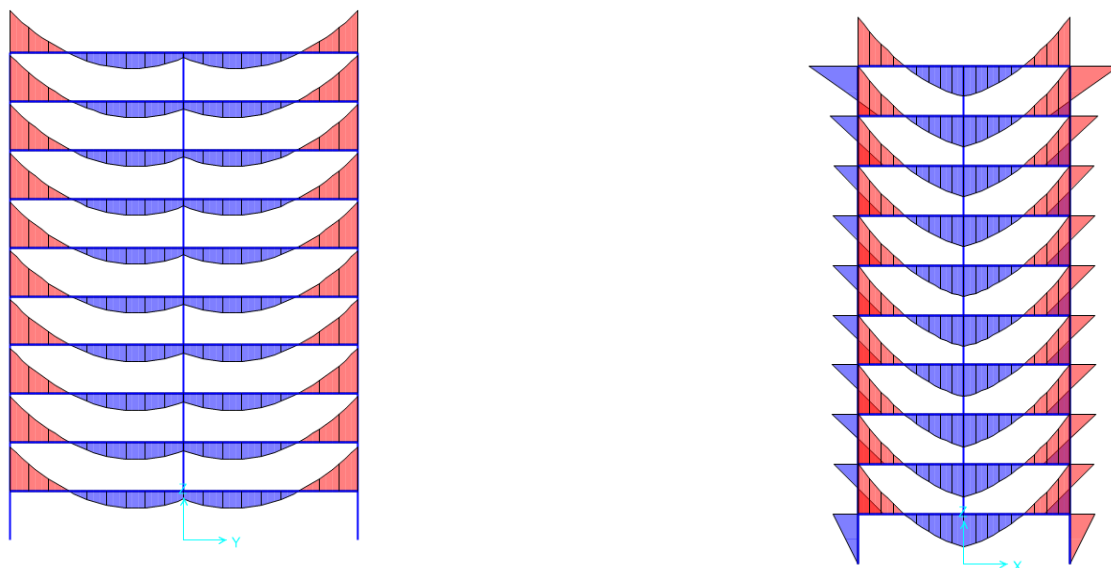


Figura 6: Diagrama de momentos do edifício com a retirada do P5

Conclusão

Foram realizadas análises a fim de verificar os efeitos que o colapso progressivo causa na estrutura estudada. Foram usados dois métodos de prevenção do colapso progressivo, que foram o método indireto e o método dos caminhos alternativos de carga.

Constatou-se que ao sofrer a perda de um pilar externo a estrutura fica muito mais exposta do que com a perda de um pilar intermediário, além disso o método dos caminhos alternativos de carga se mostrou mais eficaz para a prevenção do colapso do que o método indireto. Isso se deve ao fato de que ele combateu o aumento significativo do momento nos pilares P2 e P4 gerado pela retirada do P1.

Nos casos estudados observou-se a inversão de esforços que é citada nas normas ASCE (2005), NISTIR(2007) E GSA (2013). As mesmas relatam que prevenir esse tipo de ocorrência é primordial para que a estrutura não sofra com o colapso progressivo.

Referências

- ABNT, NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 2007.
- ASCE Standard ASCE/SEI 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2005.
- BAÍA, R.O.D. Análise de uma edificação considerando o colapso progressivo. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014 63 f.
- BITARELLO, G. Colapso progressivo de estruturas de concreto pré-moldado. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. 2013 103 f.
- ELLINGWOOD, B. R.; SMILOWITZ, R.; DUSENBERRY, D. O. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. National Institute of Standards and Technology, U.S.: NISTIR 7396, 2007.
- GSA. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. General Services Administration. 2013.



- LARANJEIRAS, A.C.R. Colapso progressivo dos edifícios - breve introdução. TQSNews, *Ano XV*, nº 33, agosto de 2011.
- MELO, C. D. R. Estudo do colapso progressivo de pórticos planos de concreto via análise não linear. Fortaleza, 2015. 102p. Tese mestrado – Universidade Federal do Ceará, 2015.
- SAP 2000 – Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structure, 14.1.0, Computers and Structures, Inc., 2009.