

Avaliação de estruturas de concreto pré-moldado considerando o colapso progressivo

Nayara Zolet¹, Henriette Justina Manfredini Baroni²

¹ Universidade de Caxias do Sul / Departamento de Estruturas / nay_zolet@hotmail.com

² Universidade de Caxias do Sul / Departamento de Estruturas / hmbaroni@ucs.br

Resumo

O uso de estruturas em concreto pré-moldado tem sido cada vez mais recorrente devido a sua praticidade e rapidez de montagem, bem como pelo controle da qualidade durante a fabricação da estrutura. Ao mesmo tempo, o uso de *softwares* e recursos cada vez mais precisos para o dimensionamento de estruturas permite que sejam criados componentes estruturais cada vez mais esbeltos, despertando o interesse de se verificar a resistência destas estruturas e sua susceptibilidade ao colapso total ou parcial. O colapso progressivo trata-se da ruptura, total ou parcial, de uma estrutura em decorrência da propagação de um dano localizado. O objetivo principal deste estudo foi verificar o comportamento de uma estrutura pré-moldada, dimensionada de acordo com as Normas Brasileiras, após a remoção de elementos verticais de sustentação. Foi utilizado o Método dos Caminhos Alternativos de Carga, de acordo com a norma desenvolvida pela entidade norte americana *General Services Administration (GSA)*, onde removeu-se virtualmente um pilar de canto, um pilar lateral e um pilar central, ambos de maneira individual. A avaliação da ocorrência do colapso progressivo se deu através da relação demanda-capacidade (DCR), proposta pelo método anteriormente mencionado, e pela análise dos pórticos de deformações dispostos no *software* de dimensionamento de estruturas utilizado. Posteriormente, algumas ligações viga-pilar rotuladas foram substituídas por ligações semirrígidas, de maneira esquemática para cada um dos casos estudados. O estudo mostra que devido à fragilidade das ligações deste tipo de estrutura, mesmo após o enrijecimento das mesmas, o colapso progressivo não pode ser evitado.

Palavras-chave

estruturas; colapso progressivo; concreto pré-moldado.

1. Introdução

A evolução de técnicas construtivas vem sendo estudada para que se possa suprir as necessidades da construção civil buscando métodos econômicos, duráveis e estruturalmente seguros, atendendo a demanda da sociedade contemporânea. O uso de estruturas de concreto pré-moldado tem como objetivo dinamizar o processo de montagem da obra, pela industrialização de elementos construtivos, sem perder de vista as demandas do projeto arquitetônico e a qualidade/durabilidade da construção.

Colapso progressivo é um tema extremamente importante para todos os setores envolvidos na construção civil, principalmente para os projetistas de estruturas. Os procedimentos de avaliação prévia requerem metodologia adequada. Embora seja um fenômeno do conhecimento do corpo técnico brasileiro, e com apontamentos em algumas

normas nacionais, ainda não está plenamente incorporado aos códigos de procedimentos de projeto de estruturas.

1.2 Colapso Progressivo

O colapso progressivo consiste da propagação de uma ruptura inicial que, de modo semelhante a uma reação em cadeia, leva o edifício à uma ruptura parcial ou total. Sua característica básica é a de que a ruptura final é muito maior do que a ruptura que deu início ao colapso progressivo, que também é chamado de “colapso desproporcional”. (LARANJEIRAS, 2011).

A grande evolução tecnológica de *softwares* de cálculo de estruturas e o maior controle tecnológico do concreto permitiram que houvesse uma grande evolução ao se dimensionar uma estrutura de concreto armado, tornando as edificações cada vez mais esbeltas. No entanto, as estruturas no Brasil são projetadas apenas para os carregamentos usuais e prescritos nas normas da ABNT, uma vez que o acontecimento do colapso progressivo possui baixa probabilidade de ocorrência, que em sua maioria se relaciona a falhas grosseiras de execução, carregamentos imprevistos, grandes explosões e até mesmo por erros de projeto e dimensionamento. Desta forma, ao invés de uma análise específica, se projetam elementos mais robustos, capazes de absorver impactos de uma causa não especificada.

A NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado (ABNT, 2017), apresenta apenas em suas generalidades para o dimensionamento, que “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo.”

Embora, historicamente, poucos casos de colapso progressivo levaram a danos maiores ou ao colapso total do edifício, é de grande importância que se evite a ruptura. Os cuidados de prevenção do colapso progressivo devem ser tomados desde o projeto da estrutura e o entendimento de estratégias para que um dano local não progrida até causar o colapso, o que é de suma importância ao projetista, embora essa prevenção envolva procedimentos distintos dos de prática corrente.

As características essenciais para que a estrutura seja capaz de resistir ao colapso progressivo, ou capaz de suportar um dano local por tempo suficiente para preservação de vidas, são as que atribuem ao sistema estrutural integridade e robustez, e são definidas por LARANJEIRAS (2011) como redundância, continuidade, ductilidade e resistência suficiente à ameaça de colapso progressivo.

1.3 Pré-moldados

O uso de estruturas de concreto pré-moldado consiste de uma industrialização de elementos construtivos para dinamizar o processo de montagem de uma obra, buscando sempre atender às demandas de um determinado projeto arquitetônico e visando a qualidade e durabilidade da construção.

Atualmente, as estruturas pré-moldadas podem ser semirrígidas, engastadas ou rotuladas. No ponto de vista estrutural, as estruturas isostáticas (rotuladas), tornam-se mais baratas, uma vez que as lajes são simplesmente apoiadas sobre as vigas e estas por sua vez se apoiam em mísulas de pilares.

A NBR 9062 (ABNT, 2017) cita em seu escopo que “o projeto das ligações deve ser feito após minucioso estudo das possíveis solicitações em serviço e também em fase de montagem”.

Diferentemente das estruturas em concreto armado monolíticas, as ligações existentes em estruturas de concreto pré-moldadas acabam por gerar concentração de esforços e tensões que limitam a transferência de cargas, portanto, sabe-se que quanto mais próxima a um engastamento, melhor é a distribuição dos esforços nas ligações.

As ligações viga-pilar podem ser rotuladas, onde não são considerados esforços de momento e a transmissão dos esforços se dá pelo cisalhamento do pino de posicionamento ou pelo atrito do neoprene ou do graute. Podem ser ainda semirrígidas, onde existe o traspasse de barras pelo pilar, aumentando a rigidez do sistema, sendo capaz de transmitir os momentos de engastamento, ou então podem ser utilizadas ligações engastadas que se distinguem pela existência de uma chapa de aço na parte inferior das vigas soldada em uma chapa de aço no apoio, formando o inserto. O tipo de ligação a ser adotado depende do tipo da construção, sendo que em construções verticais o uso de pré-moldados requer grande quantidade de ligações semirrígidas ou engastadas, tornando as construções inviáveis tecnicamente.

Conforme a NBR 9062 (ABNT, 2017), é necessário que as ligações possuam a mesma durabilidade que a estrutura, e, quando não for possível, deve-se prever em projeto a possibilidade de inspeção, reparo e troca dos componentes da mesma.

As ligações viga-laje devem, segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017) “impedir deflexões diferenciais devidas a cargas acidentais não uniformemente distribuídas nas juntas de elementos pré-moldados que formam pisos, forros e outras estruturas semelhantes.”.

As ligações entre lajes e mesas de viga T devem obrigatoriamente, segundo a NBR 9062 (ABNT, 2017), possuir uma ou mais das opções: juntas concretadas ou grauteadas, ligações soldadas, capeamento com armadura transversal, sendo que, quando adotado o capeamento de concreto, sua espessura mínima é de 5 cm.

Basicamente, as ligações de pilares com a fundação se dão por três maneiras: por meio de cálice, por meio de chapas de base ou por meio de bainhas sendo que, do ponto de vista da execução, as bainhas são semelhantes às chapas de base, sendo que a diferença é a que, basicamente, nas chapas de base são colocadas barras de aço rosqueáveis e nas bainhas a espera são barras de aço convencionais de fundação.

O engastamento dos pilares nas fundações deve fornecer a rigidez necessária para a estrutura, e essa solidarização é atingida, conforme FERREIRA (2003), através do preenchimento com graute ou concreto nos vazios existentes entre o pilar e as faces internas do cálice. No caso de ligações pilar-fundação parafusadas, são utilizadas chapas

de base ou cantoneiras, as quais são soldadas à armadura longitudinal do pilar, anteriormente à pré-moldagem, onde serão parafusadas nos chumbadores deixados nas bases das fundações.

2. Metodologia

A análise da estrutura considerando o colapso progressivo foi feita através de um estudo de caso, onde utilizou-se um projeto arquitetônico desenvolvido pelas autoras para fins didáticos. O dimensionamento foi feito com uso do *software* computacional Eberick V10 Basic (AltoQI, 2016) em conjunto com o módulo para estruturas pré-moldadas, que leva em conta as prescrições normativas da ABNT.

Após a realização do lançamento e processamento da estrutura, fez-se a retirada virtual de elementos verticais e análise do comportamento da estrutura após a perda abrupta dos mesmos. Foram utilizados dois parâmetros para a análise do dano causado pela perda dos pilares.

Um dos parâmetros foi o guia norte-americano GSA. Este guia foi criado no ano de 2003 e passou por uma revisão no ano de 2013. Em sua versão mais recente, como estudado por ROUHANI, LIN e GALAL (2015), a revisão do guia GSA publicada em 2013, define parâmetros de modelagem não-linear para cada tipo de componente, tais como vigas e pilares. Além disso, as combinações de carga para análises também foram atualizadas.

Sua metodologia trata, portanto, do Método dos Caminhos Alternativos de Carga (MCAC), que consiste da remoção teórica de um elemento vertical da estrutura (pilares) e a análise da redistribuição dos esforços em cada pavimento. Para esta avaliação, se utilizou o critério de aceitação do GSA do ano de 2003, pois conforme os estudos elaborados por ROUHANI, LIN e GALAL (2015) para a análise estática linear, os critérios do guia anteriores à revisão mostram-se mais conservadores, em virtude de uma quantidade menor de elementos ser aceita após a remoção do pilar.

A perda de um elemento no MCAC cria novos esforços nos elementos vulneráveis localizados na área afetada. Desta forma, faz-se necessário o cálculo da relação demanda-capacidade (DCR), que indica a magnitude desta vulnerabilidade bem como a distribuição da nova demanda atuante sobre os elementos, conforme a Equação 1.

$$DCR = Q_{UD}/Q_{CE} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Q_{UD} é o esforço solicitante de cálculo (demanda) no elemento estrutural (momento, força axial, cortante e esforços combinados);

Q_{CE} é o esforço resistente de cálculo (capacidade), esperada em serviço do elemento.



Os valores de DCR aceitáveis, de acordo com o guia, é de $DCR \leq 2,0$ para estruturas com configuração típica, como é o caso deste estudo.

Foram analisados os danos ocasionados com a remoção de três posições diferentes de pilares em relação à estrutura, portanto foram analisados os efeitos da retirada de um pilar central, um pilar de canto e um pilar de extremidade, sendo que os pilares externos são mais críticos para a redistribuição de cargas.

Para cada pilar removido, foi feita a análise de quais os esforços adjacentes ao dano inicial, análise da redistribuição dos esforços, para que, ao comparar as solicitações em atendimento ao ELU, fosse possível identificar se o edifício estaria vulnerável ao colapso progressivo, não sendo necessária a avaliação para o ELS uma vez que a estrutura a ser analisada estará próxima à situação de ruptura.

Portanto, a segunda análise se deu através dos pórticos de deslocamentos gerados no *software* de cálculo da estrutura.

A arquitetura criada pelas autoras para este estudo trata-se de um edifício comercial simples composto por três pavimentos. Conforme o recomendado pelo GSA para edifícios de menos de dez pavimentos, a estrutura analisada segue os critérios do método dos Caminhos Alternativos de Carga por procedimento linear estático.

A estrutura pré-moldada de concreto armado é composta por lajes alveolares sem protensão, vigas simplesmente apoiadas (ligações rotuladas), exceto pelas vigas do núcleo na direção X em que foram utilizados nós semirrígidos, e pilares contínuos ao longo de toda altura da edificação. O pré-dimensionamento foi feito a partir de tamanhos usuais de fabricantes de estruturas pré-moldadas.

3. Resultados

Utilizando o *software* Eberick V10 (AltoQI, 2016), desenvolveu-se o dimensionamento da estrutura íntegra, do Caso 1, utilizando-se, conforme supramencionado, a combinação para o Estado Limite Último. A partir deste dimensionamento, foi feita uma comparação de capacidade resistente das vigas e pilares frente a remoção abrupta de um elemento.

Uma vez removidos os elementos e analisadas as alterações provocadas na estrutura, é necessário que se busque uma forma para que o modelo estrutural permaneça íntegro. Sendo assim, foi proposta a alteração da vinculação nós adjacentes ao elemento removido para semirrígidos, avaliando-se os deslocamentos posteriores à mudança. Após, fez-se ainda uma simulação com uso de lajes engastadas em vigas para que fosse possível avaliar os deslocamentos. Esse engastamento é feito através da execução de uma capa de concreto moldado “in loco” além de uma armadura negativa ou de continuidade, que é feita após o posicionamento definitivo das lajes alveolares. Devido à limitação do *software* para o cálculo deste tipo de estrutura, a simulação se deu de forma aproximada utilizando lajes maciças engastadas, para que fosse possível comparar os deslocamentos da estrutura posteriores a essa alteração.

O fator de restrição utilizado para a substituição de nós rotulados para nós semirrígidos foi de 0,5 e os resultados bem como sua análise são demonstrados na sequência.

A remoção dos pilares foi feita seguindo as recomendações do GSA (2003), sendo o elemento removido apenas no pavimento de análise, neste caso o terceiro pavimento, considerando que as vigas adjacentes não seriam modificadas, exceto pelas cargas adjacentes geradas com a perda do pilar. A ausência dos pilares P10, P15 e P16 no terceiro pavimento podem ser observadas na figura 1.

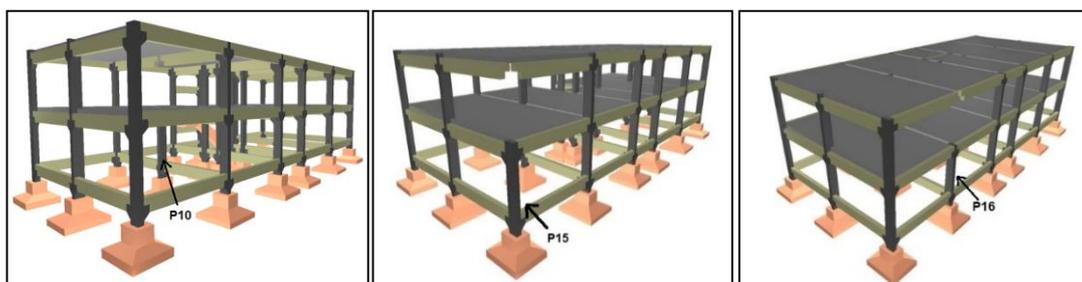


Figura 1 – Pórtico espacial após a remoção dos pilares P10, P15 e P16, no terceiro pavimento.

Após a remoção de cada um dos pilares, verificou-se uma deformação extrema, tornando-se, portanto, um sistema estrutural hipostático, não sendo possível obter o equilíbrio da estrutura. A figura 2 mostra as grandes deformações apresentadas nos pórticos espaciais após a remoção do pilar de canto (P15) e do pilar lateral (P16), uma vez que o processamento do pórtico espacial no *software* Eberick V10 Basic (AltoQI, 2016) para análise das deformações causadas pela remoção do pilar central não foi possível, devido à inconsistência da estrutura.

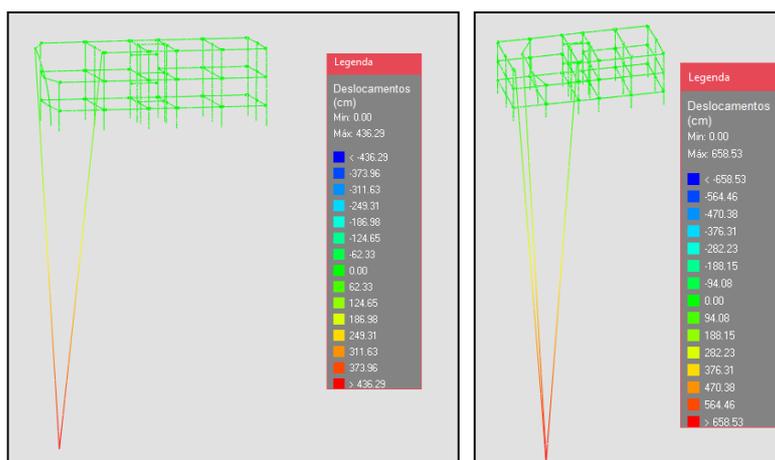


Figura 2 – Deslocamentos após a remoção dos pilares P15 e P16.

A relação demanda-capacidade é calculada para as vigas que perderam seu elemento de apoio em cada um dos casos. O DCR é obtido pelos momentos de demanda obtidos através do *software* Eberick V10 Basic (AltoQI, 2016) após a remoção do pilar. Seus valores bastante elevados, bem como os resultados do DCR para as vigas são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Relação demanda-capacidade em vigas para o pilar de canto.

Viga	Mu (kN.m)	M _{máx} (kN.m)	DCR	
V7	61,94	514,92	8,31	Não OK
V12	83,57	92,16	1,1	Ok

Tabela 2 – Relação demanda-capacidade em vigas para o pilar lateral.

Viga	Mu (kN.m)	M _{máx} (kN.m)	DCR	
V7	61,94	36,78	0,59	Ok
V8	61,94	789,51	12,75	Não OK

Os resultados de $DCR \geq 2$ mostram que a estrutura não resistiria, entrando em colapso progressivo. É importante ressaltar que os valores obtidos inferiores ao valor limítrofe acontecem pelo fato de que o *software* passa a considerar que as vigas V12, para o pilar de canto, e V7 e V14 para o pilar lateral, apoiam-se nas vigas V7 e V8, respectivamente, fazendo com que estas últimas assumam os carregamentos e esforços gerados pelas vigas em colapso, o que é fácil de ser observado dado o grande valor de momento fletor causado nas mesmas. Portanto, a estrutura deve sim ser redimensionada, sendo que no caso do elemento pré-moldado é proposta, como primeiro recurso de comparação, a alteração dos nós nas ligações viga-pilar de rótulas para ligações semirrígidas.

Outra análise se deu através do cálculo do DCR para os pilares, levando em consideração os esforços normais da carga gerada nos elementos próximos após a remoção dos pilares de cada um dos casos. As tabelas 3 e 4 mostram os valores dos esforços axiais bem como o valor do DCR.

Tabela 3 – Relação demanda-capacidade em pilares para o pilar de canto.

Pilar	Nd (kN)	Nu (kN)	DCR	
P9	169,37	1990,97	0,09	Ok
P15	294,25	1990,97	0,15	Ok

Tabela 4 – Relação demanda-capacidade nos pilares para o pilar lateral.

Pilar	Nd (kN)	Nu (kN)	DCR	
P10	210,08	1990,97	0,11	Ok
P15	122,82	1990,97	0,06	Ok
P17	358,98	1990,97	0,18	Ok

Pelos valores obtidos para a relação demanda-capacidade dos pilares, nota-se uma baixa carga de demanda se comparada com a capacidade calculada, mesmo após a remoção do dos pilares, o que acontece em função de ser uma estrutura de apenas três pavimentos.

Para que a ruína do edifício fosse evitada, analisou-se a estrutura substituindo-se as ligações das vigas adjacentes aos pilares P10, P15 e P16 para nós semirrígidos, conforme o mostrado na figura 3.

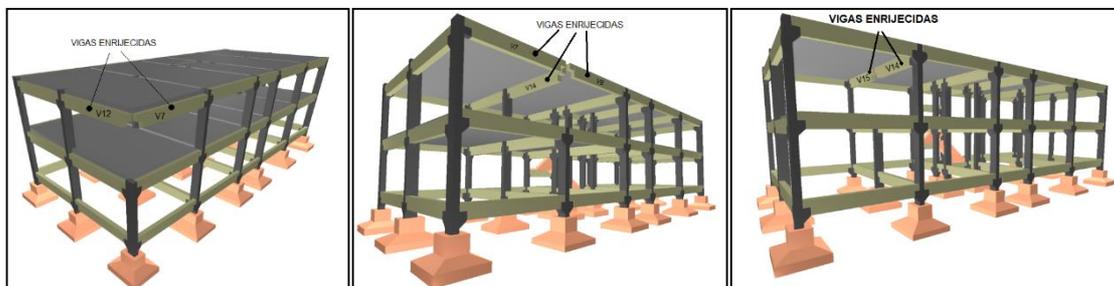


Figura 3 – Vigas do terceiro pavimento enrijecidas para cada um dos casos.

O enrijecimento destas vigas mostra uma grande redução das deformações da estrutura, conforme as figuras 4, 5 e 6.

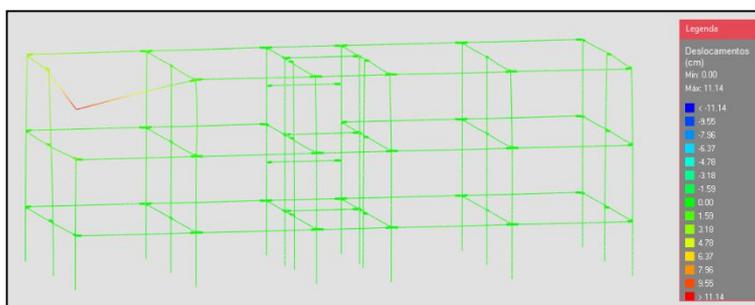


Figura 4 – Deslocamentos após o enrijecimento das vigas para o pilar de canto.

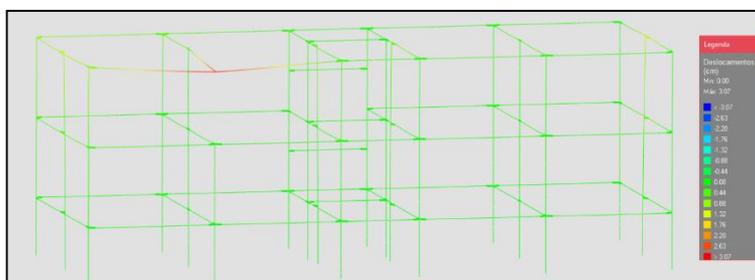


Figura 5 – Deslocamentos após o enrijecimento das vigas para o pilar de lateral.

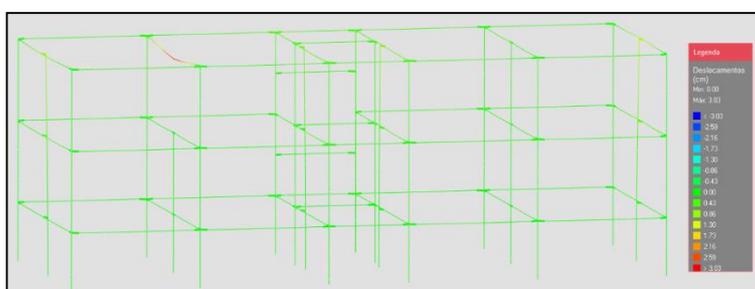


Figura 6 – Deslocamentos após o enrijecimento das vigas para o pilar de canto.

A partir deste modelo, foram recalculados os valores de DCR para as vigas adjacentes a cada pilar removido, levando-se em conta o se enrijecimento. Os resultados são apresentados nas tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 – DCR capacidade com vigas semirrígidas para o pilar de canto.

Viga	Mu (kN.m)	Mmáx (kN.m)	DCR	
V7	61,94	291,42	4,70	Não OK
V12	83,57	212,09	2,54	Não OK

Tabela 6 – DCR com vigas semirrígidas para o pilar lateral.

Viga	Mu (kN.m)	Mmáx (kN.m)	DCR	
V7	61,94	200,18	3,23	Não OK
V8	61,94	204,00	3,29	Não OK
V14	114,74	97,23	0,85	Ok

Tabela 7 – DCR com vigas semirrígidas para o pilar central.

Viga	Mu (kN.m)	Mmáx (kN.m)	DCR	
V14	114,74	244,08	2,13	Não ok
V15	117,63	246,18	2,09	Não ok

Os valores de DCR se aproximaram bastante do valor limítrofe, sendo, no entanto, ainda superiores, mostrando que o enrijecimento das vigas que perderam seu elemento de apoio não é suficiente para evitar o colapso progressivo da estrutura.

Ao simular o engastamento e continuidade das lajes do terceiro pavimento, novamente a análise do caso onde há remoção do pilar central não foi possível pelo fato do *software* considerar a estrutura inconsistente. Os deslocamentos do pórtico espacial dos casos onde houve a remoção do pilar de canto e pilar lateral são mostradas nas figuras 7 e 8.

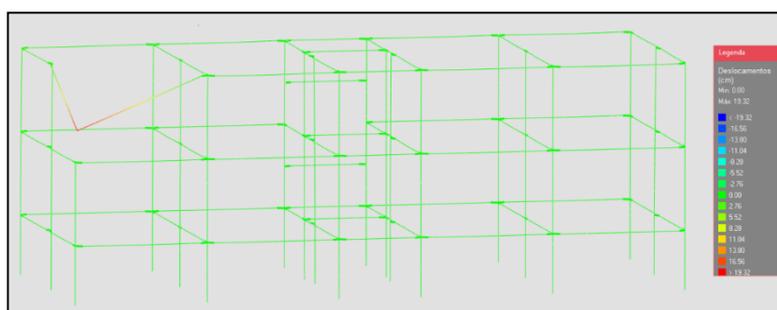


Figura 7 – Deslocamentos com lajes engastadas para o pilar de canto.

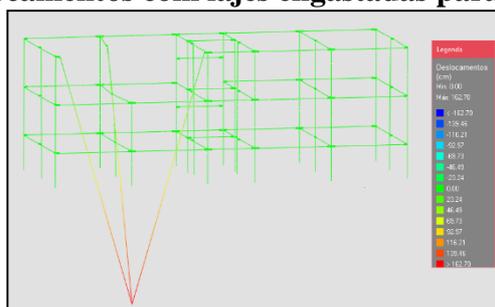


Figura 8 – Deslocamentos com lajes engastadas para o pilar lateral.

Nota-se, portanto, que o engastamento das lajes, substituindo as ligações simplesmente apoiadas, reduz significativamente os deslocamentos das vigas adjacentes aos elementos removidos. No entanto, apesar de apresentar grande melhora, essa solução por si só ainda não é capaz de prevenir o acontecimento do colapso progressivo da estrutura pré-moldada.

4. Considerações Finais

A hipótese deste estudo se confirma devido ao fato de que a estrutura pré-moldada não é capaz de resistir e absorver os carregamentos gerados pela perda de um elemento vertical de apoio, levando o edifício ao colapso progressivo, mesmo após simulações de possíveis soluções que tinham intuito de eliminar ou mesmo atenuar os efeitos da perda de um pilar. É difícil propor uma solução para prevenção do acontecimento deste fenômeno quando se trata de uma estrutura pré-moldada.

O método proposto pelo GSA (2003) para comparação de esforços gerados após a perda de um pilar, pela relação demanda-capacidade (DCR), também evidenciou o provável acontecimento do colapso progressivo na estrutura, ultrapassando os valores limites para as vigas analisadas.

Este estudo propôs a análise de cada caso enrijecendo os elementos próximos ao elemento perdido, no entanto para uma situação real seria proposto o enrijecimento de todas as ligações viga-pilar, pelo fato do fenômeno do colapso progressivo ser causado acidentalmente, podendo afetar qualquer um dos elementos da edificação. Essa alteração acaba gerando um acréscimo bastante significativo de custo e, portanto, é proposto que se façam estudos comparativos para saber a viabilidade econômica de acrescentar ligações semirrígidas em todas as vigas, idem ao caso de engastamento de lajes.

5. Referências

- ALTOQI. Eberick V10 Basic. Florianópolis, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 9062 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- FERREIRA, Marcelo. Manual de sistemas pré-fabricados de concreto (tradução). Autor do texto original: Arnold Van Acker (FIP-2002). Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto – ABCIC: São Paulo, 2003.
- LARANJEIRAS, Antônio Carlos Reis. Colapso progressivo dos edifícios – Breve Introdução. TQS News, v.33, n. 8, p.36-47, ago. 2011. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/tqs-news/consulta/artigos/1009-colapso-progressivo-dos-edificios-breve-introducao>>. Acesso em: 26 de março de 2017.
- ROUHANI, Farzad; LIN, Lan; GALAL, Khaled. Vulnerability of RC Buildings to Progressive Collapse Based on 2003 and 2013 GSA Guidelines. Structures Congress, Portland, Oregon, USA, 2015.
- U.S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. GSA 2013 - Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. USA. 24 de Outubro de 2013.
- U.S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. GSA 2003 - Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. USA, 2003.