



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Estudo Comparativo entre Análise Estrutural Global e Faseada de Edifícios em Concreto Armado

Bárbara Chagas Rachinhas¹, Américo Campos Filho², Paula Manica Lazzari³

¹UFRGS / Escola de Engenharia / PPGEC / barbararachinhas@gmail.com

²UFRGS/ Escola de Engenharia / PPGEC / americo.campos.filho@gmail.com

³UFRGS/ Escola de Engenharia / PPGEC / p.manica.lazzari@gmail.com

Resumo

No que concerne projeto estrutural de edifícios, usualmente, as situações mais severas ocorrem na ocupação após a construção. Entretanto, podem existir situações críticas durante a construção, em termos de segurança e estabilidade estrutural. Normalmente, no projeto estrutural de edifícios, realiza-se uma análise global da estrutura, onde todas as cargas de projeto são aplicadas de forma simultânea, em um modelo estrutural completo, situação que não corresponde com a realidade construtiva. O que de fato ocorre, é que o peso da estrutura e de outros elementos construtivos passa a atuar à medida que o edifício é construído. É proposta a análise faseada, na qual é possível obter as deformações e esforços em cada um dos estágios construtivos e considerar os efeitos acumulativos de um estágio para o outro. A análise incremental além de considerar a sequência construtiva, contempla os efeitos diferidos próprios do comportamento do material concreto (retração e fluência), que começam na parte inicial da construção e permanecem em desenvolvimento mesmo após o término desta. Considera-se, também, a evolução do módulo de elasticidade conforme a idade do concreto. Para realizar a confrontação entre as análises global e incremental, propôs-se o uso de modelos numéricos, através do Método dos Elementos Finitos, utilizando a plataforma ANSYS. Neste *software* utilizou-se a ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*) para realizar a introdução de um novo modelo constitutivo para o concreto, possibilitando a representação do seu comportamento não-linear. Efetuou-se a modelagem de um exemplo, realizando a extração e comparação dos resultados referentes aos esforços e aos deslocamentos.

Palavras-chave

Estruturas de Edifícios; Análise Global; Análise Faseada

1. Introdução

Em relação a edifícios, as situações mais severas ocorrem na ocupação após a construção. Entretanto, de acordo com Ha e Lee (2013), podem existir situações críticas no decorrer do processo construtivo, em termos de segurança e estabilidade estrutural. A grande maioria dos escritórios e programas de cálculo profissionais realizam a análise global, onde são aplicadas, de forma simultânea, todas as cargas de projeto em um modelo completo da estrutura. As especificações normativas e hipóteses de cálculo são feitas de forma que se deve considerar o valor pleno da resistência e do módulo de elasticidade do concreto, dado aos 28 dias de idade.

Esta situação não corresponde à realidade construtiva: o que de fato ocorre, é que o peso da estrutura e de outros elementos construtivos passa a atuar à medida que o edifício é construído. Para simular esta situação, é proposta a análise faseada, na qual é possível obter os deslocamentos e forças em cada um dos estágios construtivos, e considerar os efeitos acumulativos destes, de um estágio para o outro. A análise faseada contempla a consideração da sequência construtiva, dos efeitos reológicos próprios do comportamento do material concreto, a evolução do módulo de elasticidade e da resistência do concreto e a fissuração que ocorre nas idades iniciais. É considerado carregamentos incrementais, tanto para as ações permanentes quanto para as ações variáveis, de forma a avaliar com maior precisão o estado de deformação da estrutura. Para que se

possa levar em conta esses efeitos e ações, é necessário considerar diversos modelos constitutivos e hipóteses de carga. Este tipo de análise é comumente efetuado em projeto de estruturas de pontes.

Neste artigo apontam-se as diferenças entre a realização da análise estrutural global e da análise estrutural faseada, no que concerne esforços e deslocamentos da estrutura. Para tal, propôs-se um estudo sobre um edifício de cinco pavimentos, modelado por Rachinhas (2020). O modelo numérico é realizado fazendo uso do Método dos Elementos Finitos, através da plataforma ANSYS, versão 19.2. Para o concreto, adotou-se um modelo constitutivo viscoelástico com fissuração, o qual apresenta comportamento distinto quando submetido à tração e à compressão. Foram realizados testes e exemplos de validação da rotina viscoelástica com fissuração, os quais podem ser vistos no trabalho de dissertação de Rachinhas (2020).

2. Modelos Constitutivos dos Materiais

2.1 Concreto

Para o concreto em compressão, utilizou-se o modelo desenvolvido a partir da programação de Quevedo et al (2018). Esta programação está de acordo com as formulações apresentadas pelo Código Modelo CEB-FIP MC90 (1993), o qual é compatível com as formulações expostas na teoria da solidificação de Bažant e Prasannan (1989a, 1989b). A representação do comportamento do concreto se deu por meio de fórmulas programadas em linguagem FORTRAN77. Para os elementos de barra, adotou-se um modelo uniaxial e para os elementos de casca, multiaxial. Estas sub-rotinas foram compiladas e inseridas na rotina do ANSYS, através da ferramenta UPF (Usermat).

2.1.1 Comportamento Diferido

O comportamento do concreto é traduzido por um modelo viscoelástico, que realiza a verificação e consideração dos efeitos da fissuração para os pontos tracionados. Foi utilizada a formulação para a fluência e retração advindas do Código Modelo CEB-FIP MC90 (1993). A deformação por fluência para uma tensão constante aplicada no tempo inicial é dada pela Eq. (1). A deformação dependente da tensão pode ser expressa conforme a Eq. (2), e o coeficiente de fluência é dado pela Eq. (3). A relação para a deformação por retração pode ser vista na Eq. (4).

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) \quad (2)$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s) \quad (4)$$

Bažant e Prasannan (1989a, 1989b), propuseram um modelo físico que contempla o envelhecimento como um fator separado da idade da carga, relacionado com o volume de concreto solidificado ao longo do tempo. Mais informações sobre a Teoria da Solidificação para a fluência do concreto e o modelo reológico para o fator de fluência dependente da idade do carregamento pode ser encontrado em Rachinhas (2020).

2.1.2 Comportamento Instantâneo

O modelo proposto para descrever o comportamento do concreto tracionado, considera o material como elástico-linear até fissurar, e a partir deste, utiliza-se o modelo de fissuras distribuídas. Este modelo, para elementos de casca (tensão multiaxial), caracteriza-se por três leis: o critério de fissuração, a regra para a colaboração do concreto entre fissuras (*tension stiffening*) e o modelo para a transferência das tensões de corte. Admite-se que a fissura tenha se formado em um plano ortogonal à tensão principal de tração e que os eixos locais coincidam com as direções principais. No modelo de fissuras distribuídas necessita-se, apenas, que se atualize a relação tensão-deformação, realizando a modificação das propriedades do material para considerar

o dano por fissuração. O nível de tensão dos pontos de integração pode alcançar a superfície de ruptura tanto por fissuração, quanto por esmagamento do concreto. A superfície de ruptura utilizada foi a de Ottosen (1977) e para realizar a distinção entre esmagamento e fissuração adotou-se o critério proposto pelo boletim nº 156 do CEB (1983), no qual se $\sigma_1 \geq f_{ct,m}/2$ o ponto de integração fissurou.

Os efeitos da aderência entre o concreto e as barras de aço são responsáveis pela transmissão do esforço entre o aço e o concreto fissurado, tal fenômeno é conhecido como “*tension stiffening*”. Adotou-se a opção sugerida por Hinton (1988), introduzindo a modificação da curva tensão-deformação do concreto, representado então como um material com comportamento linear com amolecimento em tração, de acordo com a Fig. (1).

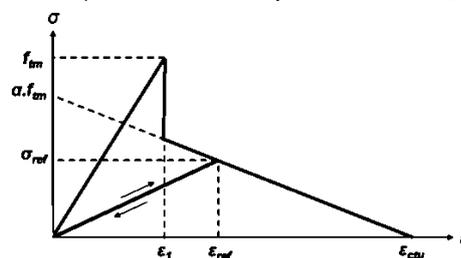


Figura 1 - Curva tensão deformação do concreto tracionado (Hinton 1988).

Para a inclusão dos efeitos de engrenamento dos agregados e de pino de armadura, utilizou-se uma aproximação adotada por Hinton (1988), a qual consiste em adotar um valor reduzido para o módulo de elasticidade transversal do concreto correspondente ao plano fissurado através de um fator β_g . Para elementos de barra, não se faz necessário o modelo para a transferência de corte, visto que, nestes elementos a tensão presente é uniaxial. Após a ocorrência de fissuração, despreza-se o efeito de Poisson no concreto.

2.1 Aço

No presente trabalho adotou-se o modelo elastoplástico perfeito para o aço, conforme Fig. (2).

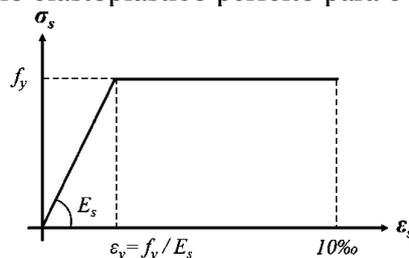


Figura 2 - Modelo elastoplástico perfeito para o aço (Lazzari 2019).

3. Análise Numérica

3.1 Elementos Finitos utilizados

O Beam189 trata-se de um elemento unidimensional, possui três nós ao longo de seu comprimento, apresenta formulação quadrática, com seis graus de liberdade por nó. Adequa-se para análise linear ou não-linear de estruturas reticuladas, como pilares e vigas esbeltas ou moderadamente esbeltas, envolvendo diversos modelos constitutivos de materiais. De acordo com a biblioteca do ANSYS (2019), esse elemento é baseado na teoria de vigas de Timoshenko. A geometria, os nós e o sistema de coordenadas local e a discretização transversal (quatro células na base por seis células na altura, possuindo cada célula quatro pontos de integração) encontram-se na Fig. (3).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

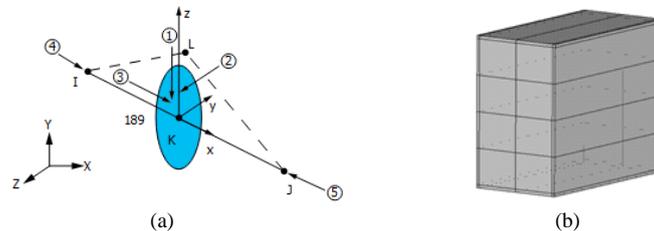


Figura 3 - Elemento Beam189 (a) geometria, nós e sistema de coordenadas (ANSYS, 2019) e (b) discretização transversal adotada.

O elemento finito Shell281 é adequado para realizar análise de estruturas por camadas, casca compósitas finas até moderadamente espessas, admitindo comportamentos lineares, não-lineares e grandes deformações. Possui funções de interpolação quadráticas e baseia-se na teoria de Mindlin-Reissner. De acordo com a Fig. (4), o elemento possui oito nós e seis graus de liberdade por nó. Foram utilizados cinco pontos de integração ao longo da espessura e camada única.

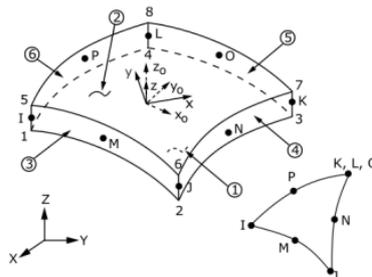


Figura 4 - Elemento Shell281 (ANSYS, 2019).

Optou-se por utilizar a armadura em um modelo incorporado, considerando a aderência perfeita entre o aço e o concreto. O elemento finito compatível com os elementos Beam189 e Shell281 que representa armadura incorporada é o Reinf264. As configurações relativas às coordenadas nodais, aos graus de liberdade e às conectividades do elemento Reinf264, são idênticas as do elemento base ao qual ele está associado, conforme mostra a Fig. (5).

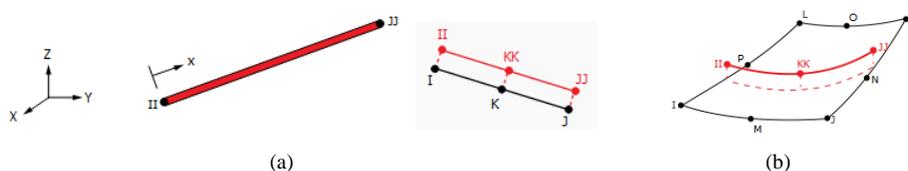


Figura 5 - Elemento Reinf264 associado ao elemento base (a) Beam189 e (b) Shell281 (ANSYS, 2019).

3.2 USERMAT

O ANSYS fornece acesso à ferramenta UPF, a qual se trata de um instrumento que compreende a criação/edição de elementos e modelos constitutivos para os materiais. Neste trabalho foi utilizado o recurso de customização referente ao comportamento do material, para o concreto. Utilizou-se as sub-rotinas Usermatbm (Beam189) e Usermatps (Shell281).

3.3 Birth and Death

O recurso *Birth and Death*, contido no *software* ANSYS, permite ativar/desativar um elemento para uma etapa de carga específica na análise. Quando um elemento é desativado, este não é removido, sua rigidez é multiplicada por um fator de redução relevante, tornando este elemento inativo. De forma semelhante, quando o elemento é reativado, são também reativadas suas propriedades com os valores originais. No presente



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

trabalho, esta ferramenta será de suma importância para que seja realizada a análise faseada, a qual os elementos surgem conforme a sequência construtiva.

4. Objeto de Estudo

4.1 Apresentação da Estrutura

Serão apresentadas análises referentes a uma estrutura de um edifício de cinco pavimentos estudados em Rachinhas (2020). As armaduras modeladas para pilares, vigas e lajes são advindas do *software* de cálculo estrutural TQS. A seção adotada para as vigas e pilares é de 30x50 cm e a espessura da laje de 9 cm. A Fig. (6) exibe a planta baixa do referido edifício. Na Tab. (1) estão listadas as cargas aplicadas ao modelo, obtidas de acordo com a NBR 6120:2019 (ABNT, 2019).

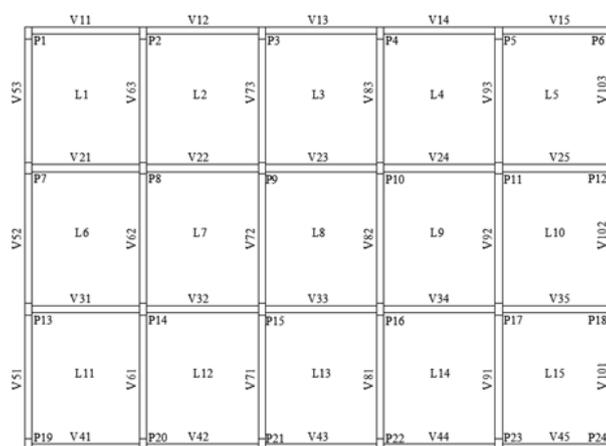


Figura 7 - Planta baixa com dimensões e nomenclaturas

Tabela 1 – Cargas aplicadas ao modelo.

Cargas Permanentes			Cargas Variáveis		
Carga	Unidade	Valor	Carga	Unidade	Valor
Peso próprio do pilar	kN	11,25	Escritórios / Residência	kN/m ²	2,00
Peso próprio da viga	kN/m	3,80	Serviço (durante a construção)	kN/m ²	1,00
Peso próprio da laje	kN/m ²	2,25			
Peso próprio da alvenaria interna	kN/m	5,40			
Peso próprio da alvenaria externa	kN/m	6,50			
Peso próprio do revestimento	kN/m	2,00			

4.2 Consideração das Etapas do Processo Construtivo

A definição das etapas construtivas implementadas foi realizada a partir de dados fornecidos por um engenheiro civil com experiência na área de construção. Os pavimentos recém concretados são suportados por pavimentos previamente concretados, através de um sistema de fôrmas, escoras e reescoras. Em relação ao procedimento de escoramento, por simplificação, foi adotado o sistema tradicional (com retirada total de escoras). A simulação do processo construtivo foi estabelecida no *software* ANSYS a partir do comando “*birth and death*”. Para tal, foram criados diversos componentes para os pilares, vigas e lajes de cada pavimento. Apesar de todos os elementos estruturais serem em concreto armado, tais elementos possuem diferentes idades, portanto na análise são considerados como diferentes materiais. Na análise computacional, sempre que



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

há a concretagem de elementos há a ativação do seu respectivo componente. Na Tab. (2) consta as etapas construtivas adotadas. O tempo final da construção, correspondente a etapa 14, é aos 85 dias. É nesta etapa final que são extraídos todos os resultados utilizados nas comparações.

Tabela 2 – Etapas construtivas

Etapa 0	Etapa 1
Desativação de todos os elementos estruturais previamente modelados do edifício;	Concretagem e posterior aplicação do peso próprio dos pilares do primeiro pavimento;
Etapa 2	Etapa 3
Escoramento do primeiro pavimento. Após o tempo de cura do concreto dos pilares, são concretadas as lajes e vigas do primeiro pavimento;	Concretagem e posterior aplicação do peso próprio dos pilares do segundo pavimento;
Etapa 4	Etapa 5
Escoramento e concretagem das vigas e lajes do segundo pavimento;	Concretagem e aplicação do peso próprio dos pilares do terceiro pavimento. Início da alvenaria interna e externa do primeiro pavimento;
Etapa 6	Etapa 7
Escoramento e concretagem das vigas e lajes do terceiro pavimento;	Concretagem e posterior aplicação do peso próprio dos pilares do quarto pavimento. Início da alvenaria interna e externa do segundo pavimento;
Etapa 8	Etapa 9
Retirada das escoras do primeiro pavimento, aplicação do peso próprio e das cargas permanentes e acidental (somente de serviço) nas lajes e vigas do primeiro pavimento. Escoramento e concretagem das vigas e lajes do quarto pavimento;	Concretagem e posterior aplicação do peso próprio dos pilares do quinto pavimento. Início da alvenaria interna e externa do terceiro pavimento;
Etapa 10	Etapa 11
Retirada das escoras e aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do segundo pavimento. Escoramento e concretagem das vigas e lajes do quinto pavimento;	Retirada das escoras e aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do terceiro pavimento. Início da alvenaria interna e externa do quarto pavimento;
Etapa 12	Etapa 13
Retirada das escoras e aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do quarto pavimento. Início da alvenaria interna e externa do quinto pavimento;	Retirada das escoras e a aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do quinto pavimento;
Etapa 14	
Aplicação da carga acidental de uso (complementar a carga de serviço) em todas as lajes.	

4.3 Modelo Numérico da Estrutura

A modelagem da estrutura confeccionada no ANSYS contou com o elemento Beam189 para a representação de pilares/vigas e com o elemento Shell281 para representação das lajes. O elemento Reinf264 realizou a representação da armadura incorporada discreta. No que concerne a discretização, foi utilizada uma malha de 10x10 elementos para cada laje. Para os pilares e vigas foram utilizados 10 elementos em sua maior dimensão e para a seção adotou-se 4 divisões na base e 6 divisões na altura. Inicialmente, realizou-se a inserção do modelo numérico no programa TQS, a fim de obter as armaduras necessárias para os elementos estruturais. Não foram inseridos os estribos nas vigas e pilares, devido a uma limitação do elemento Beam189. Na Fig. (7) estão ilustrados os modelos estruturais e a Tab. (2) apresenta os parâmetros utilizados na modelagem em relação aos materiais concreto e aço.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

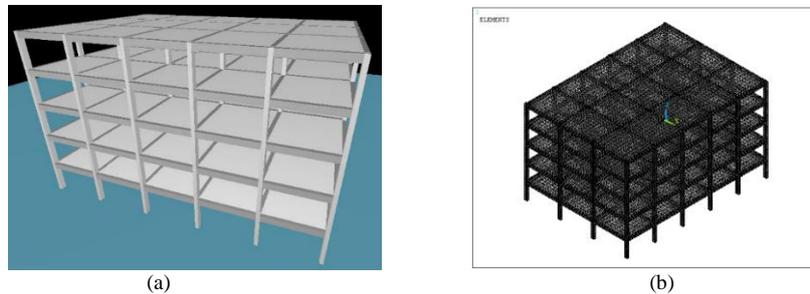


Figura 7 - Modelos estruturais do (a) software TQS e do (b) software ANSYS.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na modelagem

Mat.	Parâmetro	Símb.	Un.	Valor	Parâmetro	Símb.	Un.	Valor
Aço	Módulo de elasticidade	E	MPa	210000	Coeficiente de Poisson	ν	adim.	0,3
	Tensão de escoamento	f_v	MPa	550				
Concreto	Resistência característica do concreto	f_{ck}	MPa	25	Classe de agressividade ambiental	-	adim.	II
	Módulo de elasticidade aos 28 dias	E_{28}	MPa	28000	Coeficiente de Poisson	ν	adim.	0,2
	Coeficiente que depende do tipo de concreto	s	adim.	0,2	Umidade relativa ambiente	RH	%	70
	Espessura fictícia para a viga	h_{fv}	cm	26,8	Espessura fictícia para o pilar	h_{fp}	cm	23,1
	Espessura fictícia para a laje	h_{fl}	cm	18,0	Idade do concreto no final da cura	t_s	dia	3
	Coeficiente que depende do tipo de cimento	β_{sc}	adim.	5	Temperatura	T	°C	20
	Efeito do tipo de cimento durante a cura	α	adim.	1	Idade do concreto no início do carregamento para pilares	t_{0p}	dia	1
	Idade do concreto no início do carregamento para vigas e lajes	t_{0vl}	dia	31	Tempo final para ajuste da cadeira	t_{inf}	dia	3000
	Núm. de pontos por década do ajuste	n_{de}	un.	10	Deformação última à compressão	ϵ_{uc}	%	0,45
	Deformação última à tração	ϵ_{ut}	%	0,3	Parâmetro do Tension Stiffening	α_{TS}	adim.	70

4.4 Análise da Estrutura

Foram executadas duas análises estruturais, sendo a primeira a análise global, na qual o material concreto possui comportamento elástico. A segunda análise é a faseada, a qual conta com a inserção das fases da construção, a aplicação sequencial de cargas, a consideração do modelo de viscoelasticidade para o concreto com inserção de fissuração. Em ambas as análises é realizada a inserção das armaduras. Serão analisados dois pórticos da estrutura, conforme Fig. (8) e as lajes do primeiro pavimento e cobertura. Os valores apresentados foram extraídos diretamente do ANSYS, o qual considera o eixo local dos elementos para a extração de dados.

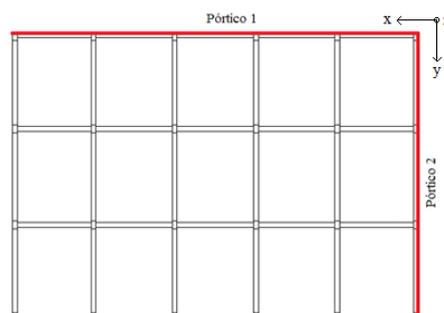


Figura 8 - Pórticos analisados e eixo global.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

4.4.1 Pilares

Na Fig. (9) são apresentados os diagramas de esforço normal para os pilares e na Fig. (10) constam os diagramas de momento fletor (no plano do pórtico).

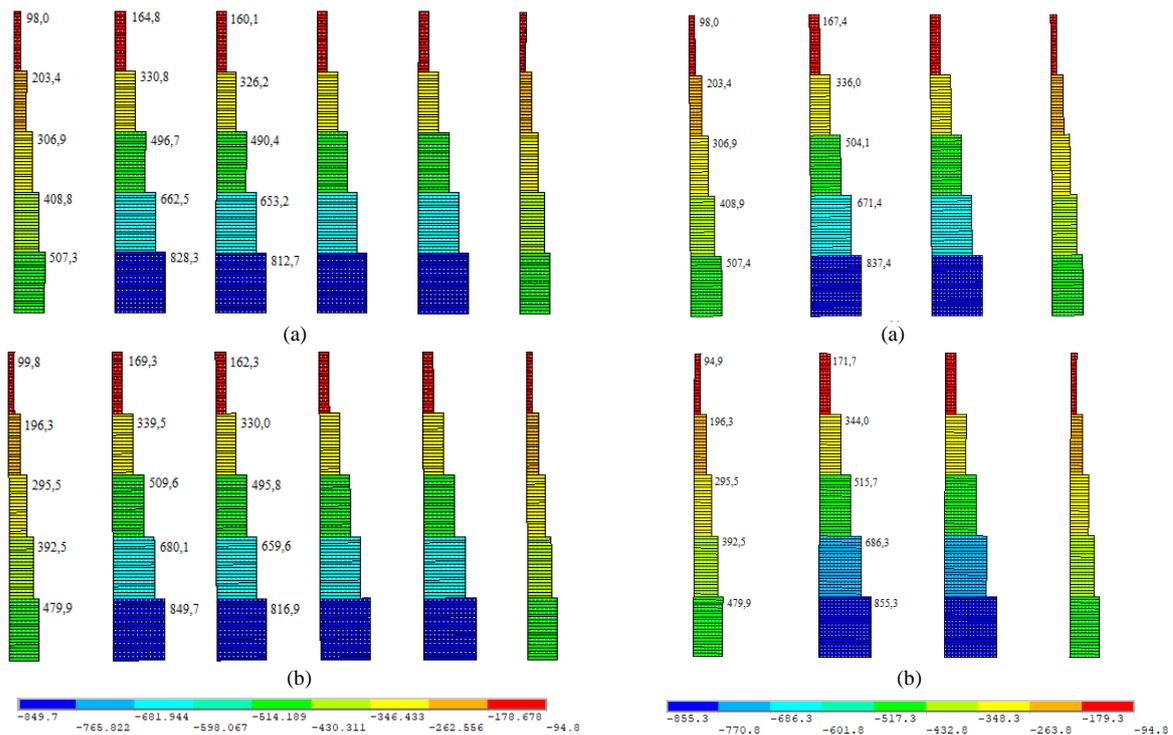


Figura 9 - Esforço normal (kN) nos pilares do pórtico 1 e pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

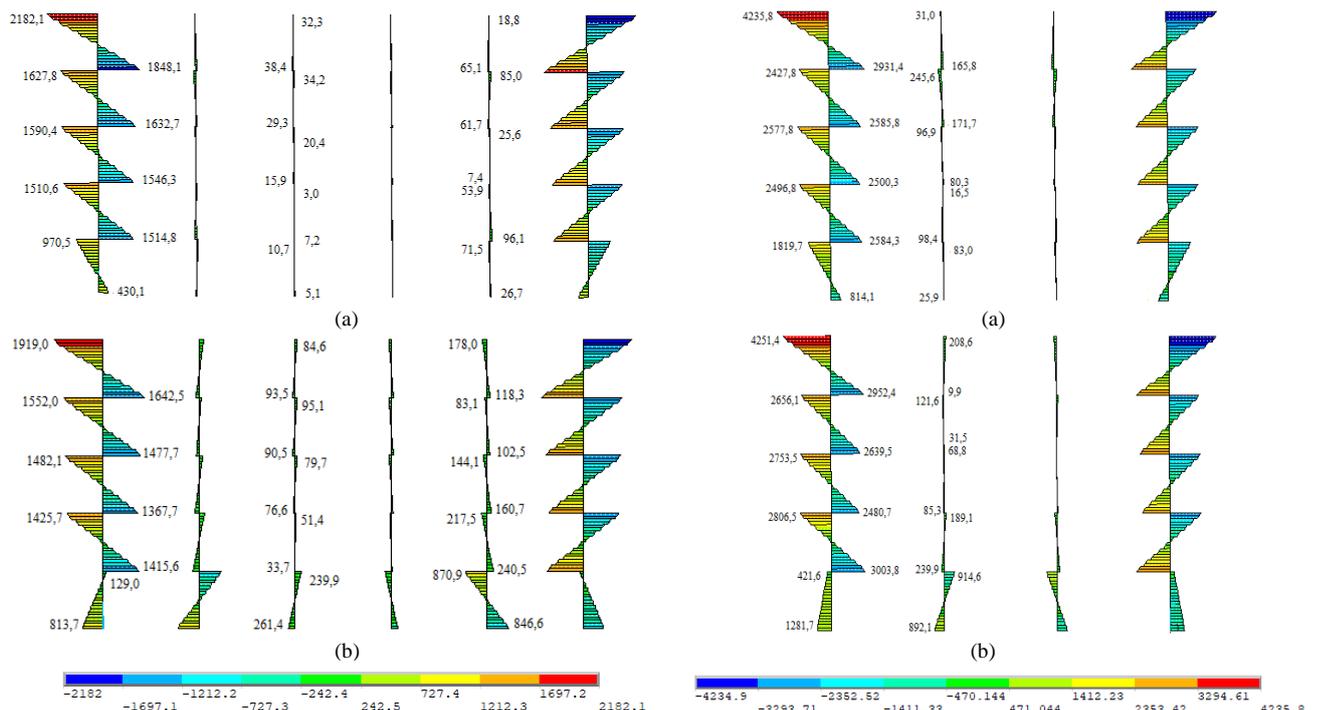


Figura 10 - Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nos pilares do pórtico 1 e pórtico 2 para análise (a) global e (b) faseada.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Em relação ao esforço normal, os pórticos analisados apresentaram comportamento semelhante. Em termos de porcentagem, para ambos os pórticos, comparando a análise faseada com a análise global, a redução dos valores dos esforços chega até 5,4%. Quanto aos aumentos dos valores dos esforços, para o pórtico 1 é de até 2,6% e para o pórtico 2, de 2,1%. Observa-se que as maiores diferenças de resultados (tanto aumento quanto diminuição), ocorrem no pavimento térreo, para os dois pórticos analisados. Desta forma, constata-se que a análise faseada em comparação com a análise global (convencional), apresenta uma redistribuição de esforços na estrutura.

No que se refere aos momentos fletores nos pilares, constata-se grandes diferenças entre os resultados obtidos através das análises realizadas. Em relação ao pórtico 1, comparando os resultados advindos da análise faseada com a análise global, observa-se que nos lances de pilares externos ocorre majoritariamente a diminuição dos resultados (em até 12%). No pavimento térreo constata-se a inversão e o aumento dos momentos. Nos lances de pilares internos, ocorrem acréscimos ao valor dos esforços (de até 16%). Nos lances de pilares localizados no centro da estrutura, há a inversão dos momentos no pavimento térreo e nos outros lances de pilares internos essa inversão ocorre no pavimento de cobertura. Já no pórtico 2, nos lances de pilares externos, ocorre o aumento dos resultados colhidos, em comparação com análise convencional, havendo a inversão de esforços no pavimento térreo. Nos lances de pilares internos, os resultados também apresentam acréscimo, mas ocorre a inversão dos momentos no pavimento de cobertura.

4.4.2 Vigas

Foram extraídos para as vigas os resultados referentes ao esforço cortante e ao momento fletor no plano do pórtico. A Fig. (11) ilustra os diagramas de esforço cortante para ambos os pórticos analisados e a Fig. (12) mostra o diagrama dos momentos fletores (no plano do pórtico) para ambos os pórticos.

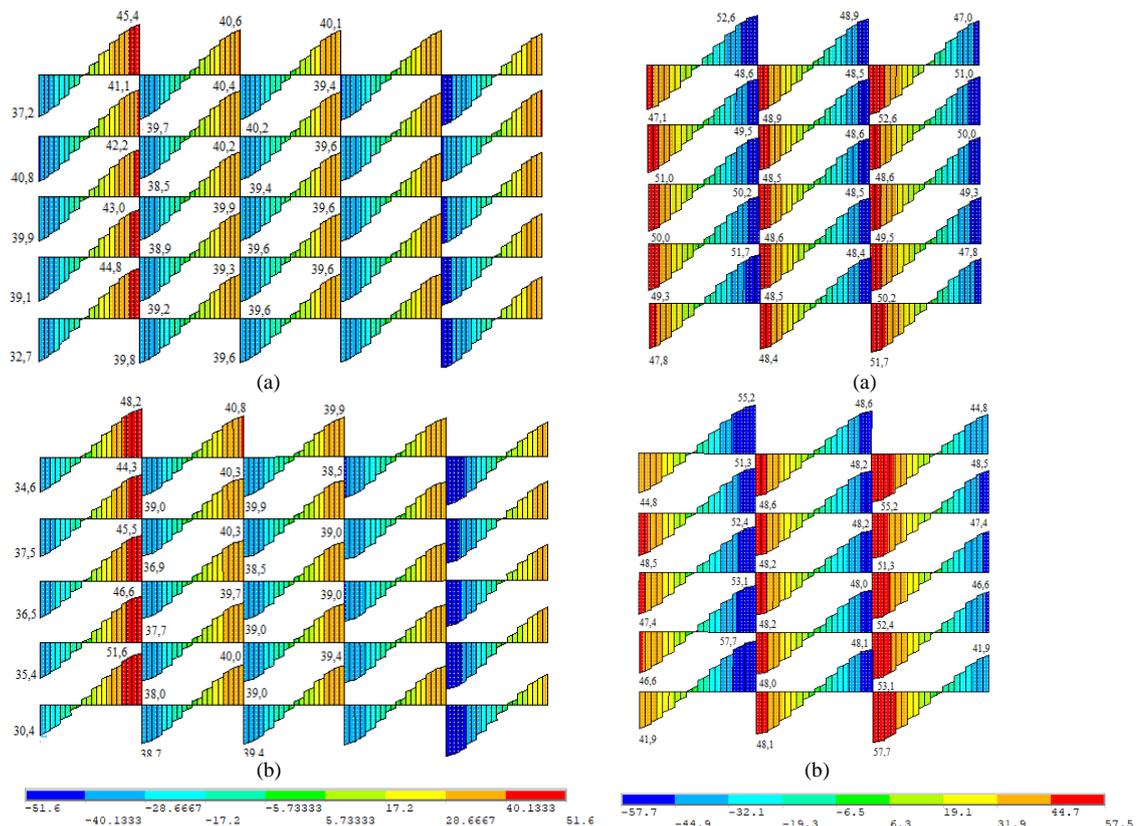


Figura 11 - Esforço cortante (kN) nas vigas do pórtico 1 e pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

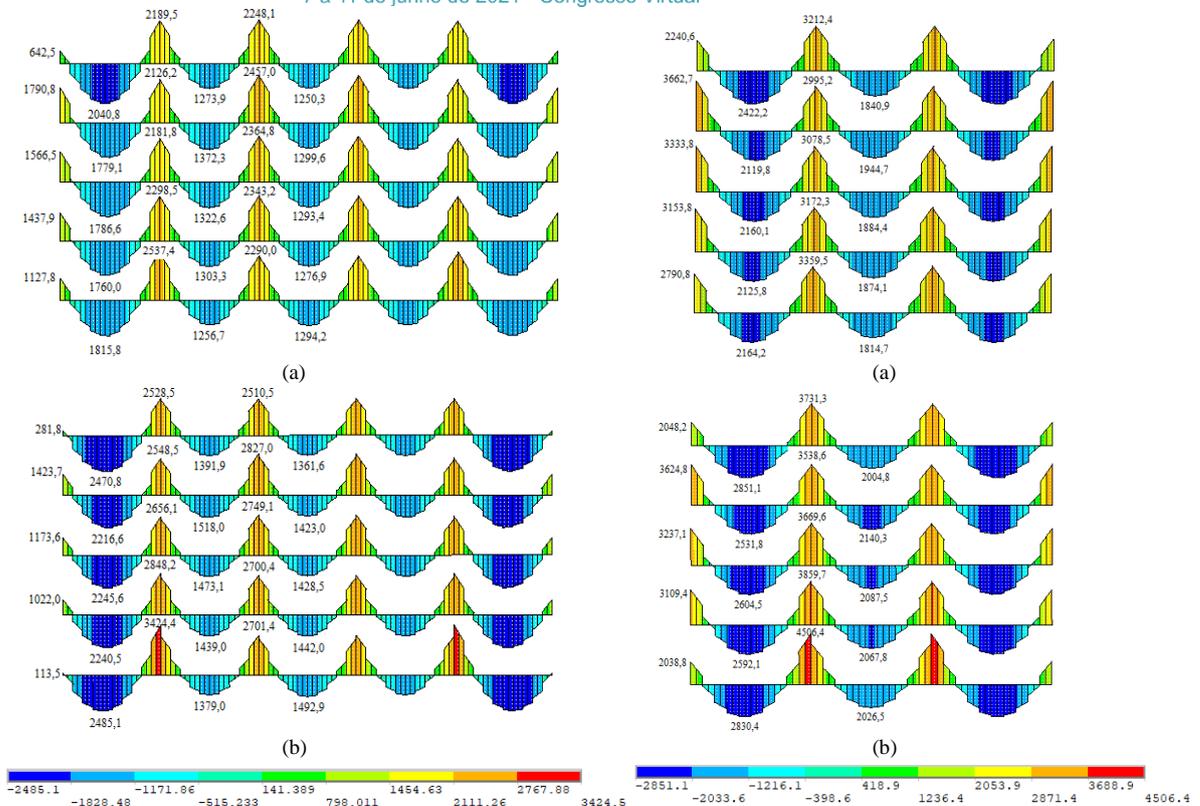


Figura 12 - Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nas vigas do pórtico 1 e do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

Realizando a análise do esforço cortante nas vigas, em ambos os pórticos, nota-se que as maiores diferenças entre os resultados se encontram nas vigas externas. Efetuando o estudo destas vigas, com ênfase no tramo externo, os resultados obtidos pela análise faseada são menores do que os resultados colhidos pela análise convencional, obtendo reduções de até 9,5% para o pórtico 1 e 12,3% para o pórtico 2. Focando nos tramos internos, grande parte dos resultados advindos da análise faseada são maiores quando comparados com os resultados provenientes da análise global. No pórtico 1 esse aumento chega até 15,2% e no pórtico 2 até 11,6%.

Tratando do momento fletor nas vigas, os pórticos analisados apresentaram o mesmo comportamento. As maiores diferenças entre os resultados advindos das análises foram constatadas nas vigas do pavimento térreo. Quando comparados os resultados obtidos pela análise faseada com os resultados extraídos pela análise global, houve redução somente no tramo externo das vigas externas. O percentual de diminuição dos esforços chegou a 90% para o pórtico 1, e 27% para o pórtico 2. Nos tramos internos das vigas e a meio vão, foram obtidos resultados maiores advindos da análise faseada. No pórtico 1, nos tramos internos esse aumento chegou a 15,4% e a meio vão a 37%. Já no pórtico 2, nos tramos internos o acréscimo chegou a 34% e a meio vão a 31%.

4.4.3 Pórticos

A Fig. (13) indica a deformada para os pórticos, para ambas análises realizadas.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

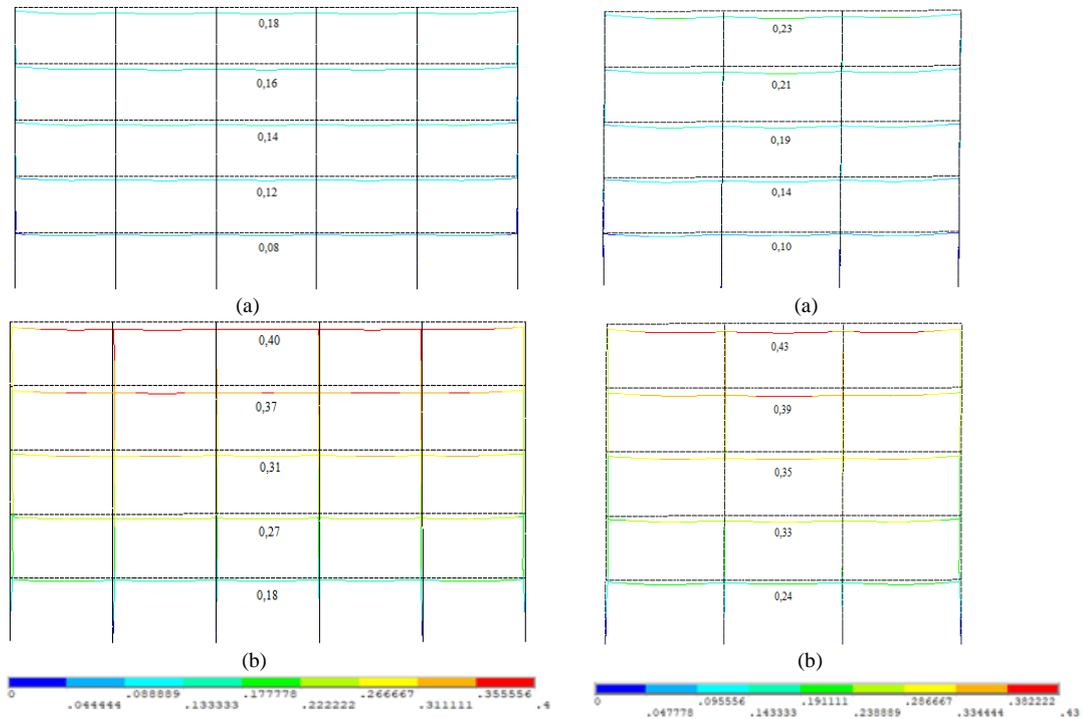


Figura 13 - Deslocamentos (cm) do pórtico 1 e do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

No que diz respeito ao deslocamento total, em ambos os pórticos a análise faseada apresentou valores significativamente maiores do que os valores obtidos pela análise convencional. Isto se deve ao fato de que a análise faseada considera os efeitos diferidos do concreto que aliados com a consideração das etapas construtivas (as quais são incrementadas ao longo do tempo) exibe efeito significativo. As maiores diferenças percentuais entre os resultados foram encontradas na laje de cobertura, no vão central do edifício, sendo esse acréscimo de até 122% no pórtico 1 e de até 87% no pórtico 2. Observou-se também, que na análise faseada ocorre um deslocamento horizontal da estrutura, o que não se sucede na análise global. Não foram encontrados pontos de fissuração nos pórticos analisados.

4.4.4 Lajes

Para as lajes foram extraídos o estado de fissuração e o deslocamento, para a laje do primeiro pavimento e a laje de cobertura. A Fig. (14) apresenta o estado de fissuração das lajes, onde a escala mostra duas cores: azul (pontos de integração do elemento não estão fissurados) e vermelho (ponto de integração do elemento em questão fissurou). A fissuração foi analisada somente para a análise faseada, visto que a análise global não a contempla. Não foi constatada fissuração na segunda direção para as lajes. Na Fig. (15) consta os deslocamentos verticais para as lajes mencionadas.

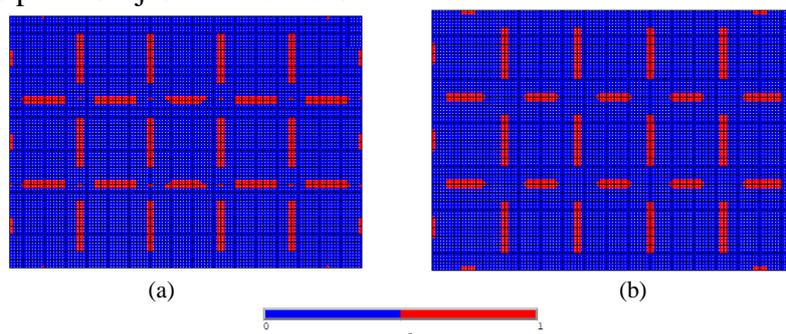


Figura 14 - Estado de fissuração para a laje (a) do primeiro pavimento e (b) de cobertura.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

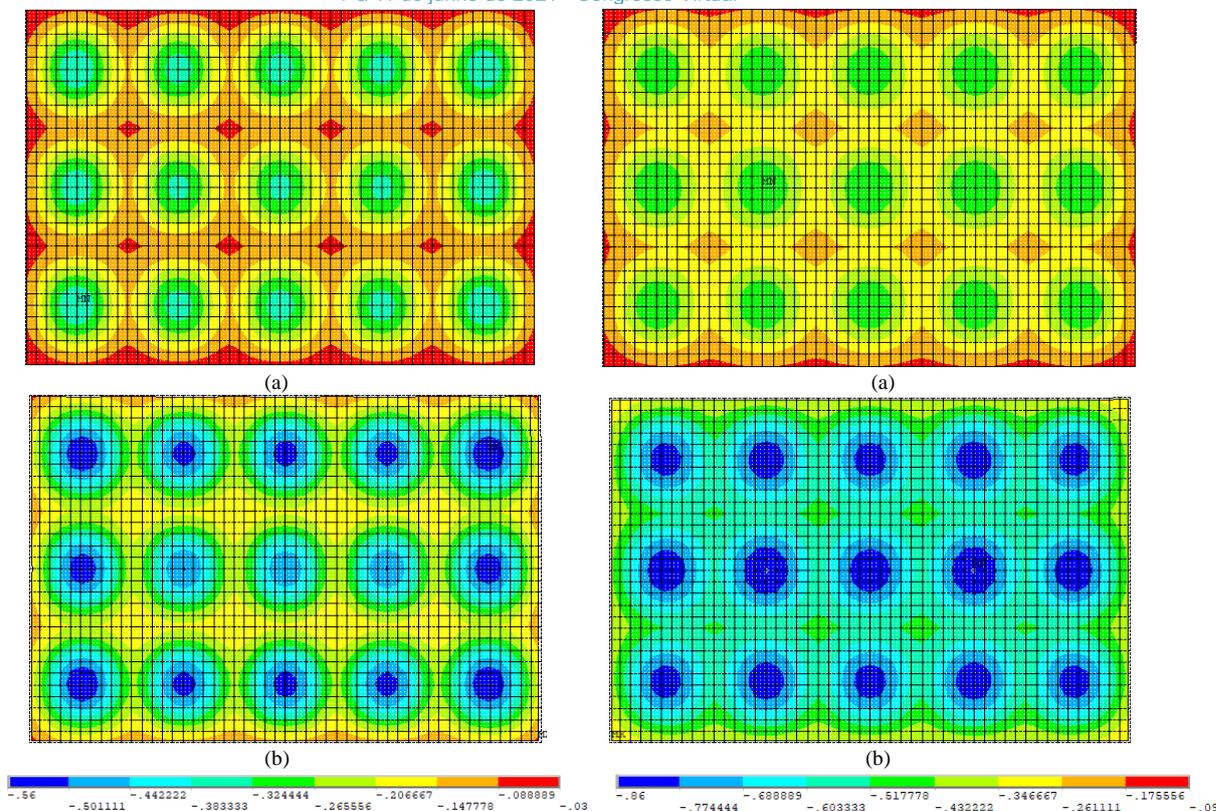


Figura 15 - Deslocamento vertical (cm) para a laje do primeiro pavimento e cobertura, para análise (a) global e (b) faseada.

Verifica-se que a fissuração ocorre sempre à meio vão das vigas, em ambas as lajes. Tendo em vista o fato de serem constatados pontos de fissuração nas lajes, destaca-se a importância de realizar a análise faseada. Em relação aos deslocamentos verticais nas lajes, constata-se completa mudança na análise faseada. Esta observação condiz com o comportamento notado por Ha (2013), que evidencia a mudança da condição estrutural não apenas no pavimento no momento da carga, mas na estrutura em geral, com aumento de deslocamentos. No que concerne o deslocamento vertical no centro das lajes, para ambas lajes estudadas, os deslocamentos foram maiores através da análise faseada. Este aumento chega a 21% na laje do primeiro pavimento e 41% na laje de cobertura.

5. Conclusões

A consideração das fases construtivas, da aplicação sequencial de cargas e da inserção dos efeitos viscosos do concreto, explica diversos fenômenos observados na análise faseada. A consideração da retração causa um efeito de encolhimento/contração na estrutura, conforme pode-se observar nas Fig. (13) e (15). Este efeito aliado à ação da fluência, a qual amplifica o encurtamento axial dos pilares, acaba por gerar a inversão de alguns momentos fletores nos pilares, de acordo com a Fig. (10).

De forma geral, investigando os resultados obtidos, nota-se que executando a análise faseada há uma redistribuição dos esforços na estrutura, o que é esperado de acordo com Das (2016). Também segundo Das (2016), e Kwak e Kim (2006), espera-se que os momentos fletores e o deslocamento dos membros estruturais sejam maiores quando obtidos pela análise faseada, o que de fato se observa na presente análise. Examinando os resultados obtidos, nota-se que por vezes a análise global apresenta valores superiores do que os valores calculados com a análise faseada, ocorrendo uma situação de superdimensionamento dos elementos, fato que tem relevância no aspecto econômico da obra. Também há a ocorrência dos valores obtidos com a análise



global serem menores do que os valores obtidos com a análise faseada, o que mostra uma situação de subdimensionamento dos elementos, fato que afeta a segurança estrutural.

Em relação ao deslocamento nos pórticos, observa-se que as diferenças entre as análises aumentam proporcionalmente ao aumento da altura do edifício. O maior encurtamento diferencial encontrado, ocorreu no pavimento de cobertura, o que foi encontrado também por Vafai (2009). É evidente em todos os diagramas de esforços, que estes possuem simetria, o que está de acordo com o esperado. Os esforços obtidos via análise global pelo ANSYS obtiveram valores extremamente próximos dos esforços obtidos via TQS. Quando se realiza a análise faseada considerando os efeitos de viscoelasticidade e fissuração o tempo de processamento do modelo triplica quando comparado com o tempo de processamento do modelo global. Por fim, os resultados mostram que em edifícios de concreto, uma análise estrutural que considere os efeitos diferidos e as etapas da construção geram resultados e comportamentos mais realistas e significativamente diferentes quando comparados com a análise convencional.

Referências

- ANSYS, Inc. Theory Reference (Versão 19.2), 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6120: Ações para o cálculo de estrutura de edificações, 2019.
- BAZANT, Z.P. e PRASANNAN, S. Solidification Theory for Concrete Creep. I: Formulation, *Journal of Engineering Mechanics*, 115(8), 1691-1703, 1989^a.
- BAZANT, Z.P. e PRASANNAN, S. Solidification Theory for Concrete Creep. II: Verification and Application, *Journal of Engineering Mechanics*, 115(8), 1704-1725, 1989^b.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP: Model Code 1990, 1990.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, Concrete under multiaxial states of stress – constitutive equations for practical design. State-of-the-art report, *Bulletin d'Information*, 156, 1983.
- DAS, G. e PRASEEDA, K.I. Comparison of Conventional and Construction Stage Analysis of a RCC Building. *Ijste - International Journal Of Science Technology & Engineering*, 3, 50-57, 2016.
- HA, T. e LEE, S., Advanced Construction Stage Analysis of High-rise Building Considering Creep and Shrinkage of Concrete, *Advances in structural engineering and mechanics*, 13, 2139 – 2147, 2013.
- HINTON, E. Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells, Pineridge Press Limited, Swansea, Wales, U.K, 1988.
- KWAK, H. e KIM, J. Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences. *Building and Environment*, 41(10), 1423-1434, 2006.
- LAZZARI, P.M., CAMPOS FILHO, A., LAZZARI, B.M., PACHECO, A.R e GOMES, R.R.S. Numerical simulation of the constructive steps of a cable-stayed bridge using ANSYS, *Struct. Eng. Mech.*, 69(3), 269-281, 2019.
- QUEVEDO, F.P.M., SCHMITZ, R.J., MORSH, I.B., CAMPOS FILHO, A. e BERNAUD, D. Customization of a software of finite elements to analysis of concrete structures: long-term effects, *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 11(4), 696-718, 2018.
- OTTOSEN, N.S. A failure criterion for concrete, *J. Eng. Mech. Div.*, 103(4), 527-535, 1977.
- RACHINHAS, B.C. Simulação Computacional do Processo Construtivo de Edifícios em Concreto Armado, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2020.
- VAFI, A. et al. Calculation of creep and shrinkage in tall concrete buildings using nonlinear staged construction analysis, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 10(4), 409-426, 2009.