



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Estudo da Influência do Método Construtivo na Redistribuição dos Esforços em Pórticos de Concreto Armado

Patrícia Cândida Souza da Silva¹, Carlos Henrique de Moura Cunha²,
Eric Xavier Dutra³, George Lucas Cunha Rezende⁴

¹ Universidade Católica de Brasília / patriciacandida@icloud.com

² Universidade Católica de Brasília / UBEC / Professor Mestre do Departamento de Engenharia Civil
/ carlos.henrique_mc@hotmail.com

¹ Universidade Católica de Brasília / ericxavierdutra@gmail.com;

¹ Universidade Católica de Brasília / george180594@gmail.com

Resumo

Este estudo retratará a influência do processo construtivo na redistribuição dos esforços de primeira ordem em pórticos espaciais, tendo três modelos projetados no software SAP2000 (2009), sendo eles: Modelo Simples com apenas características do material e deslocamentos dos nós, Modelo Prático com a redução da rigidez axial e Modelo Refinado com os efeitos dependentes do tempo e construção por etapas, objetivando o refinamento acadêmico e a relevância do estudo para a região de Brasília. Usa-se a distribuição dos momentos fletores e esforços normais para comparar os métodos, além do dimensionamento das armaduras e suas envoltórias de esforços, assim verificando a taxa de armadura e seu comportamento perante a Norma Brasileira 6118:2014. Constatou-se que o estudo apresenta relevância significativa, dependendo da dimensão da construção, porém serão precisos estudos futuros para a melhoria da análise.

Palavras-chave

Análise incremental; Etapas construtivas; Rigidez axial; SAP2000.

Introdução

Será feito um estudo das etapas construtivas, observando as cargas axiais e momentos fletores nos pilares de um edifício fictício, empregando uma análise incremental com o auxílio do programa Structural Analysis Program 2000 (SAP2000, 2009) que leva em consideração os efeitos dependentes do tempo o qual interferem, diretamente e indiretamente, nos esforços e deslocamentos da estrutura.

Como fonte inspiradora foram utilizados os edifícios Brookfield Towers (São Paulo, Brasil) e Burj Khalifa, maior prédio do mundo (Dubai, Emirados Árabes), onde em ambos foram realizados estudos minuciosos com a fluência e retração consideradas no processo construtivo, o que acarretou em uma variação nos esforços axiais ao longo da construção.

A partir do estudo da metodologia construtiva dos dois empreendimentos, serão propostos três modelos geometricamente iguais, para representar as diferenças resultantes de cada análise, classificados como:

- Modelo Simples (M_{SIM}): Pórtico espacial, de 20 pavimentos, que leva em consideração o tipo e as características do material, dentro do domínio elástico, de acordo com a Norma Brasileira 6118:2014 e a Norma Brasileira 6120:1980, onde os carregamentos serão instantâneos, ou seja, as cargas não variam de acordo com as etapas construtivas, mas a cada pavimento a carga surge já em sua totalidade.

- Modelo Refinado (M_{REF}): Análogo ao M_{SIM} (geometria), porém considerando os efeitos da fluência e retração (Norma Brasileira 6118:2014 e CEB-FIP, 1998) e do ciclo de carregamento dos andares com cimbramento e descimbramento dos pavimentos subsequentes.
- Modelo Prático (M_{PRA}): Este modelo se iguala ao M_{SIM} quase que em totalidade, tendo diferença, apenas, na análise da rigidez axial, onde será considerado um decréscimo de 20% para se assemelhar ao valor utilizado na prática pelos projetistas.

Logo o artigo consistirá em comparar, usando os três modelos, as diferenças conceituais na consideração dos esforços ao longo do tempo. Através deste estudo, refinar os conhecimentos acadêmicos empregados ao projeto estrutural, bem como relatar a importância do método para a concepção de edifícios de grande porte, contribuindo assim com informações adicionais para o meio técnico.

Material e métodos

Para representar as etapas deste artigo, foi feito um organograma (Figura 1), que contém o ideal proposto de cada tópico.

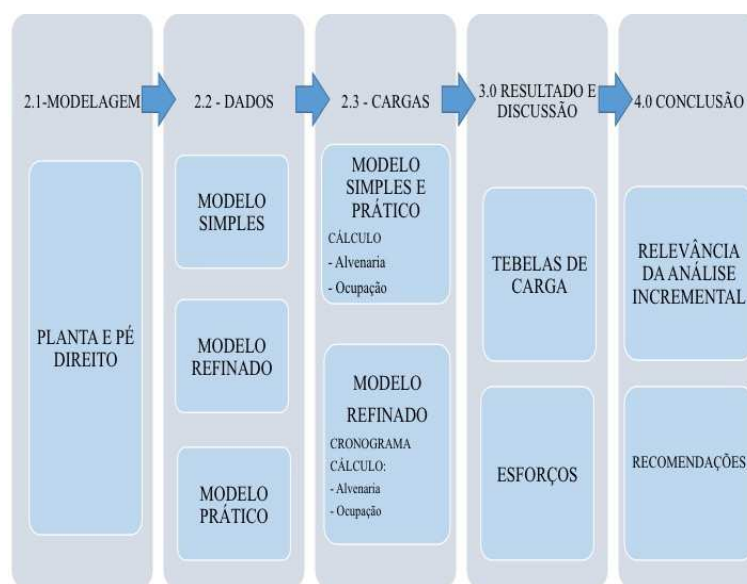


Figura 1 - Etapas do Projeto.

Modelagem

O modelo escolhido para representar um edifício, de concreto armado, com 20 pavimentos, foi composto de elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), sendo suas plantas idênticas e com o pé direito de três metros, em cada andar, totalizando em uma altura de 60 metros, situado em Brasília, Distrito Federal. Sendo que, por meio da Norma Brasileira 6118:2014 a classe de agressividade usada foi II, pois se trata de uma área urbana com pequeno risco de deterioração das estruturas e para atingir, de forma rápida, a resistência desejada, será utilizado o cimento portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) como componente de fabricação de um concreto da classe C50.

Os programas utilizados para elaboração e edição deste, foram o AutoCad 2016 e o SAP2000 (2009) V-14, que possibilitaram a representação da Planta de Forma (Figura 2).

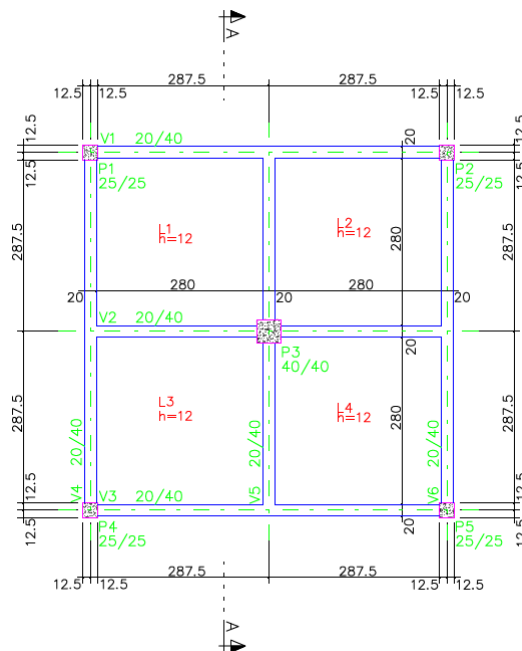


Figura 2 - Planta de Forma.

Dados

Modelo simples (M_{SIM})

Neste, os dados de entrada, referente ao concreto, foram estabelecidos por meio da Norma Brasileira 6118:2014 e a Norma Brasileira 6120:1980, para assim serem aplicados no SAP2000 (2009), como mostra Figura 3.

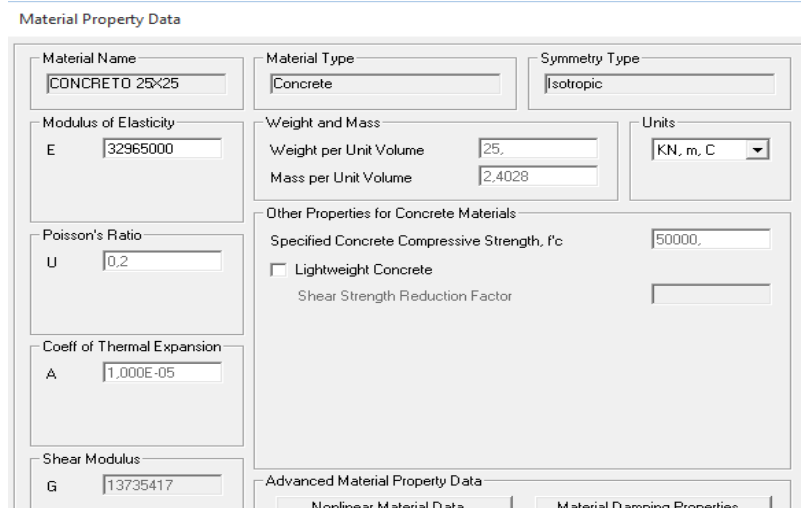
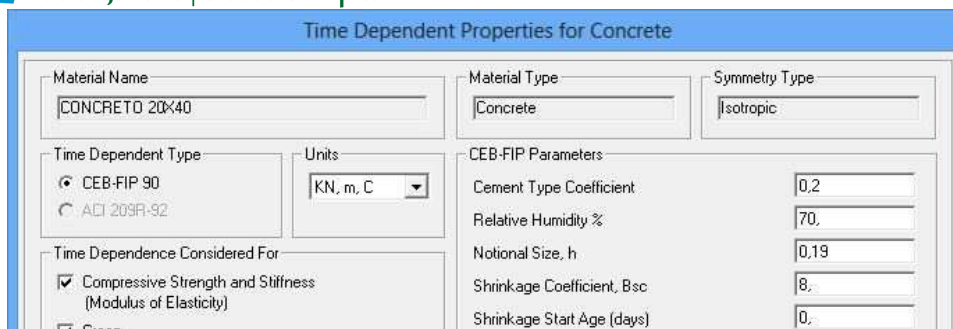


Figura 3 - Propriedades do Material.

As propriedades do material definidas acima, aplicam-se a todos os elementos estruturais definidos na Figura 2.

Modelo refinado (M_{REF})

Para este modelo, os dados de entrada no programa foram os mesmos mostrados no M_{SIM} , porém com a adição das Propriedades Dependentes do Tempo, como mostra a Figura 4.



Time Dependent Properties for Concrete

Material Name CONCRETO 20x40	Material Type Concrete	Symmetry Type Isotropic
Time Dependent Type <input checked="" type="radio"/> CEB-FIP 90 <input type="radio"/> ACI 209R-92	Units KN, m, C	CEB-FIP Parameters
Time Dependence Considered For <input checked="" type="checkbox"/> Compressive Strength and Stiffness (Modulus of Elasticity) <input checked="" type="checkbox"/> Creep		Cement Type Coefficient: 0,2 Relative Humidity %: 70, Notional Size, h: 0,19 Shrinkage Coefficient, Bsc: 8, Shrinkage Start Age (days): 0,

Figura 4 - Propriedades Dependentes do Tempo.

As propriedades do material definidas acima, aplicam-se a todos os elementos estruturais definidos na Figura 2, exceto a espessura fictícia que deve ser calculada segundo os anexos da Norma Brasileira 6118:2014.

Modelo prático (M_{PRA})

O M_{PRA} apresenta dados iguais ao M_{SIM} , diferenciando quanto a seção transversal atuada pelo esforço axial, modificando o dado de entrada para 0,8, ou seja, estabelecendo uma área fictícia que reduz em 20% a seção atuante.

Carregamentos

Modelo simples e prático

Os carregamentos impostos na estrutura do M_{SIM} e o M_{PRA} , são os carregamentos de peso próprio, alvenaria (distribuídas de maneira linear sobre todas as vigas do pavimento), revestimentos da laje (contra piso, piso e gesso) e sobre carga de uso e ocupação no valor de 3 kN/m² (Norma Brasileira 6120:1980, p.1).

O cálculo do peso próprio dos elementos estruturais não serão necessários, pois o programa faz este cálculo automaticamente a partir de um caso de carga chamado “DEAD”.

Para a majoração das cargas, as mesmas serão multiplicadas por um coeficiente de 1,4 resultando em:

- Alvenaria ($P_{P(ALV)}$) = 8 kN/m
- Sobrecarga (SC) = 4,2 kN/m²
- Contrapiso/Forro (CP/F) = 1,7kN/m²
- Piso (P) = 0,6 kN/m²

Modelo refinado

As cargas para o M_{REF} serão as mesmas utilizadas no M_{SIM} , no entanto, neste modelo, foi considerado os efeitos dependentes do tempo, levando a estrutura a uma deformação durante a construção, desta forma, deve ser levado em conta o dia em que os carregamentos serão impostos a estrutura demonstrados na tabela 1.

Será considerado um ciclo de sete dias para este edifício, visto que no Distrito Federal se costuma fazer a concretagem dos elementos estruturais de um pavimento por semana.

O efeito do cimbramento não será levado e conta neste edifício, visto que as escoras geralmente são retiradas gradativamente no intervalo de vinte e oito dias. No entanto, a hipótese adotada para este modelo consiste na retirada de 100% das escoras ao sétimo dia



depois de concretado o pavimento, em outras palavras, depois de sete dias o peso próprio dos elementos estruturais do pavimento passam a fazer parte do modelo.

Tabela 1: Cronograma de entrada dos carregamentos.

Estágio	Dias	Cargas				
		Peso próprio	Alvenaria	Forro/Contrapiso	Piso	Ocupação
1	7°	1° Pav.				
2	14°	2° Pav.				
3	21°	3° Pav.				
4	28°	4° Pav.				
5	35°	5° Pav.				
6	42°	6° Pav.				
7	49°	7° Pav.				
8	56°	8° Pav.				
9	63°	9° Pav.	1° Pav.			
10	70°	10° Pav.	2° Pav.	1° Pav.		
11	77°	11° Pav.	3° Pav.	2° Pav.	1° Pav.	
12	84°	12° Pav.	4° Pav.	3° Pav.	2° Pav.	
13	91°	13° Pav.	5° Pav.	4° Pav.	3° Pav.	
14	98°	14° Pav.	6° Pav.	5° Pav.	4° Pav.	
15	105°	15° Pav.	7° Pav.	6° Pav.	5° Pav.	
16	112°	16° Pav.	8° Pav.	7° Pav.	6° Pav.	
17	119°	17° Pav.	9° Pav.	8° Pav.	7° Pav.	
18	126°	18° Pav.	10° Pav.	9° Pav.	8° Pav.	
19	133°	19° Pav.	11° Pav.	10° Pav.	9° Pav.	
20	140°	20° Pav.	12° Pav.	11° Pav.	10° Pav.	
21	147°		13° Pav.	12° Pav.	11° Pav.	
22	154°		14° Pav.	13° Pav.	12° Pav.	
23	161°		15° Pav.	14° Pav.	13° Pav.	
24	168°		16° Pav.	15° Pav.	14° Pav.	
25	175°		17° Pav.	16° Pav.	15° Pav.	
26	182°		18° Pav.	17° Pav.	16° Pav.	
27	189°		19° Pav.	18° Pav.	17° Pav.	
28	196°		20° Pav.	19° Pav.	18° Pav.	
29	203°			20° Pav.	19° Pav.	
30	210°				20° Pav.	
31	365°					Todos os Pavimentos

Todos os estágios são definidos com duração de sete dias para representar o ciclo dos pavimentos. Entre os estágios trinta e um e trinta e cinco, a duração muda. Estes valores são referentes a um tempo acumulado respectivamente de 1, 2, 5, 20 e 50 anos e serão mostrados

os momentos fletores e esforços axiais atuantes nos pilares da estrutura ao final dos estágios 31, 34 e 35.

Resultados e discussão

Após o processamento dos dados, foram retirados do programa SAP2000 (2009) os esforços axiais e momentos fletores nos pilares ao final de cada estágio de carregamento. Tendo em vista que o prédio é simétrico e com um pilar centralizado, os pilares apresentam momentos fletores iguais nos dois planos de análise, com exceção do P3 que não possui momentos em nenhum dos modelos como mostra a Figura 5.

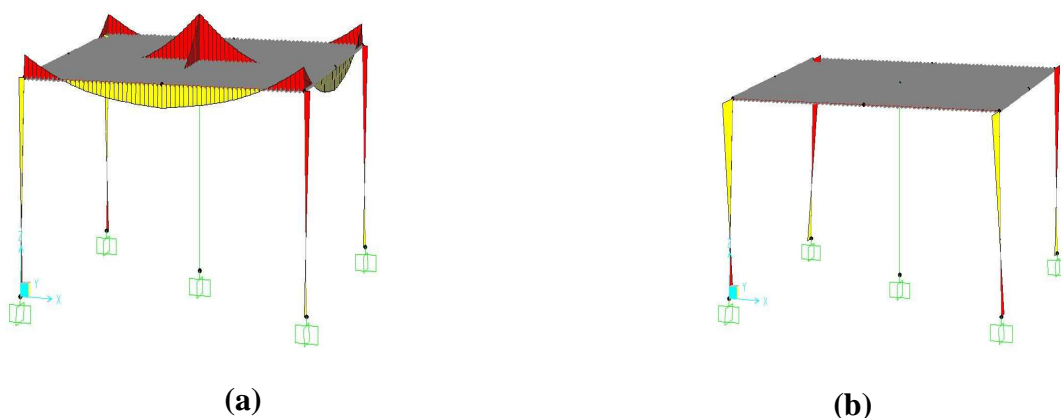


Figura 5 – (a) Momentos fletores no Eixo X-Z e (b) Momentos fletores no Eixo Y-Z.

Para efeito de esclarecimento, a Tabela 2 mostra os dados referentes aos momentos fletores e as normais atuantes nos pilares de acordo com os períodos relevantes em cada modelo, explicitando os resultados obtidos nos modelos refinado (M_{REF}), simples (M_{SIM}), e prático (M_{PRA}) localizados no primeiro pavimento. No M_{SIM} foi considerado apenas características do material e deslocamentos dos nós para obtenção de esforços, isto é, uma análise linear tri dimensional bem difundida entre os projetistas. O M_{REF} abrange os efeitos dependentes do tempo com datas predefinidas de carregamentos que influenciam diretamente na redistribuição dos esforços. Já no M_{PRA} foi realizada uma redução de 20% da rigidez axial dos pilares para representar uma prática utilizada entre os projetistas.

Tabela 2 – Esforços atuantes no primeiro pavimento.

MODELO REFINADO (M_{REF})						
ESTÁGIOS	PERÍODO	Momentos	1º Pavimento			
			MOMENTO FLETOR (M_d)		NORMAL (N_d)	
			P1=P2=P4=P5 (kN.m)	P3 (kN.m)	P1=P2=P4=P5 (kN)	P3 (kN)
31º	1 ano	MA(máx)	-10,19	-	2124,87	6133,94
		MB	4,06	-		



34°	20 anos	MA(máx)	-8,91	-	2188,30	5880,21
		MB	1,77	-		
35°	50 anos	MA(máx)	-8,73	-	2204,06	5817,15
		MB	1,55	-		

MODELO SIMPLES (M_{SIM})

ESTÁGIOS	Momentos	1° Pavimento			
		MOMENTO FLETOR (M_d)		NORMAL (N_d)	
		P1=P2=P4=P5 (kN.m)	P3 (kN.m)	P1=P2=P4=P5 (kN)	P3 (kN)
1	MA(máx)	-12,51	-	2126,93	5715,28
	MB	6,17	-		

MODELO PRÁTICO (M_{PRA})

ESTÁGIOS	Momentos	1° Pavimento			
		MOMENTO FLETOR (M_d)		NORMAL (N_d)	
		P1=P2=P4=P5 (kN.m)	P3 (kN.m)	P1=P2=P4=P5 (kN)	P3 (kN)
1	MA(máx)	-12,85	-	2258,29	5189,85
	MB	6,33	-		

Decorrente da Tabela 2, foram tomadas as seguintes análises em relação aos pilares do primeiro pavimento:

- No M_{REF} os pilares de canto (P1, P2, P4 e P5) apresentam maior esforço normal e menor momento fletor (no estágio 31) em comparação com o mesmo do M_{SIM} e decorrente do aumento de idade (estágio 35), da estrutura, os dois parâmetros se tornam maiores quando, de novo, comparado ao M_{SIM} ;
- Por se tratar de pilar com maior rigidez o P3 sempre apresenta o maior esforço normal, porém quando posto aos critérios de análise do M_{PRA} e comparado com o mesmo do M_{SIM} , apresenta diferença.

Outro fator usado para comparação dos modelos, foi o dimensionamento da armação em função da envoltória de esforços (feita no programa OBLÍQUA, 2001) e sua taxa de armadura limitada em 4% da seção transversal de concreto, mostrados na Tabela 3 e 4:

Tabela 3 – Pilares de canto

PILAR 25X25 (P1; P2; P4; P5)			
MODELO	SEÇÃO TRANSVERSAL	ENVOLTÓRIA DE DIMENSIONAMENTO	TAXA DE ARMADURA(%)
PRÁTICO	<p>8 N1 \varnothing 20</p>	<p>Diagrama de Interação</p>	4,00

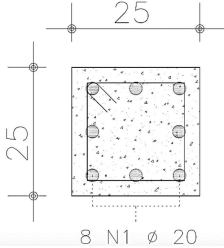
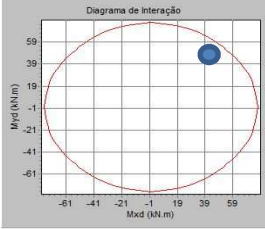
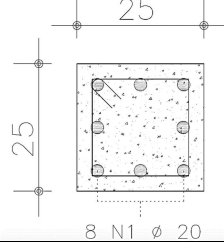
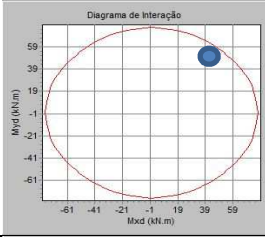
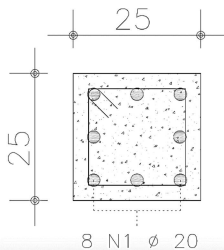
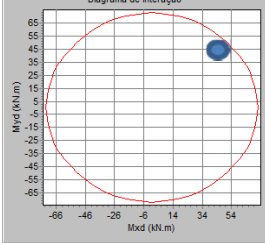
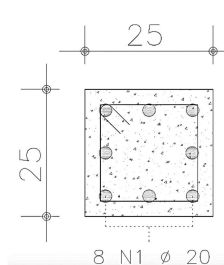
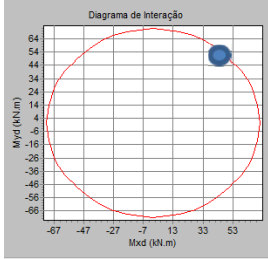
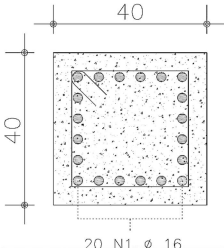
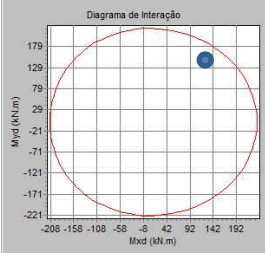
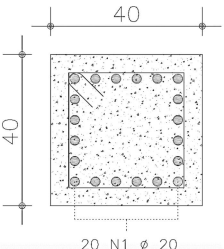
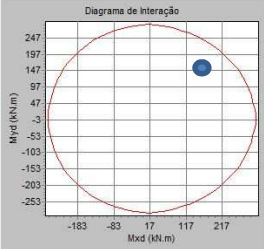
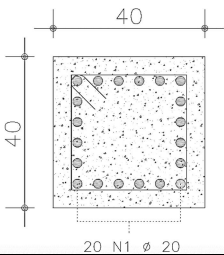
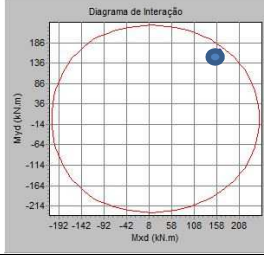
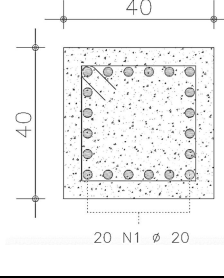
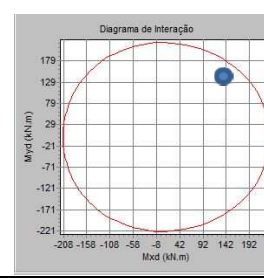
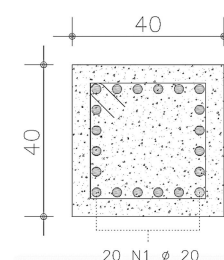
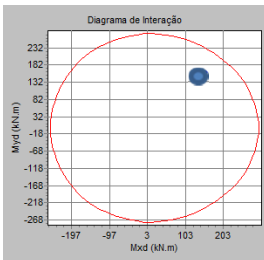
SIMPLES	 <p>25 25 8 N1 Ø 20</p>	 <p>Diagrama de Interação</p>	4,00
REFINADO (1 ano)	 <p>25 25 8 N1 Ø 20</p>	 <p>Diagrama de Interação</p>	4,00
REFINADO (20 anos)	 <p>25 25 8 N1 Ø 20</p>	 <p>Diagrama de Interação</p>	4,00
REFINADO (50 anos)	 <p>25 25 8 N1 Ø 20</p>	 <p>Diagrama de Interação</p>	4,00

Tabela 4 – Pilar central

PILAR 40X40 (P3)

MODELO	SEÇÃO TRANSVERSAL	ENVOLTÓRIA DE DIMENSIONAMENTO	TAXA DE ARMADURA(%)
PRÁTICO	 <p>40 40 20 N1 Ø 16</p>	 <p>Diagrama de Interação</p>	2,51

SIMPLES			3,93
REFINADO (1 ano)			3,93
REFINADO (20 anos)			3,93
REFINADO (50 anos)			3,93

A Tabela 3 mostra que o mesmo arranjo de armaduras satisfaz todos os modelos com exceção do prático. Como mostra a envoltória, a redução da rigidez axial no pilar central redistribuiu os esforços para os pilares do canto até um ponto que o dimensionamento para os outros modelos não foi o suficiente para suportar as cargas.

Já a Tabela 4 mostra o pilar central, que para o modelo prático manteve o arranjo de armadura dos outros modelos, no entanto a redução da rigidez axial possibilitou uma diminuição do diâmetro das barras de ferro neste pilar.

Conclusões e recomendações

No estudo proposto, o modelo refinado foi tomado sempre como referência, por ser uma modelagem, frente às outras analisadas, que mais se aproxima da realidade. Os pilares de canto apresentaram aumento em seus esforços no passar dos anos, isto se deve a fluência que acarretou deformações nestes pilares pela baixa rigidez, já o pilar central transferiu seus esforços para os cantos, resultando em uma redistribuição de esforços no pilar central.



O modelo prático é um modelo onde deve se ter atenção, pois ao reduzir a rigidez axial de um pilar, os esforços vão ser redistribuídos, podendo elevar os esforços nos outros pilares, fugindo de um modelo próximo da realidade, por isso, o projetista precisa conhecer bem o comportamento do modelo, o que torna complexa a substituição de uma análise incremental por uma análise prática. Observe-se ainda que o valor adotado usualmente pelos projetistas, apresentou uma diferença grande, frente a um modelo próximo do real, o que pode levar o calculista a se equivocar na definição das armaduras dos pilares, como mostrado, nas envoltórias, que o P3 teve armadura menor que o necessário e os pilares dos cantos com uma armadura superior a máxima permitida (4% da área de concreto), precisando de mudanças quanto sua seção transversal.

O modelo simples frente ao refinado, mostrou-se satisfatório do ponto de vista de dimensionamento, pois a armadura utilizada nos pilares do modelo simples, mostraram-se dentro do limite da segurança, igualmente visto nos pilares do M_{REF} .

Apesar do M_{REF} , em comparação com os outros modelos, ser o mais próximo da realidade, ele pode ser melhorado com pesquisas futuras, incorporando o ciclo de escoras e reescoras, elementos que flexibilizem a fundação (VITALLI, 2015), análise de vento, consideração de um pórtico assimétrico, entre outros.

Logo o modelo prático se mostrou ineficaz frente a um modelo refinado (com maior precisão), exigindo de cautela para quem for utilizar. Já a análise incremental se mostrou importante, mas não imprescindível para estruturas de concreto convencionais de pequeno porte (casas e prédios de até 20 pavimentos) executadas em Brasília, uma vez que o dimensionamento para os dois modelos foi o mesmo. porém em edifícios como Brookfield Towers e o Burj Khalifa, evidencia-se a importância desse estudo, pois com o aumento da carga de acordo com o acréscimo de andares, a diferença de esforços axiais é evidente, lembrando que os elementos com maior rigidez puxarão maior carga, sendo assim, a área da seção transversal e a quantidade de pavimentos, são os fatores relevantes na tomada de decisão para a consideração ou não do método.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificação. Rio de Janeiro, 1980.
- AUGUSTO, Cicero W. Zandoná; FIGUEIREDO, Maria F. de Oliveira. OBLÍQUA, 1.0. Paraná: Centro de Estudos de Engenharia Civil Professor Inaldo Ayres Vieira (CESEC), 2001.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP 1990: CEB-FIP Model Code 1990. Londres, 1998.
- MÁRIO FRANCO (São Paulo). Instituto de Engenharia. Construção por etapas. 2010. Disponível em: <http://www.iengenharia.org.br/site/videos/exibe/cod_video/4775/canal/461/construcao-por-etapas>. Acesso em: 29 jul. 2015.
- Computers and Structures, Inc., SAP2000, 14, Structural Analysis Program, 2009.
- VITALLI, Maurício. Análise não linear de pórtico espacial com interação solo-estrutura. 2015. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2015.