

ANÁLISE DO LIMITE DO NÚMERO DE PAVIMENTOS EM ESTRUTURAS USUAIS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Floor Limit analysis on Multi-storey usual precast concrete framed structures

Marcelo Cuadrado Marin (1), Mounir Khalil El Debs (2)

(1) Mestrando, EESC-USP, Departamento de engenharia de estruturas
cuadrado@sc.usp.br

(2) Professor Titular, EESC-USP, Departamento de engenharia de estruturas
mkdebs@sc.usp.br

Departamento de Eng. de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
São Carlos, SP

Resumo

Dentre as diversas formas de estabilização das estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado, destaca-se pela empregabilidade o arranjo em que as ligações viga-pilar transmitem momento fletor. O presente trabalho aborda alguns limites de utilização de estruturas de múltiplos pavimentos considerando modulações, condições de solicitação e ligações usuais em estruturas de concreto pré-moldado. A aplicabilidade das ligações viga-pilar semi-rígidas quanto a estabilização da estrutura está condicionada ao nível de esforço solicitante e rigidez necessários para a estabilização da estrutura. A questão que se coloca é o número de pavimentos limite onde é possível adotar tipologias usuais de ligação viga-pilar considerando os momentos fletores positivos e negativos aos quais as ligações estão submetidas.

Palavras-chave: concreto pré-moldado, estabilidade global, ligações semi-rígidas

Abstract

Among the various possibilities to obtain the stabilization of multi-storey precast concrete framed structures, the arrangement at the beam-to-column connection transfer bending moments is emphasized by the employment. This study addresses some limitations of using multi-storey precast concrete framed structures considering modulations, conditions of application and usual connections. The applicability of the beam-to-column semi-rigid connections as the stabilization of the structure is subjected to the level of strength and requesting stiffness for stabilization of the structure. The question is limit the number of floors that's possible adopt usual beam-to-column connection considering the positive and negative bending moments for which connections are subjected.

Keywords: Precast Concrete Structures, Global Stability, Semi-Rigid Connections

1 Introdução

A estabilidade global de estruturas pré-moldadas sofre grande influência de suas ligações, uma vez que a absorção de esforços pela ligação limita a deslocabilidade da estrutura. A ação do vento é uma das ações mais significativas no dimensionamento de uma estrutura em concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos, em uma estrutura isostática a deslocabilidade é maior que em estruturas hiperestáticas e portanto tem efeito de primeira ordem significativo, conseqüentemente influenciando no efeito de segunda ordem. Estes efeitos ocorrem devido a não-linearidade geométrica e sofrem influência não-linearidade física.

A estabilidade global de estruturas de concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos pode ser obtida pelo enrijecimento das ligações viga-pilar ou pela utilização de elementos ou sistemas de contraventamento. Paredes ou painéis estruturais podem servir de contraventamento para a estrutura. Além disto, outra alternativa de contraventamento é a utilização de núcleo de rigidez. ELLIOTT *et al* (1992) sugere uma divisão de sistemas formados por elementos de contraventamento segundo o número de pavimentos. No Brasil, o sistema estrutural usual é constituído por pórticos em que a ligação viga-pilar é semi-rígida. No presente trabalho será avaliado o número de pavimentos limite para o sistema estrutural em pórticos constituídos por ligação semi-rígida com pino chumbador reto e capa de concreto moldada in loco com armadura passante através do pilar.

2 Considerações gerais

2.1 Não-Linearidade geométrica

Os efeitos não lineares geométricos podem ser avaliados basicamente de duas formas, segundo métodos diretos ou iterativos. Dentre os métodos diretos pode ser citado o γ_z , importante indicador da magnitude dos efeitos de segunda ordem. A análise dos efeitos de segunda ordem segundo este método é limitada a um valor de $\gamma_z=1,3$.

Dentre os métodos iterativos podemos citar o método no qual a matriz de rigidez da estrutura é corrigida em virtude da configuração deformada da estrutura, esta forma de análise é considerada não-aproximada e não possui limitações de aplicação. No presente trabalho os esforços atuantes na estrutura como um todo serão avaliados segundo a forma não-aproximada de consideração da não-linearidade geométrica. Além disto serão apresentados os valores de γ_z para cada modelo analisado.

2.2 Não-Linearidade física

A consideração da não-linearidade física pode ser feita de forma aproximada ou não-aproximada. Na forma aproximada a não linearidade física é considerada por meio de reduções da inércia bruta da seção dos elementos. Na forma não-aproximada a consideração é feita segundo o diagrama $M \times N \times 1/r$. Sendo assim é considerado de forma consistente a influência da força normal presente em pilares ou da área e arranjo da armadura passiva e ativa presente em vigas. Além disto, o efeito da fluência pode ser contemplado. No presente trabalho será considerado a forma não-aproximada segundo o diagrama $M \times N \times 1/r$ de cada elemento.

2.3 Ligações semi-rígidas

Em geral as ligações viga-pilar presentes nas estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado apresentam comportamento semi-rígido. Os diagramas momento x rotação das ligações são caracterizados por dois parâmetros importantes, a resistência e a rigidez da ligação. O diagrama momento x rotação da ligação pode ser representado segundo modelo linear, bi-linear, tri-linear ou não linear. No presente trabalho será considerado o modelo linear e bi-linear. No modelo linear será definido apenas a rigidez ao momento positivo e negativo da ligação, não sendo delimitado o momento de plastificação e do trecho correspondente a plastificação. O aspecto do diagrama bi-linear momento x rotação é assimétrico, conforme ilustra a figura 1.

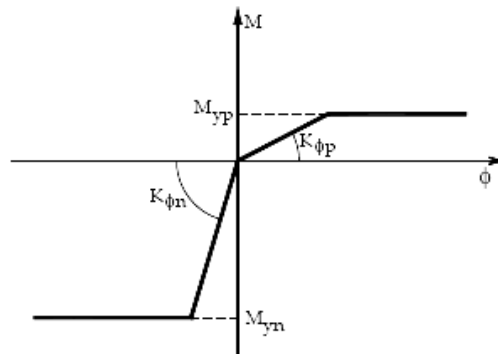


Figura 1 – Diagrama bi-linear momento x rotação [EL DEBS *et al* (2009)]

A assimetria é atribuída à característica e ao mecanismo resistente da ligação viga-pilar das estruturas. O comportamento assimétrico da ligação confere não linearidade ao problema, não sendo válida a superposição de efeitos. A configuração mais usual de ligação viga-pilar nas estruturas de múltiplos pavimentos é ilustrada na figura 2.

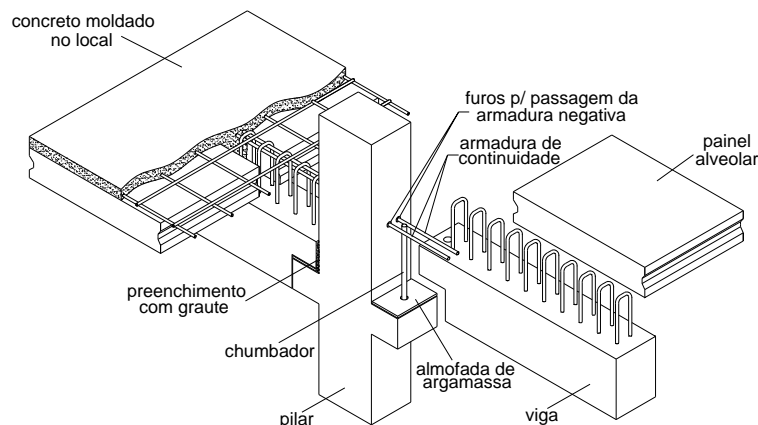


Figura 2 - Ligação viga-pilar semi-rígida com pino chumbador [BALDISSERA (2006)]

2.4 Processo construtivo

O processo construtivo e sua influência nas estruturas em concreto pré-moldado em viga de seção composta pode ser dividido basicamente em duas etapas, na primeira as ligações apresentam comportamento articulado e a estrutura esta submetida a ação do peso próprio das vigas, lajes e da capa úmida de concreto. Em uma segunda etapa, após a capa apresentar resistência, as ligações apresentam comportamento semi-rígido. Nesta

etapa a estrutura é submetida a ação proveniente da carga acidental de ocupação, do revestimento do piso, da alvenaria de vedação e da ação do vento.

2.5 Combinações de ações

Nos exemplos numéricos foram consideradas duas combinações para o ELU, na primeira combinação a ação do vento é considerada como carga acidental principal e a carga acidental de ocupação como secundária, esta combinação tem importância para a verificação da estabilidade global da estrutura como um todo. A segunda combinação não contempla a contribuição da carga acidental de ocupação, a sua verificação é de suma importância na análise das ligações devido ao momento positivo provocado pela ação do vento.

$$F_{d,1} = \gamma_g \cdot G + 1,4(W + 0,7.Q) \quad (1)$$

$$F_{d,2} = \gamma_g \cdot G + 1,4.W \quad (2)$$

3 Análise numérica

Os modelos numéricos analisados foram construídos tendo como referência arranjos, modulações e carregamentos usualmente empregados no sistema construtivo de estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado. A simulação numérica foi feita com o auxílio do programa ANSYS.

Dentre os diversos arranjos estruturais possíveis em planta, foi adotado o arranjo ilustrado na figura 3.

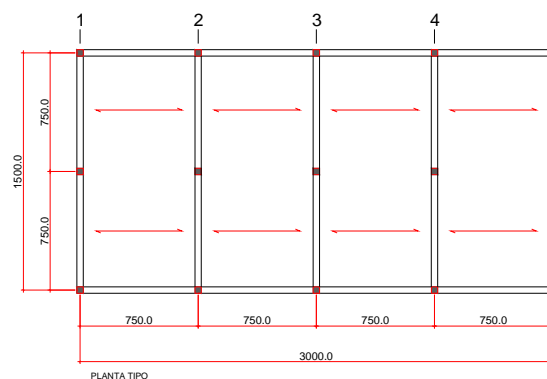


Figura 3- Arranjo estrutural a ser estudado

A modulação estrutural adotada para análise é de 7,5 m, o carregamento acidental adotado proveniente da ocupação é de 3 kN/m² e 5 kN/m². Os dados de carregamento adotados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Dados do exemplo numérico

Q(kN/m ²)	G _{LAJES} (kN/m ²)	G _{CAPA} (kN/m ²)	G _{REVEST.} (kN/m ²)
3-5	2,2	1,5	0,5

Q: carga acidental; G_{LAJES}: peso próprio da laje; G_{CAPA}: peso próprio da capa;

G_{REVEST} : peso próprio do revestimento

O número de pavimentos pré-estabelecido para análise no presente estudo varia de 4 a 6 pavimentos, sendo que a distância entre pavimentos considerada é de 4 m. A análise das estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado se restringiu a 6 pavimentos, tendo em vista o comprimento máximo de pilar usualmente empregado nas estruturas. O comprimento do pilar deve levar em conta condições de produção, transporte e montagem. Desta forma não foi considerado a existência de emendas nos pilares.

As seções adotadas, bem como o arranjo e quantidade de armadura adotada para as seções dos pilares estão apresentados na figura 4. A seção de pilar 40 cm x 40 cm foi utilizada nos modelos com 4 pavimentos, a seção de pilar com 50 cm x 50 cm foi utilizada nos modelos com 5 e 6 pavimentos.

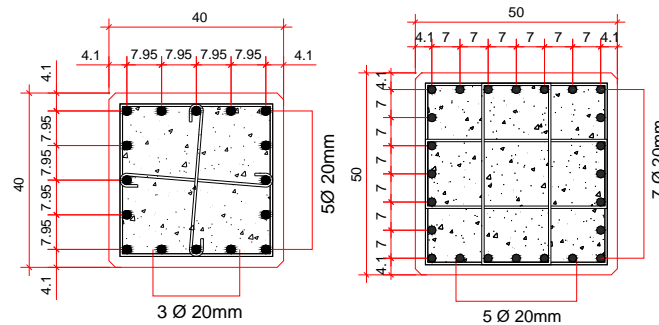


Figura 4 - Seção transversal e disposição de armadura dos pilares em concreto pré-moldado

A seção transversal das vigas em seção composta está ilustrada na figura 5. Foi considerado para efeito de construção do diagrama $M \times N \times 1/r$ o valor de 2 para o coeficiente de fluência, a armadura de pele e de porta estribo presente na seção da viga pré-moldada tiveram sua contribuição desprezada para efeito construção do diagrama $M \times N \times 1/r$.

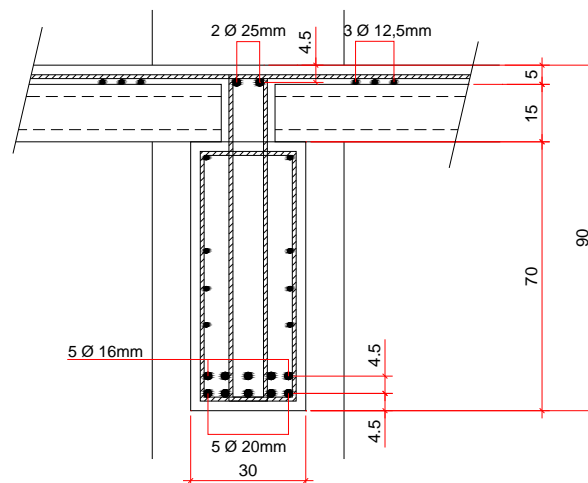


Figura 5 - Seção transversal da viga de concreto pré-moldado em seção composta

A ação do vento para o arranjo selecionado está discriminada em função do número de pavimentos da estrutura e da altura, conforme apresenta a tabela 2. Para todos os exemplos numéricos será considerada a ação do vento com velocidade básica de $V_0 = 45 \text{ m/s}$, fator topográfico $S_1 = 1$ e fator estatístico $S_3 = 1$. O fator S_2 depende da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação em planta e em altura.

Em relação as dimensões da edificação, segundo o item 5.3.2 da NBR 6123:1988 se enquadram na Classe B toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Os arranjos estruturais a serem estudados se enquadram nesta classe. A rugosidade do terreno foi considerada em todos os arranjos segundo a categoria IV, aplicável a terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Os valores apresentados são característicos.

Tabela 2 - Ação do vento

Ação do vento- Direção Y												
Modulo 7,5m				6 PAV			5 PAV			4 PAV		
h(m)	S ₂	V _k (m/s)	q(kN/m ²)	H/L1	C _a	F _a (kN)	H/L1	C _a	F _a (kN)	H/L1	C _a	F _a (kN)
4	0,76	34,20	0,72	0,80	1,24	26,67	0,67	1,21	26,03	0,53	1,18	25,38
8	0,80	36,00	0,79	0,80	1,24	29,55	0,67	1,21	28,84	0,53	1,18	28,12
12	0,85	38,25	0,90	0,80	1,24	33,36	0,67	1,21	32,56	0,53	1,18	31,75
16	0,89	40,05	0,98	0,80	1,24	36,58	0,67	1,21	35,69	0,53	1,18	17,41
20	0,91	40,95	1,03	0,80	1,24	38,24	0,67	1,21	18,65			
24	0,93	41,85	1,07	0,80	1,24	19,97						

h.: cota do pavimento; H: altura da estrutura; V_k: Velocidade característica;

S₂: Fator que compõe V_k, q: pressão dinâmica; L1: maior dimensão da edificação em planta; C_a: Coeficiente de arrasto; F_a: Força de arrasto

A formulação analítica para caracterizar a resistência e a rigidez das ligações adotada no presente trabalho está apresentada em EL DEBS *et al* (2009).

Na tabela 3 estão discriminados os principais parâmetros de caracterização das ligações, a tabela está dividida em ligações viga-pilar central (PC) e ligações viga-pilar lateral (PL). Nos modelos numéricos a viga será constituída de dente gerber e chumbador com f_{yd}=209 MPa.

Tabela 3 - Rigidez e momentos resistentes da ligação

	PC		PL		PC/PL		
	M _{neg(1)}	M _{neg(2)}	M _{neg(1)}	M _{neg(2)}	M _{pos(3)}	M _{pos(4)}	M _{pos(5)}
K (MN.m/rad)	121,34	430,96	65,13	213,45	10,41	14,96	41,76
M _{yd} (kN.m)	309,21	583,26	193,25	349,85	38,71	55,74	93,14

PC (Pilar Central); PL (Pilar Lateral);

(1)Viga com extremidade em dente gerber;

(2)Viga com extremidade sem recorte;

(3) Viga com extremidade em dente gerber e chumbador com f_{yd}=209 MPa;

(4) Viga com extremidade em dente gerber e chumbador com f_{yd}=435 MPa;

(5) Viga com extremidade sem recorte, chumbador com f_{yd}=435 MPa;

A diferença encontrada tanto para o momento resistente, bem como para rigidez associada ao momento negativo para a ligação junto ao pilar central e lateral decorre do fato de não haver ancoragem para as barras que passam na capa de concreto nos pilares laterais, no caso em estudo isto provoca uma redução na área de amadura de 17,5 cm² para 10 cm². Nos pilares laterais a armadura negativa das vigas será ancorada em luvas de aço junto ao pilar, nos pilares centrais a armadura será disposta em furos passantes

através do pilar e junto ao nível da capa moldada in loco ao lado do pilar. Foram utilizados dois chumbadores com 20 mm de diâmetro na ligação consolo-viga para o combate ao momento positivo solicitante da ligação.

O desempenho da estrutura será avaliado segundo o modelo estrutural de pórtico plano, segundo o eixo 3 da planta ilustrada na figura 3.

Nas figuras 6, 7, e 8 estão ilustrados gráficos comparativos de valores obtidos de momento positivo, negativo junto ao pilar central e negativo junto ao pilar lateral para as estruturas com 4, 5 e 6 pavimentos. As cargas acidentais avaliadas foram de 3 kN/m² e 5 kN/m². A combinação de ações envolvida na avaliação do momento negativo junto ao pilar central e lateral foi a 1ª combinação de ações. A combinação de ações envolvida na avaliação do momento positivo foi a 2ª combinação de ações.

Nos resultados apresentados a seguir a ligação foi modelada segundo comportamento elástico linear.

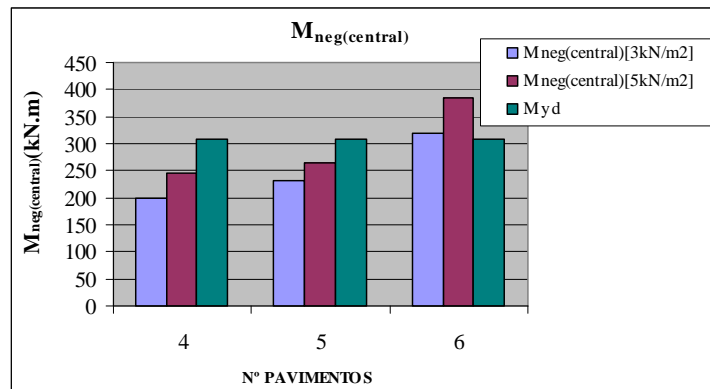


Figura 6: Análise comparativa para momento fletor negativo na ligação junto ao pilar central segundo a 1ª combinação

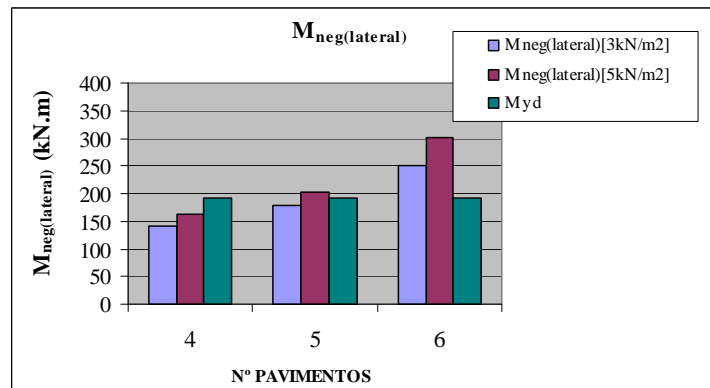


Figura 7: Análise comparativa para momento fletor negativo na ligação junto ao pilar lateral segundo a 1ª combinação

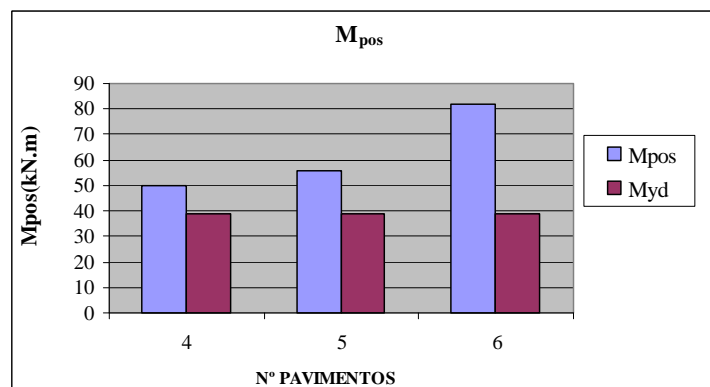


Figura 8: Análise comparativa para momento fletor positivo na ligação segundo a 2ª combinação

O parâmetro de estabilidade γ_z foi avaliado segundo as variações de carga acidental e número de pavimentos para a 1ª combinação de ações, conforme ilustra a figura 9.

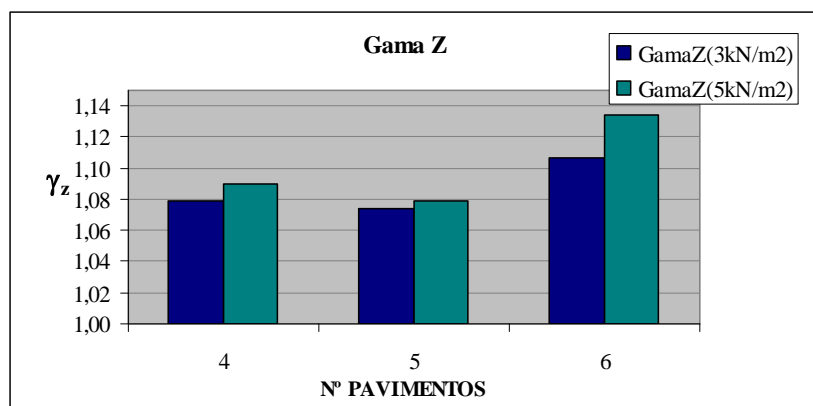


Figura 9 - Parâmetro de estabilidade γ_z segundo 1ª combinação de ações

Segundo os resultados apresentados, para a 1ª combinação de ações apenas a estrutura com 4 pavimentos e a estrutura de 5 pavimentos com carga acidental de ocupação de 3 kN/m² atenderam a capacidade resistente das ligações sem necessidade de consideração de plastificação. Analisando os resultados apresentados, nota-se que não há proporcionalidade entre os valores encontrados para os esforços nas ligações e o γ_z quando se comparam os valores entre as estruturas com 6, 5 e 4 pavimentos. Vale ressaltar que no modelo com 4 pavimentos a dimensão do pilar é de 40 cm x 40 cm, já nos modelos com 5 e 6 pavimentos a dimensão do pilar é de 50 cm x 50 cm. Portanto, em virtude desta diferença na dimensão dos pilares, não há uma linearidade nos resultados apresentados.

Para a 2ª combinação de ações, nenhuma estrutura atendeu ao momento fletor positivo resistente da ligação considerando o modelo elástico linear.

Foi realizada uma nova simulação numérica considerando o modelo elasto-plástico da ligação viga-pilar. A máxima rotação considerada ao momento negativo e ao momento positivo foi 0,01rad, ou seja, 10‰.

A consideração do modelo de ligação elasto-plástico permitiu uma nova distribuição de esforços na estrutura, sendo assim respeitando a capacidade resistente das ligações. Em virtude da plastificação nas ligações as estruturas se tornaram mais deslocáveis, no entanto este acréscimo de deslocabilidade não provocou efeitos de segunda ordem significativos. Apenas a estrutura com 6 pavimentos sob carregamento acidental de 5 kN/m² não foi capaz de redistribuir os esforços presentes nas ligações, desta forma não houve convergência na obtenção dos resultados.

A figura 10 ilustra os valores de γ_z obtidos para as diferentes combinações de ações considerando a plastificação da ligação.

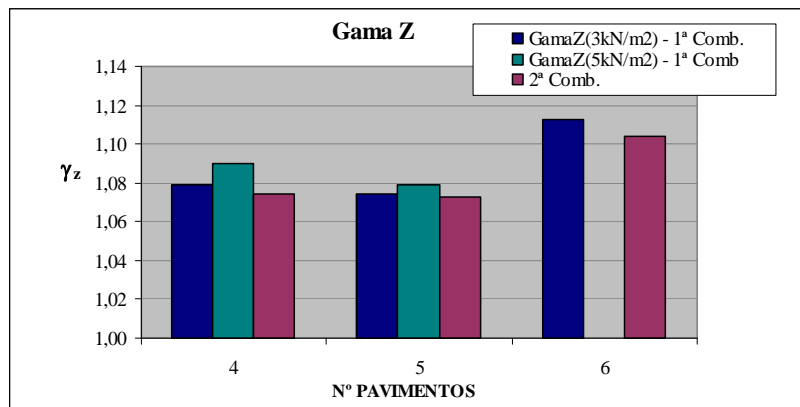


Figura 10 - Parâmetro de estabilidade γ_z segundo modelo elasto-plástico de ligação

O dimensionamento da estrutura no estado limite último levando-se em conta a plastificação das ligações é permitida, no entanto deve ser verificado desempenho das ligações para efeito de dimensionamento no estado limite de serviço.

Com intuito de viabilizar o dimensionamento de estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado, adota-se em geral as seguintes ações no incremento da capacidade resistente das ligações:

- Adotar extremidade da viga em apoio sem recorte, aumentando desta forma a seção, bem como a altura útil da armadura junto à ligação viga-pilar.
- Aumentar o espaço disponível para ancoragem da armadura negativa junto a ligação viga-pilar de extremidade com o auxílio de vigas com abas, conforme ilustra a figura 11. Vigas com seção "I" também podem ser utilizadas para melhor acomodar o apoio da laje e a armadura negativa.

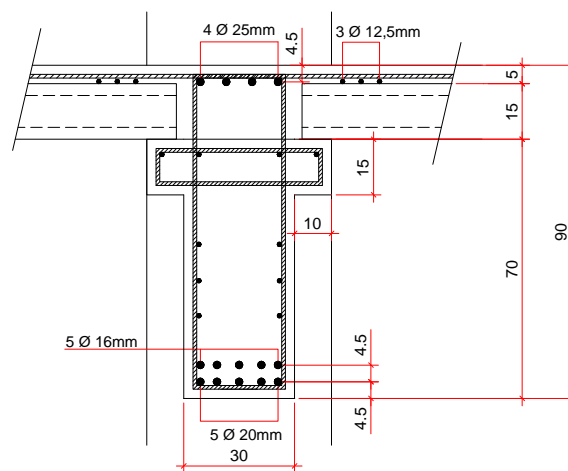


Figura 11 - Seção de viga alterada pela adoção de abas

- Inclinarm o chumbador com intuito de aumentar a momento positivo resistente da ligação, conforme apresentado em BALDISSERA (2006).
- Adotar aço com tensão de escoamento de alta resistência no chumbador.
- Adotar para a ligação viga-consolo chapa soldada, conforme apresentado em FERREIRA (1999).

4 Considerações finais e conclusões

No presente trabalho foram analisados os principais fatores no dimensionamento de estruturas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado. Foram contempladas as principais combinações de ações envolvendo situações críticas de dimensionamento tendo em vista preservar a integridade das ligações e da estrutura como um todo.

A não-linearidade física foi avaliada segundo o diagrama $M \times N \times 1/r$, apresentou-se valores de γ_z como indicadores da não-linearidade geométrica presente nos modelos.

Indicações de como incrementar a resistência e a rigidez das ligações viga-pilar foram apontadas.

Foram verificadas as limitações de utilização de estruturas usuais de múltiplos pavimentos considerando ligações semi-rígidas viga-pilar típicas, foram explorados os modelos elásticos e elasto-plásticos das ligações.

Os resultados da modelagem numérica indicam a viabilidade de projeto de estruturas com até 6 pavimentos em concreto pré-moldado.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP e da LEONARDI CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA ao projeto de pesquisa.

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 (2006). **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 (1985). **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2003). **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123 (1988). **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro - RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 (2003). **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ.

BALDISSERA, A. (2006). **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado resistente a momento fletor**. Dissertação. (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

EL DEBS, M.K.; MIOTTO, A.M.; EL DEBS, A.L.H.C (2009) **Analysis of a semi-rigid Connection for precast concrete**. Buildings & Structures. [aceito para publicação]

EL DEBS, M. K. (2000). **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 1ª. ed. São Carlos, SP, Publicação EESC-USP.

ELLIOTT, K.S.;TOVEY, A.K. (1992). **Precast concrete frame buildings: design guide**. Crowthorne, Berkshire, British Cement Association.

FERREIRA, M.A., (1999). **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. São Carlos, Tese (Doutorado), EESC-USP.