

Modelagem e análise do efeito da rigidez das ligações na estabilidade global em edifícios de concreto pré-moldado

Design and analysis of connection stiffness effects on the global stability of precast concrete buildings

Luciana Souza Paes de Barros (1); Gabriel Moreira Migliore (1); Alex Sander Clemente de Souza (2); Marcelo de Araujo Ferreira (2)

(1) Engenheiro (a) Civil, Universidade Federal de São Carlos

(2) Professor Doutor, PPGECiv, Universidade Federal de São Carlos
PPGECiv/UFSCar, Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, CEP 13565-905

Resumo

A análise estrutural é uma das etapas mais importantes na concepção de edificações, uma vez que seus resultados influenciam diretamente nas etapas posteriores de projeto. Em estruturas de concreto pré-moldado, o comportamento das ligações constitui uma particularidade pois influencia em deslocamentos, distribuição de esforços e estabilidade da estrutura. Neste artigo, foi proposta a análise de dois edifícios em concreto pré-moldado, com 3 e 5 pavimentos, variando entre 6 tipos diferentes de ligação, afim de comparar a estabilidade global do edifício quando se adotam ligações rígidas, semirrígidas e articuladas, com auxílio do programa comercial STRAP. Conforme apresenta a nova versão da ABNT NBR 9062:2017, a não-linearidade física, referente ao comportamento das ligações semirrígidas, pode ser considerada através do cálculo da rigidez secante das ligações (R_{sec}), por meio de equações analíticas. Dentre os métodos consagrados na literatura, este artigo aborda o uso do coeficiente γ_z e do processo P- Δ para comparação dos efeitos de segunda ordem decorrentes das ações de vento. O coeficiente γ_z se mostrou um método eficiente para estimativa dos efeitos de segunda ordem nas estruturas, e de modo geral, convergiu com processo P- Δ . Notou-se que, com o aumento da altura dos edifícios, o efeito da variação da rigidez das ligações é mais proeminente.

Palavras-chave: Estabilidade global, pré-moldado, ligações, análise estrutural, rigidez.

Abstract

Structural analysis is one of the most important steps in building designing concerning that its results directly influence on the subsequent design steps. Regarding the precast concrete structures, the connection behavior is a peculiarity as it interferes in displacements, stress distribution and structural stability. This article aimed to analyze two precast concrete storey building, with 3 and 5 stories, varying its connections between 6 types, in order to compare the global stability results for buildings modeled with rigid, semi-rigid and pinned connections, using the software STRAP. According to the latest version of ABNT NBR 9062:2017, the material nonlinearity associated with the semi-rigid behavior of connections can be considered by calculating its secant stiffness (R_{sec}), using the proposed analytical equations. It was proposed the comparison between second-order effects due to wind load actions by the calculation of the γ_z parameter and P- Δ process. Both processes converged, confirming the effectiveness of using the γ_z parameter when estimating the second order effects on precast structures. Finally, it can be affirmed that the influence of the connections stiffness variation is higher as the building height increases.

Keywords: global stability, precast concrete, connections, structural analysis, stiffness.

1 Introdução

Os sistemas estruturais em concreto pré-moldado possuem uma particularidade proveniente da necessidade de solidarizar/unir seus elementos estruturais na fase de montagem e ereção das obras. As ligações responsáveis por unir vigas e pilares são regiões de grande interesse de estudo, uma vez que seu comportamento influencia no comportamento global das estruturas em concreto pré-moldado.

A estabilidade é indispensável no estudo de tais estruturas, nas quais a deslocabilidade de primeira ordem é influenciada pelo comportamento das ligações viga-pilar, o que, por sua vez, afeta a análise de segunda ordem. Estruturas com ligações viga-pilar articuladas apresentam deslocabilidades elevadas, impossibilitando sua aplicação em edifícios com mais de 4 pavimentos. Por outro lado, mesmo quando se têm ligações viga-pilar com resistência à flexão, em virtude de deformações localizadas nestas ligações, as estruturas pré-moldadas ainda apresentam uma deslocabilidade superior a de uma estrutura com ligações rígidas (ARAÚJO, FERREIRA & EL DEBS, 2006).

Sabe-se que, usualmente, são adotados modelos teóricos ideais para o cálculo da rigidez de ligações, baseando-se em hipóteses simplificadas. Esses modelos são a rótula e o engaste. Na realidade, todas as ligações possuem comportamento semirrígido, na medida em que não se consegue restringir totalmente as rotações relativas nas ligações viga-pilar. Quanto à análise estrutural, sabe-se que esta consiste em uma das etapas mais importantes na concepção de edificações, uma vez que seus resultados influenciam diretamente nas etapas posteriores de projeto. Os critérios e métodos utilizados para a avaliação da estabilidade global, em relação ao comportamento real das estruturas, podem ser abordados de maneira simplificada ou por meio de processos mais rigorosos. A não linearidade física (NLF) associada aos elementos estruturais é considerada de maneira aproximada por meio de simples redução da inércia bruta de suas seções transversais. A Tabela 1 apresenta as rigidezes sugeridas em norma para as estruturas em concreto armado e pré-moldado.

Tabela 1- Comparação entre rigidezes.

Elemento	NBR 6118:2014	NBR 9062:2017	ACI 318M-14
Lajes	$0,3E_{ci}I_c$	$0,25E_{ci}I_c$	$0,25E_cI_c$
Vigas	$0,4E_{ci}I_c$ se $A'_s \neq A_s$	$0,8E_{ci}I_c$ para CP	$0,35E_cI_c$
	$0,5E_{ci}I_c$ se $A'_s = A_s$	$0,5E_{ci}I_c$ para CA	
Pilares	$0,8E_{ci}I_c$	$0,4E_{ci}I_c^{(1)}$	$0,7E_cI_c$
		$0,55E_{ci}I_c^{(2)}$	
		$0,7E_{ci}I_c^{(3)}$	
(1) para estruturas com ligação viga-pilar articulada com 01 pavimento ou galpão			
(2) para estruturas com ligações semirrígidas com até 04 pavimentos			
(3) para estruturas com ligações semirrígidas com 05 ou mais pavimentos			

em que E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente do concreto; I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto; A_s a armadura de tração; A'_s a armadura de compressão; CP concreto protendido e CA concreto armado.

De forma mais rigorosa, a consideração é feita segundo o diagrama $M \times N \times 1/r$. Sendo assim, é considerada 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 disso, o efeito da fluência pode ser contemplado, conforme afirmam Marin & El Debs, 2016. Marin (2009) realizou um estudo acerca da influência das não linearidades física e geométrica sobre a estabilidade global em estruturas de concreto pré-moldado. Nesta pesquisa observa-se que os coeficientes redutores de rigidez obtidos segundo o diagrama $M \times N \times 1/r$ divergem das indicações normativas, principalmente sob efeito da fluência, força normal e armadura ativa. Para vigas com armadura passiva, a consideração da NLF através do diagrama $M \times N \times 1/r$ ou da rigidez secante não provoca alterações significativas nos resultados.

A não linearidade geométrica (NLG) das estruturas ocorre pois a relação entre esforços e deslocamentos não é linear. Esta ganha maior importância quando os deslocamentos excessivos podem comprometer a estabilidade da estrutura (MARIN, 2009). As normas brasileiras ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2017 apresentam métodos aproximados para consideração da NLG e avaliação da necessidade de análise dos esforços de segunda ordem nas estruturas. A ABNT NBR 9062:2017 permite que se utilize o método do coeficiente γ_z para análise da estabilidade de estruturas pré-moldadas, ainda que estas possuam menos de 4 pavimentos, desde que a estrutura seja regular, não ocorrendo discrepâncias significativas entre pavimentos sucessivos, nem variações bruscas entre o momento de inércia dos pilares em pavimentos sucessivos. O coeficiente γ_z é um método simplificado para avaliação da estabilidade global e efeitos de segunda ordem nas estruturas de concreto. Proposto por Franco e Vasconcelos (1991), o coeficiente γ_z pode ser obtido através da equação seguinte.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento, que equivale a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura, e $\Delta M_{tot,d}$ é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos na análise de primeira ordem.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2017 esse método é válido apenas para valores de $\gamma_z \leq 1,3$. A determinação dos esforços globais de 2ª ordem (esforços finais de 1ª ordem + 2ª ordem) é realizada a partir da majoração dos esforços horizontais de 1ª ordem, na combinação considerada, pelo coeficiente γ_z . A ABNT NBR 9062:2017 recomenda a majoração dos esforços de 1ª ordem por $0,95\gamma_z$ quando $1,10 \leq \gamma_z \leq 1,20$. Recomenda-se majorar os esforços em $1,00\gamma_z$ se $1,20 \leq \gamma_z \leq 1,30$. Para valores de γ_z superiores a 1,30 recomenda-se a utilização de processos mais rigorosos para avaliar os efeitos de segunda ordem na estrutura.

O método da carga lateral fictícia, ou P- Δ , consiste em um processo iterativo em que se inserem forças horizontais fictícias na estrutura. Os deslocamentos entre pavimentos, provocados pelas ações horizontais em uma análise de primeira ordem, geram momentos

provocados pela excentricidade da carga vertical de cada pavimento. Esses momentos podem ser substituídos por binários de carga lateral fictícia. Uma vez determinada tal carga – devido aos esforços de 1ª ordem – a estrutura é analisada novamente em uma primeira iteração. Com os deslocamentos referentes a primeira iteração, a carga lateral fictícia da 1ª iteração é somada à força horizontal de 1ª ordem, fornecendo deslocamentos para uma segunda iteração, e assim sucessivamente. A Figura 1 ilustra o esquema das etapas do método.

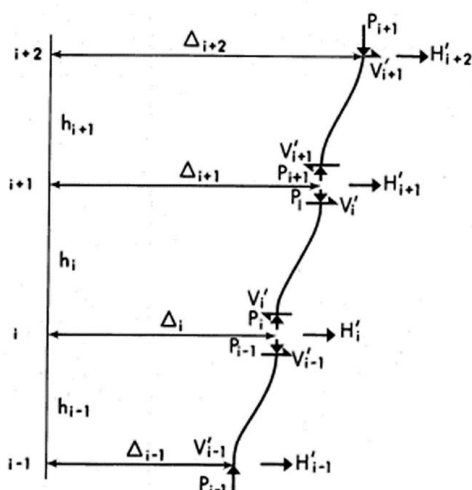


Figura 1 - Forças laterais devido aos carregamentos verticais. (MATHEWS & MACGREGOR (1977))

Este artigo tem o intuito de discutir a estabilidade global de um edifício em concreto pré-moldado, considerando as não linearidades físicas e geométrica. Para tal, foram utilizados os métodos e critérios propostos nesse item, sendo que a não linearidade física associada ao comportamento das ligações viga-pilar é discutida no item subsequente.

2 Não linearidade física associada a ligações pré-moldadas viga-pilar

Devido a não linearidade física atrelada ao comportamento das ligações, em estruturas pré-moldadas, a análise estrutural depende da representação adequada da rigidez destas ligações. A relação entre o esforço de momento fletor no elemento estrutural e sua rotação é caracterizada por meio da rigidez. Para ligações estruturais, essa relação não é linear, de modo que a cada ponto da curva momento-rotação o valor da rigidez varie em diferentes taxas de proporção. A não linearidade dessa curva pode ser caracterizada de maneira rigorosa, trecho a trecho, com auxílio de métodos matemáticos e programas computacionais. A rigidez secante é uma maneira aproximada de se considerar a não linearidade física das ligações.

É possível encontrar diferentes abordagens para aproximação da rigidez por meio da rigidez secante nos trabalhos de Gibbons et al (1996), Gorgun (1997), Soares (1998) e Ferreira (1999). A resposta momento-rotação ($M - \theta$) de uma ligação viga-pilar é bem representada pela rigidez rotacional secante (R_{sec}) obtida da relação entre o momento resistente da ligação e sua rotação ao primeiro escoamento da armadura longitudinal (FERREIRA & ELLIOTT, 2010). Esse modelo de cálculo é atualmente proposto na norma

ABNT NBR 9062:2017 para o cálculo da rigidez de ligações semirrígidas. A representação da curva $M - \theta$ pode ser observada na Figura 2.

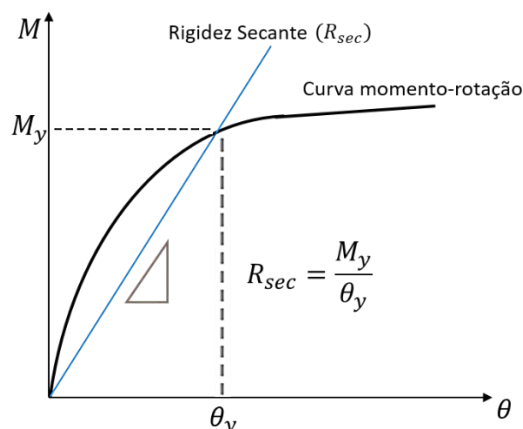


Figura 2 - Curva momento-rotação

Na etapa de projeto, ainda não se dispõe dos valores de M_y e θ_y , sendo necessária outra alternativa para estimar a rigidez das ligações e, por consequência, a deslocabilidade da estrutura. Por meio da análise de resultados experimentais – disponíveis na literatura – e dos parâmetros inerentes ao comportamento de uma ligação em concreto pré-moldado, Ferreira (2014) propôs um modelo simplificado de equação analítica para o cálculo da rigidez secante a partir de parâmetros relacionados com propriedades mecânicas e geométricas da ligação. A equação é dada por:

$$R_{sec} = \frac{kA_s E_s d^2}{L_{ed}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde k é o coeficiente de ajustamento da rigidez secante, A_s é a armadura de continuidade negativa, E_s é o módulo de elasticidade do aço, d é a altura útil da seção resistente da armadura de continuidade negativa e L_{ed} é comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade. Valores recomendados de k e L_{ed} para as ligações típicas previstas em norma encontram-se indicados na ABNT NBR 9062:2017. Esse artigo aborda as ligações típicas 1, 2, 3 e 4 – apresentadas na Figura 3 – juntamente com os coeficientes necessários ao cálculo da rigidez secante.

Para tipologias de ligação viga-pilar não contempladas em norma, recomenda-se que o valor da rigidez secante seja validado experimentalmente. Resultados baseados em procedimentos puramente experimentais são, na maioria das vezes, caros e limitados quanto ao uso de resultados, por serem aplicáveis apenas a ligações de mesmas dimensões e detalhamentos. Essa é uma das razões pela qual se busca o desenvolvimento de modelos analíticos que descrevam adequadamente o comportamento das ligações, e possam ser utilizados na concepção de projetos estruturais.

Outra maneira de facilitar o projeto de ligações é por meio da determinação de ligações pré-qualificadas. Estas são isentas de ensaios e certificados de qualidade para determinação de seu comportamento, quando os materiais e procedimentos utilizados seguirem tabelas



disponíveis em normas e/ou manuais. Tal prática é comum para estruturas em aço, onde há grande padronização de materiais, geometrias, técnicas construtivas, entre outros.

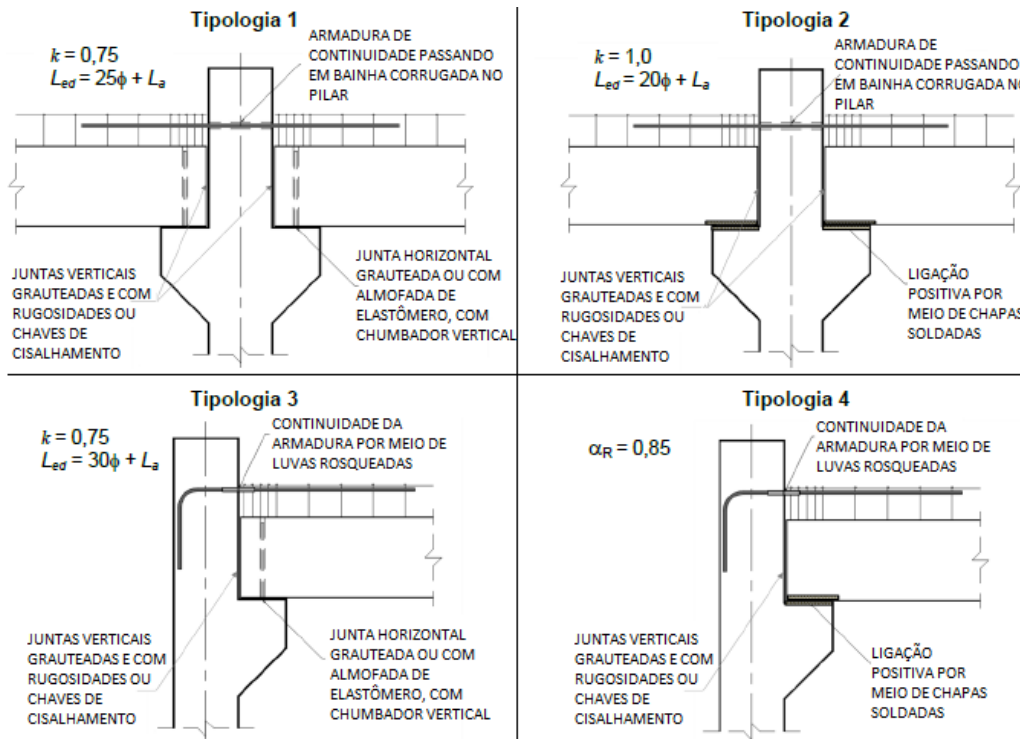


Figura 3 - Ligações viga-pilar típicas. (ADAPTADO DE ABNT NBR 9062:2017)

Onde L_a é a distância da face do pilar até o centro de rotação no consolo e ϕ é o diâmetro equivalente obtido da média ponderada da porcentagem de armadura negativa passante dentro e fora do pilar.

Em uma análise linear de pórticos com nós semirrígidos, é possível empregar matrizes de correção da rigidez dos elementos e esforços de bloqueio da estrutura, afim de considerar a deformabilidade das ligações. Conforme afirmam Araújo et al (2006), essas matrizes são função do chamado fator de restrição à rotação (α_R). Este parâmetro relaciona a rigidez da ligação à rigidez da viga adjacente conectada, variando de 0 a 1 para a situação articulada e o engaste, respectivamente.

$$\alpha_R = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \left[1 + \frac{3(EI)_{sec}}{R_{sec}L_{ef}} \right]^{-1} \quad (\text{Equação 3})$$

onde $(EI)_{sec}$ é a rigidez secante da viga considerada na análise estrutural, R_{sec} é a rigidez secante ao momento-fletor da ligação viga-pilar e L_{ef} é o vão efetivo entre os centros de giro nos apoios da viga. Os valores de α_R que compreendem as ligações semirrígidas estão entre 0,15 e 0,85. O fator de restrição α_R também pode ser entendido como a razão entre a rotação da extremidade do elemento (θ_1) e a rotação combinada do elemento e da ligação (θ_2), devido ao momento de extremidade.

Ferreira et al (2005) estudaram 4 pórticos planos com 3, 5, 7 e 10 pavimentos, afim de analisar a influência do fator de restrição α_R das ligações sobre o comportamento global do pórtico, variando valores do fator de restrição desde 0 (articulado) até 1 (engastado). Observou-se que os efeitos das ligações semirrígidas sobre as estruturas com múltiplos pavimentos dependem, principalmente, da deslocabilidade de 1ª ordem da estrutura perfeitamente rígida. Ainda neste estudo, afirmou-se que a classificação para ligações semirrígidas por meio de faixas de valores de α_R era válida para a análise de estruturas de múltiplos pavimentos. Considerou-se ainda que, não se fazia necessário limitar a aplicação do coeficiente γ_z para estruturas com menos de 4 pavimentos, no caso de sistemas em concreto pré-moldado, e que a influência das ligações para a estabilidade fica mais evidente em edifícios mais altos. O presente artigo propõe uma análise semelhante, porém utilizando os valores de cálculo da rigidez secante de ligações típicas na análise de pórticos tridimensionais, no lugar de impor um fator de restrição à rotação.

3 Exemplo Numérico

Para análise da estabilidade global de estruturas pré-moldadas foi proposta a modelagem de um edifício institucional, destinado ao uso de salas de aula, situado na cidade de São Carlos, SP. Foram idealizados dois modelos, com 3 e 5 pavimentos e altura fixa de 4,0 m entre pavimentos. As estruturas serão analisadas considerando 6 situações de vinculação: articulação, ligação semirrígida conforme as tipologias 1, 2, 3 e 4, e engaste.

3.1 Edificação com 3 pavimentos

A estrutura proposta possui pilares e vigas em concreto armado pré-moldado e lajes alveolares pré-moldadas protendidas, todos em concreto de classe resistente C35 e aço CA-50. A forma do pavimento tipo e o corte transversal do edifício estão ilustrados nas Figuras 4 e 5. As dimensões dos elementos estruturais são apresentadas na Tabela 2. Os valores de ações verticais atuantes sobre a estrutura encontram-se na Tabela 3, sendo a carga acidental determinada de acordo com a norma ABNT NBR 6120:1980 e o peso próprio dos pilares e vigas determinados automaticamente pelo programa STRAP.

Tabela 2 - Seções dos elementos estruturais

Pavimento	Pilar (cm ²)	Viga (cm ²)	Laje (cm)
Cobertura	40x60	30x70	LA20+5
Tipo	40x60	30x80	LA25+5

Para análise dos efeitos de 1ª ordem, foi adotado o modelo de pórtico espacial, formado por pilares, vigas e lajes, com auxílio do programa comercial STRAP, versão 2016, da ATIR. O modelo ilustrado na Figura 6 é composto por 40 nós e 60 barras, as quais representam pilares e vigas.

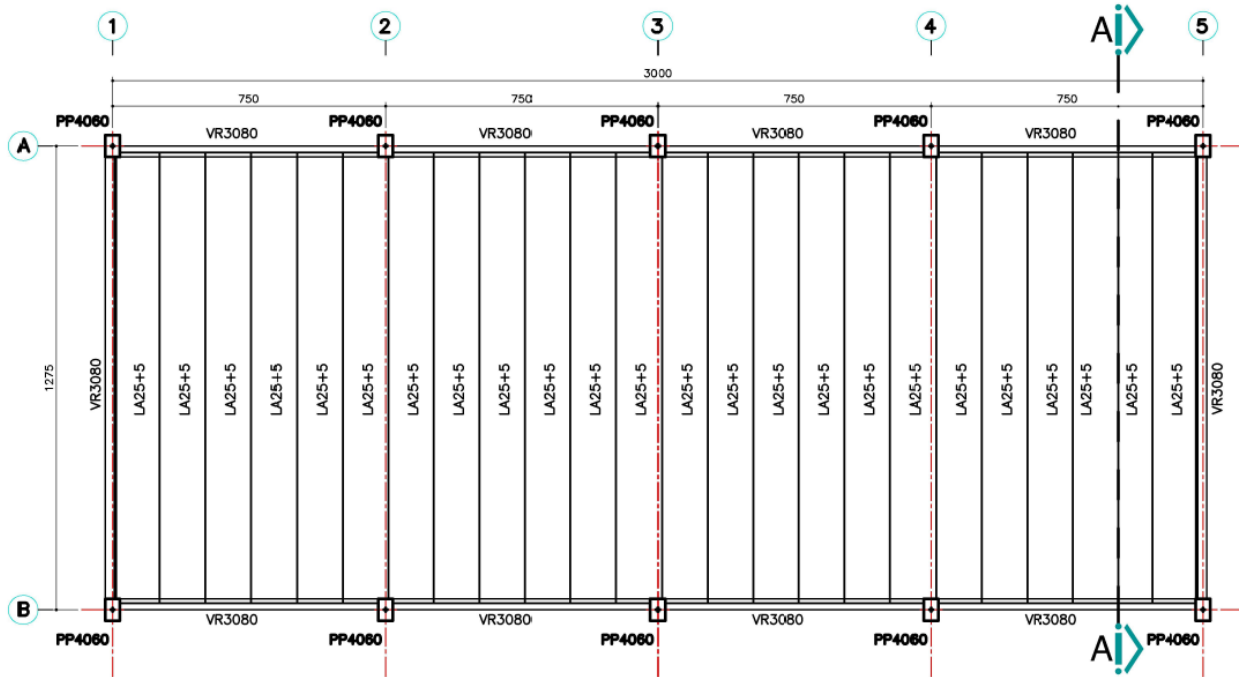


Figura 4 - Forma do pavimento tipo

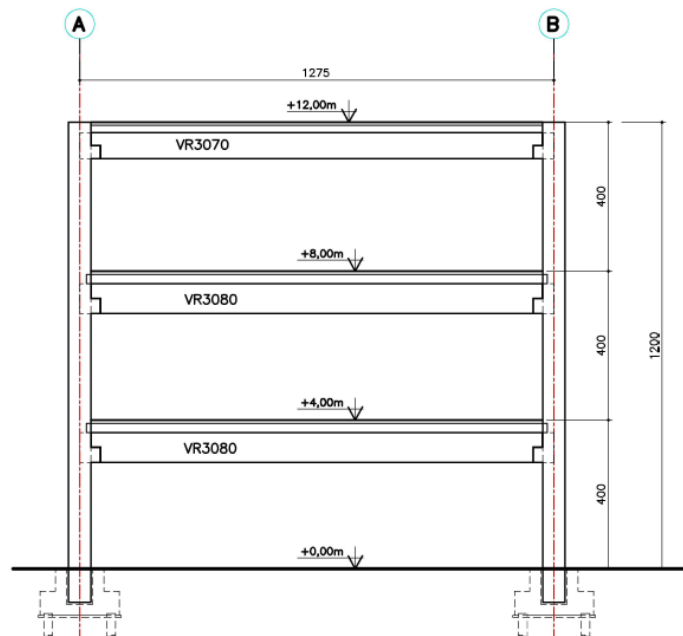


Figura 5 - Corte transversal do edifício

O efeito de diafragma das lajes na direção transversal do eixo 1 foi considerado por meio da ferramenta de nó mestre, sendo que vínculos de barras dos pilares foram considerados engastados. O modelo utilizou o valor de módulo de deformação tangente do concreto (E_{ci}) de 33 GPa.

Tabela 3 - Ações verticais sobre os pavimentos

Pavimento	g_0 (kN/m ²)	g_1 (kN/m ²)	g_2 (kN/m ²)	g_3 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	Σ (kN/m ²)
Cobertura	3,00	2,00	1,00	0,00	0,50	6,50
Tipo	3,80	2,00	1,50	2,00	3,00	12,30

Onde g_0 é o peso próprio da laje alveolar; g_1 é o capeamento médio de 7 cm incluindo chaveamento; g_2 é a carga do revestimento; g_3 é a carga de alvenaria distribuída sobre a laje e q é a ação acidental.

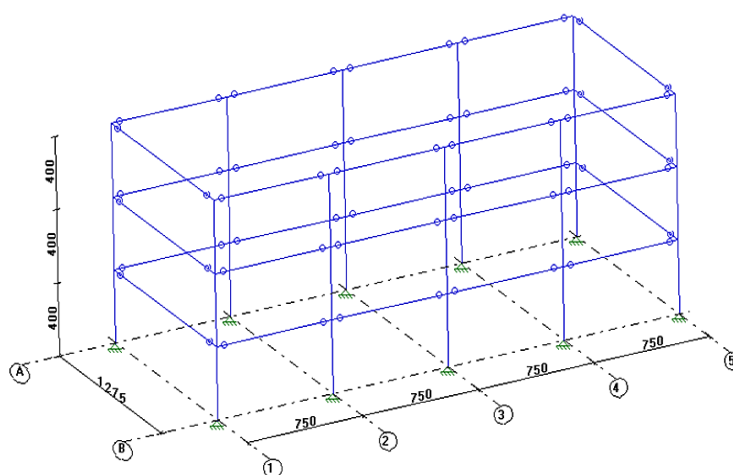


Figura 6 - Esquema estrutural com 3 pavimentos representado por modelo de pórtico tridimensional

A ação do vento foi estimada de acordo com a ABNT NBR 6123:1988, para qual foram adotados os valores de 40 m/s para velocidade básica do vento, fator topográfico S_1 igual a 1,0, para terreno fracamente acidentado, fator estatístico S_3 igual a 1,0 e coeficiente de arrasto C_a , na direção dos eixos transversais, igual a 1,20. As ações horizontais foram aplicadas ao longo das barras de vigas, com função de carga nodal – sem gerar flexão nas barras – no nível de cada pavimento de forma ponderada em relação à área de influência do pavimento, e conforme a pressão dinâmica de vento ao longo da altura do edifício, tal como apresentada na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Pressão dinâmica do vento para edifício com 3 pavimentos

Pav.	H_i (m)	q (kN/m ²)	F_a (kN)
3	12,00	0,86	62,27
2	8,00	0,79	114,37
1	4,00	0,69	98,87

Para análise da estabilidade global, todas as ações foram ponderadas conforme a combinação última normal. A não linearidade física dos elementos estruturais foi considerada de maneira aproximada, por meio da minoração da rigidez dos mesmos, conforme valores propostos na ABNT NBR 9062:2017 (Tabela 1) para os modelos com vinculações articuladas e semirrígidas.

Para o modelo com vinculação de engaste foi considerada a rigidez reduzida proposta na ABNT NBR 6118:2014 (Tabela 1), uma vez que esta ligação representa um edifício monolítico de concreto moldado no local.

Na análise dos pórticos com ligação semirrígida, a rigidez das ligações foi calculada por meio da Equação 2. O fator de restrição à rotação foi calculado conforme a Equação 3. No caso da ligação típica 4, o fator α_r é determinado pela ABNT NBR 9062:2017 como 0,85 e sua rigidez foi obtida de maneira inversa, de modo que a incógnita na Equação 3 era o valor de R_{sec} ao invés de α_r . A Tabela 5 apresenta a rigidez secante e o fator de restrição calculados para cada tipo de ligação semirrígida adotada. Para o cálculo dos resultados apresentados na Tabela 5, foram considerados os valores de L_{ef} igual a 11,90m, L_a igual a 12,50cm, armadura de continuidade negativa na face superior da viga composta por $2\phi 20\text{mm}$ ($A_s = 6,28 \text{ cm}^2$), com altura útil (d) igual a 75 cm e módulo de elasticidade do aço (E_s) de 210GPa.

Tabela 5 - Rigidez secante e fator de restrição para as ligações típicas 1, 2, 3 e 4.

Tipologia	k	L_{ed} (cm)	R_{sec} (kN.m/rad)	α_R
1	0,75	62,50	89.019,00	0,62
2	1,00	52,50	141.300,00	0,73
3	0,75	73,50	76.7405,52	0,59
4	-	-	302.903,28	0,85

A partir dos resultados obtidos na análise de 1ª ordem, foi possível estimar os efeitos de 2ª ordem por meio do coeficiente γ_z . A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente γ_z , considerando a combinação última normal, para os modelos com diferentes vinculações. Nesta Tabela também se encontram os resultados obtidos via processo iterativo P- Δ , o qual foi realizado de maneira automática pelo programa computacional STRAP, por meio de 5 iterações. Os valores de γ_z foram comparados com de P- Δ por meio da amplificação dos deslocamentos de primeira ordem obtidos no topo do edifício ($\delta_{hi} * \gamma_z$). A variação relativa entre estes valores é apresentada na Tabela 6 na coluna de $\Delta\delta_h$.

Tabela 6 - Resultados obtidos com o cálculo do coeficiente γ_z e processo P- Δ para o edifício com 3 pavimentos.

Modelo	Ligação		ELU				
	Viga-pilar	α_R	δ_{hi} (cm)	γ_z	$\delta_{hi} * \gamma_z$ (cm)	$\delta_{h,P-\Delta}$ (cm)	$\Delta\delta_h$
1	Articulada	0,00	11,53	1,620	18,68	20,90	10,61%
2	Semirrígida - Tipologia 3	0,59	3,04	1,126	3,42	3,45	0,80%
3	Semirrígida - Tipologia 1	0,62	2,92	1,121	3,27	3,30	0,81%
4	Semirrígida - Tipologia 2	0,73	2,62	1,109	2,90	2,92	0,54%
5	Semirrígida - Tipologia 4	0,85	2,30	1,096	2,52	2,54	0,79%
6	Engastada	1,00	1,91	1,076	2,05	2,06	0,25%

Pode-se observar que a máxima diferença entre deslocamentos no topo da estrutura foi de

10%, para a situação articulada, o que coincide com o fato de que o coeficiente γ_z não é recomendado para valores superiores a 1,30, uma vez que o efeito de segunda ordem é proeminente. Para os demais valores, a variação entre esforços amplificados de γ_z e P- Δ foi menor que 0,90%, demonstrando que apesar do coeficiente γ_z ser um processo simplificado, seus resultados finais são práticos e eficientes quando não superam o limite de 1,30. Nem sempre a maior variação entre P- Δ e deslocamentos amplificados ocorreu no topo da edificação.

3.2 Edificação com 5 pavimentos

Com o intuito de comparar o efeito da rigidez das ligações em estruturas aporricadas de múltiplos pavimentos, foi analisada a estabilidade global do mesmo edifício, com nova altura de 20,0 m. As seções transversais dos elementos estruturais foram mantidas as mesmas, bem como as cargas por pavimento. A força horizontal devido à ação do vento foi calculada por meio dos mesmos parâmetros de entrada, apenas modificando o valor da altura do edifício. A Figura 7 apresenta o esquema estrutural dos novos pórticos.

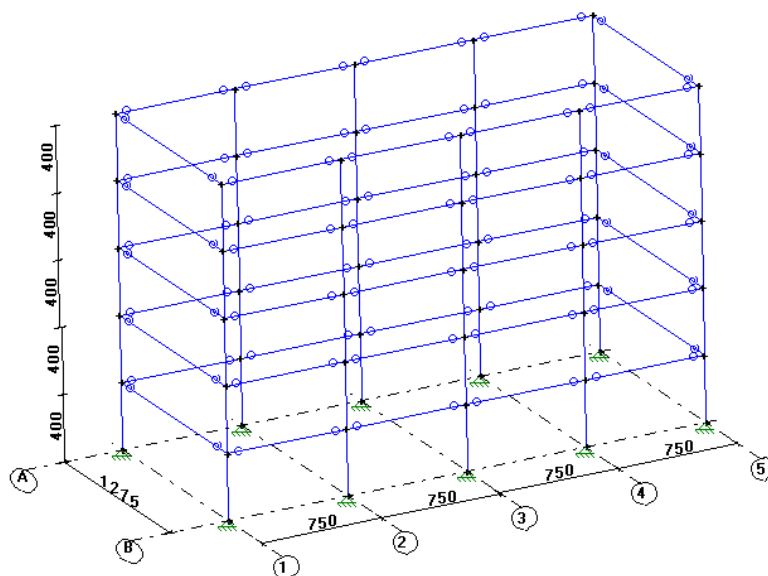


Figura 7 - Esquema estrutural com 5 pavimentos representado por modelo de pórtico tridimensional.

A Tabela 7 apresenta o resumo da análise de estabilidade global da estrutura, utilizando como parâmetro de avaliação o coeficiente γ_z . Percebe-se que, ao aumentar o número de pavimentos alcançando uma altura de 20 metros, a estrutura se torna muito sensível aos efeitos de segunda ordem e os deslocamentos são excessivos, o que torna inviável o projeto do edifício de 5 pavimentos com todas as ligações articuladas. Deve-se notar o fato de que o edifício só possui dois pórticos, o que reduz a influência das ligações semirrígidas na estabilidade global. Para este modelo de 5 pavimentos com ligação articulada foram necessárias 30 iterações para que o processo convergisse, o que confirma a instabilidade do edifício, bem como o valor de γ_z negativo.

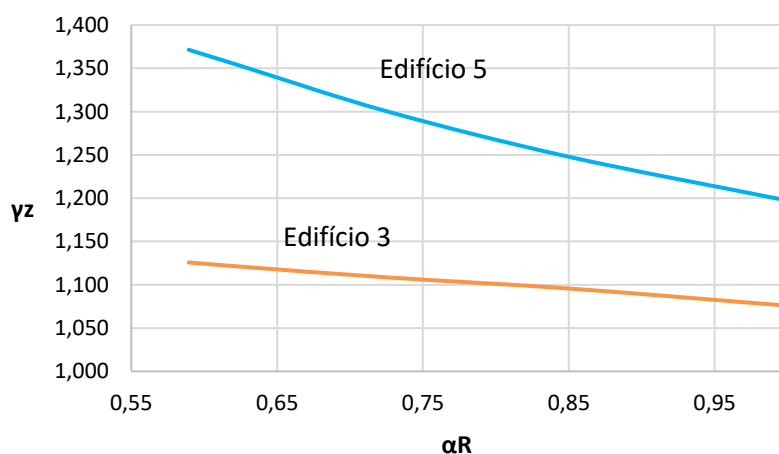
Tabela 7 - Resumo de estabilidade global na direção do eixo 1.

Modelo	Ligação		ELU				
	Viga-pilar	α_R	δ_{hi} (cm)	γ_z	$\delta_{hi} \cdot \gamma_z$ (cm)	$\delta_{h,P-\Delta}$ (cm)	$\Delta \delta_h$
1	Articulada	0,00	99,81	-1,552	-154,91	213,00	172,73%
2	Semirrígida - Tipologia 3	0,59	13,56	1,371	18,60	19,25	3,40%
3	Semirrígida - Tipologia 1	0,62	12,92	1,353	17,48	17,94	2,57%
4	Semirrígida - Tipologia 2	0,73	11,23	1,300	14,60	14,89	1,94%
5	Semirrígida - Tipologia 4	0,85	9,55	1,248	11,92	12,15	1,92%
6	Engastada	1,00	8,15	1,197	9,76	9,93	1,74%

Comparando os edifícios com 3 e 5 pavimentos e observando a forma das curvas no Gráfico 1, é possível perceber que a maneira com que as ligações influenciam o grau de rigidez da estrutura varia de acordo com a altura da edificação. Ou seja, para a edificação de 3 pavimentos, a variação de α_R de 0,59 a 1 levou a uma variação de 4,65% de γ_z . Para o edifício com 5 pavimentos, com a mesma variação de α_R , o coeficiente γ_z variou em 14,53%.

Por analogia, para edifícios mais altos, as estruturas em concreto pré-moldado são ainda mais sensíveis ao efeito da rigidez das ligações. Conhecer as tipologias de ligação e seu comportamento torna-se interessante, pois permite a utilização de modelos de ligação mais adequados aos esforços solicitantes e deslocabilidades previstos.

Gráfico 1 - Variação da deslocabilidade das estruturas em função do fator de restrição à rotação



Os Gráficos 2 e 3 apresentam a variação dos deslocamentos, no topo dos edifícios, de acordo com a variação da rigidez das ligações. Os deslocamentos utilizados são aqueles obtidos na análise por meio do processo P- Δ , e deslocamentos de primeira ordem, amplificados do coeficiente γ_z . A cada par de curvas, as linhas tracejadas representam os deslocamentos do processo P- Δ , e as linhas contínuas representam os deslocamentos amplificados de γ_z . Para ambos os edifícios, os processos para análise do efeito de segunda ordem forneceram resultados convergentes, todavia nota-se que tais resultados tendem a se distanciar com o aumento da altura do edifício.

No edifício com 3 pavimentos, os resultados tiveram variação menor que 1% para as deslocabilidades na situação engastada e tipologias de 1 a 4. A situação articulada acarretou em valores excessivos de γ_z e, conseqüentemente, maior discrepância entre deslocamentos de γ_z e P- Δ , o que mostra que a análise por meio do coeficiente γ_z não é eficiente para este caso de excesso de deslocabilidade.

Gráfico 2 - Variação dos deslocamentos de γ_z e P- Δ , para cada ligação, em função da altura no edifício de 3 pavimentos.

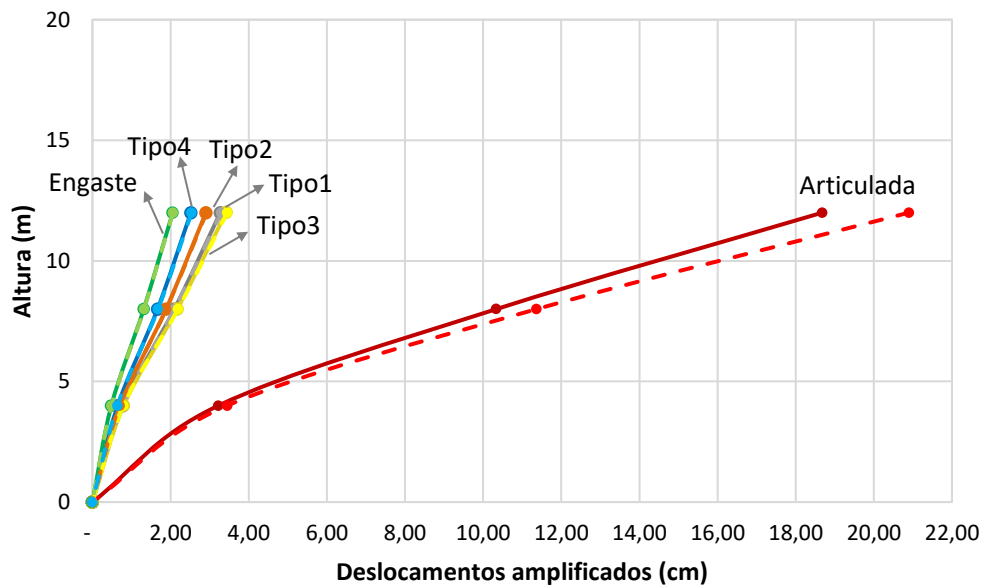
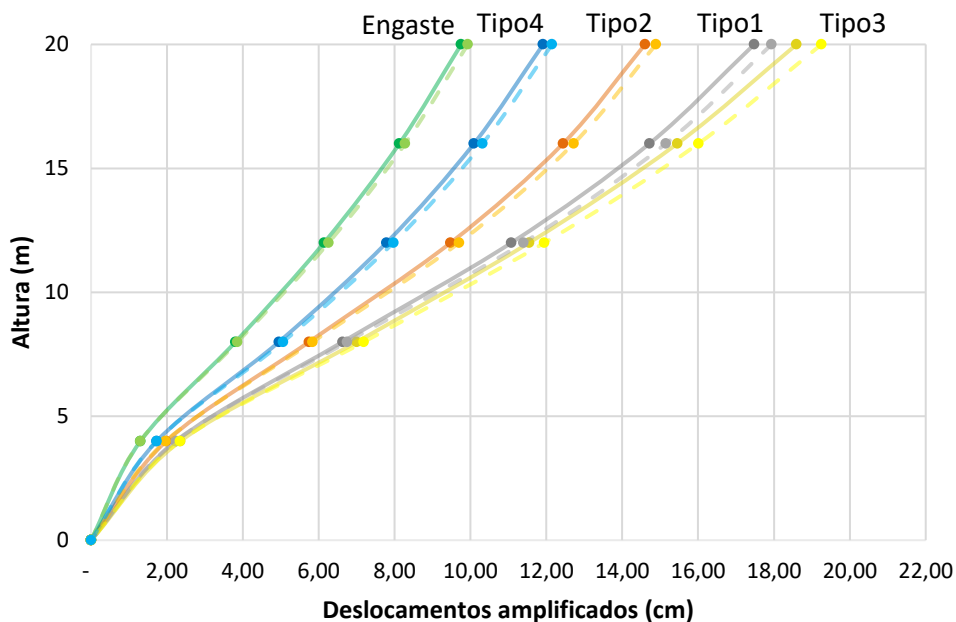


Gráfico 3 - Variação dos deslocamentos de γ_z e P- Δ , para cada ligação, em função da altura no edifício de 5 pavimentos.



4 Considerações Finais

O artigo buscou apresentar algumas das alterações introduzidas pela norma ABNT NBR 9062:2017, a respeito das tipologias de ligações semirrígidas, e elucidar conceitos acerca de sua consideração na etapa de análise estrutural de edifícios em concreto pré-moldado. Por meio dos resultados da modelagem estrutural foi possível observar a sensibilidade das estruturas pré-moldadas aos deslocamentos horizontais.

Primeiramente, é importante ressaltar a simplificação do projeto de ligações semirrígidas com a introdução da equação para o cálculo da rigidez secantes de ligações típicas. O edifício com 3 pavimentos foi sensível ao efeito da vinculação totalmente articulada. O cálculo da estrutura nessa situação, com $\gamma_z = 1,62$ é possível com uso de processos mais rigorosos. Elevando o fator de restrição à rotação para 0,59 (tipologia 3), o valor de γ_z foi reduzido em aproximadamente 43%, o que proporcionou uma situação mais favorável de projeto. Neste caso, adotando ligação semirrígida com fator de restrição maior que 0,59, é possível a redução da seção transversal dos elementos estruturais, gerando uma economia de recursos ainda com a estrutura trabalhando a favor da segurança. Em relação ao edifício com 3 pavimentos, observa-se que o processo P- Δ converge com os resultados de γ_z para as situações em que γ_z é menor que 1,3. O coeficiente γ_z , apesar de ser um método simples, se mostra eficiente na estimativa dos efeitos globais de segunda ordem na estrutura.

Para o edifício com 5 pavimentos, o uso de ligações articuladas é inviável pois conduz a deslocamentos excessivos. Isso se estende de maneira geral às estruturas aporricadas de múltiplos pavimentos em concreto pré-moldado, onde as deslocabilidades são acentuadas e a rigidez da edificação é função da rigidez das ligações, para estruturas não contraventadas. Ademais, o efeito da rigidez das ligações é mais proeminente quanto maior a altura do edifício. Observou-se que tanto o fator de restrição α_R quanto a rigidez secante R_{sec} viabilizam a análise da estabilidade de estruturas em concreto pré-moldado. Pelo nível de convergência entre γ_z e P- Δ para o edifício em 3 pavimentos, nota-se que é possível utilizar o coeficiente γ_z para uma análise do efeito de 2ª ordem nas estruturas pré-moldadas com menos de 4 pavimentos, obtendo resultados adequados com os de uma análise mais rigorosa (P- Δ).

5 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI318M-14: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ARAÚJO, D.; FERREIRA, M. A.; EL DEBS, M. (2006). **Estabilidade global de estruturas reticuladas em concreto pré-moldado: influência da plastificação da ligação**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, vol.3, 85–102.

GIBBONS, C., KIRBY, P. A, NETHERCOT, D. A, (1996). **Calculation of Serviceability Deflections for Non-Sway Frames with Semi-Rigid Connections**. Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs. & Bldgs.. Vol. 116, May, p186-193.

GORGUN, H. **Semi-Rigid Behaviour of Connections in Precast Concrete Structures**. Nottingham, 1997. Tese (Doutorado) - The University of Nottingham.

FERREIRA, M.A. **Deformabilidade de ligações viga-pilar em concreto pré-moldado**. São Carlos. 1999. 232f. Tese (Doutorado em estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

FERREIRA, M.A. et al (2005). **Estabilidade Global De Estruturas Pré-Moldadas : Efeito Das Ligações Semi-Rígidas**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado (Vol. 1).

FERREIRA, M.A.; ELLIOTT, K. S. (2010) **Precast Concrete Framed Structures with Semi-Rigid Connections**. State-Of-Art Research Report. 47f.

FERREIRA, M.A.; MARIN, M.C. (2014). **Proposta de Revisão e Ampliação do Texto Base – Estabilidade Global de Estruturas Pré-Moldadas**. 13p.

MARIN, M. C. **Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas em concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos**. 2009. 213f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARIN, M.C.; EL DEBS, M. (2016). **Análise da Estabilidade Global de Estruturas em Concreto Pré-Moldado de Múltiplos Pavimentos Considerando as Ligações Semirrígidas**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.16, n.66, p. 49-68, 2016.

MATHEWS, G. S.; MACGREGOR, J. G. (1977). **The Second-Order Analysis and Design of Reinforced Concrete Frames**, report nº60, 96p.

SOARES, A.M.M. **Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações**. 1998. 175f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.