

## **Análise de Sensibilidade de Parâmetros na Estabilidade Global de Estruturas de Concreto Pré-moldadas segundo ABNT NBR9062:2017**

*Parameter Sensitivity Analysis in the Global Stability of Precast Concrete Structures According to ABNT NBR 9062:2017.*

Arthur Hiratsuka Rezende (1) e Daniela Gutstein (2)

(1) Engenheiro Civil (UTFPR) - HF Engenharia-PR – [rezende@utfpr.edu.br](mailto:rezende@utfpr.edu.br)

(2) Professora Dra. Adjunta - Departamento de Construção Civil -

DACOC/UTFPR - [danielag@utfpr.edu.br](mailto:danielag@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Ecoville -PR

### **Resumo**

A adoção de ligações semirrígidas entre vigas e pilares é uma solução estrutural que vem sendo muito empregada em sistemas estruturais pré-moldados ou pré-fabricados de concreto. As soluções clássicas de estruturas pré-moldadas com ligações articuladas, vem dando espaço para a utilização de ligações semirrígidas no todo ou em parte da estrutura, à medida que as estruturas são mais esbeltas ou se deseja melhor controle de deslocamentos, vibrações e fissuração. No âmbito da normalização brasileira, a ABNT NBR 9062:2017 passou a abranger maior detalhamento para a análise estrutural de elementos pré-moldados conectados por meio de ligações semirrígidas e avaliação da estabilidade global. A definição dos parâmetros de rigidezes das ligações é etapa fundamental da análise estrutural para fins de estabilidade global e dimensionamento, mas os mesmos são dependentes da tipologia das ligações, propriedades dos elementos e materiais envolvidos, os quais não se tem ainda nas etapas iniciais do projeto. Uma estimativa desses parâmetros se faz necessária nesta fase. O objetivo principal deste trabalho corresponde a explorar as recomendações normativas relacionadas à análise de estabilidade global dessas estruturas, a partir de uma análise de sensibilidade de parâmetros (análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos) aplicada a um projeto típico de estudo. Dentre os resultados obtidos, são apresentadas as respectivas condições favoráveis e desfavoráveis de estabilidade global, identificando os parâmetros que podem influenciar o comportamento à estabilidade global de estruturas de concreto pré-moldadas com ligações semirrígidas, bem como discutindo uma metodologia de análise estrutural estudada pelos autores.

*Palavra-Chave: concreto pré-moldado, pré-fabricado, estabilidade global, ligação semirrígida.*

### **Abstract**

The adoption of semi-rigid connections between beams and columns is a structural solution that has been widely used in precast concrete structural systems. The classic solutions of precast concrete structures with articulated connections, have been giving space for the use of semi-rigid connections in all or in some parts of the structure, as the structures are more slender or if better displacements control, vibrations and cracking is desired. Within the scope of Brazilian standardization, ABNT NBR 9062: 2017 started to cover more details for the structural analysis of precast elements connected through semi-rigid connections and assessment of global stability. The definition of the connection stiffness parameters is a fundamental step in the structural analysis for the purposes of global stability and dimensioning, but they are dependent on the typology of the connections, properties of the elements and materials involved, which are not yet present in the initial design stages. An estimate of these parameters is necessary at this stage. The main objective of this work is to explore the normative recommendations related to the analysis of global stability of these structures, from an analysis of parameter sensitivity (numerical analysis by the Finite Element Method) applied to a typical study project. Among the results obtained, the respective favorable and unfavorable conditions of global stability are presented, identifying the parameters that may influence the behavior of the global stability of precast concrete structures with semi-rigid connections, as well as discussing a structural analysis methodology studied by the authors.

*Keywords: precast concrete, prefabricated, precast, global stability, semi-rigid connection.*

## 1. Contextualização e justificativa

A difusão de estruturas pré-moldadas é cada vez mais ampla em empreendimentos brasileiros recentes, decorrente da racionalização de processos almejada in situ e ao controle tecnológico inerente ao sistema construtivo. Observa-se a extrapolação de seu uso convencional, ou seja, de estruturas com grande área de implantação e baixa altura, para estruturas mais esbeltas.

A aplicação desse sistema em estruturas esbeltas implica na adoção de soluções que tornem exequível o processo construtivo e que garantam um comportamento estrutural satisfatório em serviço (sem deformações, fissurações ou vibrações excessivas), exigindo que o projeto leve em consideração a mobilização de diversos elementos, simultaneamente, de forma a reduzir concentrações de tensões. Esse refinamento da análise é traduzido no melhor aproveitamento dos materiais, com subsequente economia e otimização.

É neste cenário que, em sua última revisão, a ABNT NBR 9062:2017 <sup>[1]</sup> passa a detalhar parâmetros que caracterizam a rigidez secante da ligação, para as tipologias comumente adotadas no Brasil. Ao possibilitar a adoção, embasada por norma nacional vigente, dessa solução em estruturas pré-moldadas, é possível conceber modelos estruturais com redundância estática, promovendo menor grau de fissuração decorrente de deformações amenizadas, possibilitando a redução das patologias relacionadas aos fatores mencionados.

## 2. Metodologia

A fim de contribuir com o desenvolvimento e disseminação desse tipo de solução para estruturas pré-moldadas, são feitos estudos com modelos em elementos finitos aplicando as recomendações e critérios apresentados na norma vigente, com a metodologia adotada nas modelagens paramétricas realizada conforme o exposto em REZENDE <sup>[2]</sup>.

Desta forma, o presente trabalho, que busca versar sobre a ligação entre elementos de barras, pretende explorar a aplicabilidade do disposto na ABNT NBR 9062 <sup>[1]</sup> e explicitar como variações na configuração dos elementos estruturais (tipo de ligação, rigidez das ligações entre pavimentos e outras) resultam em condições favoráveis ou não, na estabilidade global, nos deslocamentos e nos esforços da estrutura em análise.

### 2.1 Hipóteses simplificadoras e considerações de projeto

São adotadas hipóteses simplificadoras e parâmetro de projeto, de modo a reduzir o número de variáveis na análise e tornar a análise fidedigna em relação aos projetos comumente desenvolvidos no mercado.

Para isso, se considera a seção composta e homogeneizada dos elementos pré-moldados, dispensando as verificações relativas às fases de fabricação, transporte e montagem. São desprezados os efeitos de desaprumo de montagem e excentricidade de cargas (oriundos do apoio das vigas em consolos). Os pilares adotados são retangulares, de seção (40x60) cm, sempre com a maior inércia perpendicular à direção das vigas que apoiam as lajes alveolares. Presume-se engastamento perfeito na base dos pilares.

Considera-se o efeito diafragma (compatibilizando os deslocamentos dos nós de cada pavimento, mas sem acrescentar rigidez ao conjunto) das lajes alveolares solidarizadas por capa estrutural, desconsiderando demais enrijecimentos (e.g. escadas, elevadores, alvenarias), para que a análise da estabilidade global reflita, predominantemente, a contribuição das ligações.

## 2.2 Recomendações Normativas - ABNT NBR 9062:2017

A ABNT NBR 9062<sup>[1]</sup>, em sua última revisão, passou a incluir a definição de rigidez secante ( $R_{sec}$ ) à flexão de ligações entre viga e pilar, restringindo sua aplicação ao momento limite de escoamento ( $M_{y,lim}$ ), respectivamente conforme Equação (Equação1) e Equação (Equação2). Ambos os parâmetros são intrínsecos ao que preconiza a norma (a capacidade das estruturas deve ser governada pelo esgotamento dos elementos e não da ligação). As tipologias adotadas no presente trabalho, expostas na Figura 1, são as tipologias 1 e 3 definidas na norma de referência.

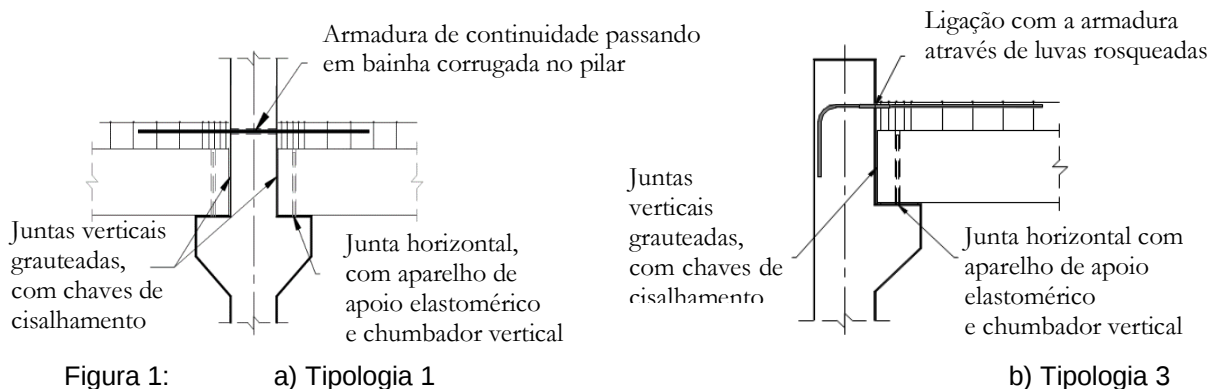


Figura 1:

a) Tipologia 1

b) Tipologia 3

$$R_{sec} = k * \frac{A_s E_s d^2}{L_{ed}} \quad (\text{Equação1})$$

$$M_{Sd,rig} < M_{y,lim} = 0,9 A_s f_{yk} d \quad (\text{Equação2})$$

onde  $k$  é o coeficiente de ajustamento da rigidez secante,  $L_{ed}$  é o comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade,  $d$  é a altura útil da seção resistente,  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço,  $A_s$  é a área de armadura de continuidade,  $f_{yk}$  é o valor característico da resistência de escoamento do aço e  $M_{Sd,rig}$  é o Momento solicitante elástico de projeto.

A ABNT NBR 9062:2017<sup>[1]</sup> define o fator de restrição à rotação  $\alpha_r$ , que pode ser descrito como a função entre a rigidez da ligação e a rigidez do elemento conectado, sendo calculado a partir da Equação (Equação3). O fator  $\alpha_r$  representa o grau de engastamento da ligação, portanto é possível aplicá-lo a fim de estimar os momentos fletores nas ligações semirrígidas, conforme demonstrado em COSTA et al<sup>[3]</sup>, REZENDE et al<sup>[2]</sup> e REZENDE<sup>[4]</sup>.

$$\alpha_r = \left[ 1 + \frac{3 (EI)_{sec}}{R_{sec} L_{ef}} \right]^{-1} \quad (\text{Equação3})$$

em que  $(EI)_{sec}$  é a rigidez secante da viga pré-moldada (cujo valor pode ser encontrado no Anexo A da ABNT NBR 9062<sup>[1]</sup>, que dispõe sobre não linearidade física para a análise de 2ª ordem) e  $L_{ef}$  é o comprimento efetivo entre centros de giro nos apoios da viga. O procedimento simplificado para análise não linear dos efeitos de 2ª ordem geométricos, análogo ao disposto na ABNT NBR 6118:2014<sup>[5]</sup>, se dá através do coeficiente  $\gamma_z$ . O valor do coeficiente  $\gamma_z$  (para cada combinação de carregamento) é dado pela Equação (Equação4).

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad \text{(Equação4)}$$

onde  $\Delta M_{tot,d}$  é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem e  $M_{1,tot,d}$  é momento de tombamento referente ao pilar equivalente da estrutura analisada.

## 2.3 Configuração inicial da estrutura idealizada

A estrutura concebida como base para os estudos corresponde à uma edificação comercial de estrutura pré-moldada (Figura 2-a), idealizada com área de implantação de (32,0x24,0)m, modulação de (8,0x8,0)m, com altura entre pavimentos de 3,5 metros, ligações conforme as tipologias 1 e 3 (Figura 1), para as vigas intermediárias e de extremidade, em ordem. A estrutura é discretizada, conforme Ferreira et al.<sup>[6]</sup>, através de elementos de barra (Figura 2-b) com a rigidez da ligação representada através de mola rotacional.

É primordial definir quais cargas mobilizam a ligação, uma vez que entre as etapas de montagem e de uso da estrutura, além da variação do carregamento atuante, têm-se a variação da seção resistente. As cargas permanentes (peso próprio da viga, das lajes e do capeamento) atuam como cargas concentradas aplicadas nos nós, uma vez que a ligação não está solidarizada na fase da montagem da estrutura. Já as sobrecargas são distribuídas ao longo do comprimento da barra e, portanto, mobilizam a ligação na fase de uso da estrutura.

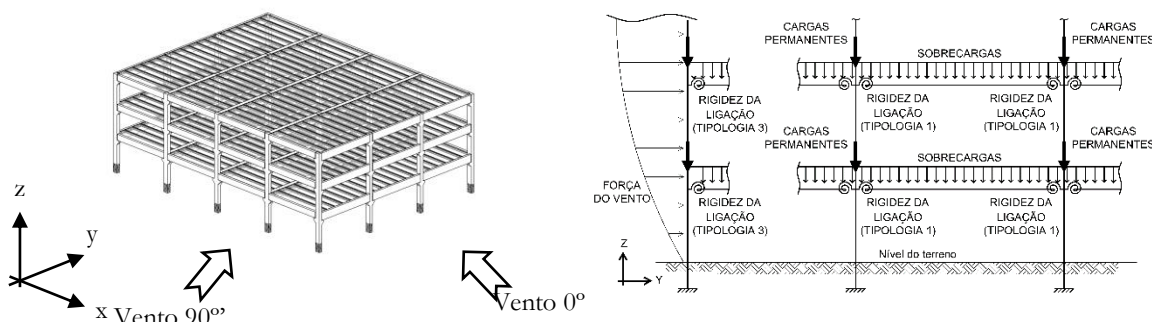


Figura 2: a) Estrutura inicial

b) Discretização da estrutura (adaptado de Ferreira et al<sup>[6]</sup>)

## 2.4 Análises paramétricas

São expostas duas Análises Paramétricas, adotando estruturas de mesma área de implantação, carregamentos e seções transversais de vigas e pilares, abrangendo casos

com 3, 4, e 5 pavimentos. Varia-se a rigidez das ligações global (Análise 1) e localmente (Análise 2), conforme demonstrado na Tabela 1.

A Análise Paramétrica 1 explora a influência de diferentes considerações de projeto (tipo de apoio e área de armadura de continuidade) e métodos de cálculo (ABNT NBR 9062<sup>[1]</sup> e Método dos Componentes). Os valores da Rigidez do Momento limite de escoamento e do Fator de restrição à rotação  $\alpha_r$ , para cada caso, são expostos na Tabela 2.

Para compreensão da rotina de cálculo e das hipóteses adotadas no Método dos Componentes, recomenda-se os estudos de El Debs et al.<sup>[7]</sup> e El Debs<sup>[8]</sup>. Um estudo comparativo entre os parâmetros envolvidos e os resultados depreendidos na obtenção da rigidez secante, entre o Método dos Componentes e o disposto na ABNT NBR 9062, é exposto em Rezende et al.<sup>[2]</sup>.

Tabela 1: Resumo das Análises Paramétricas

| Análise | Objeto de estudo                                    | Caso | Variação aplicada                                             |
|---------|-----------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------|
| 00      | Caso original                                       | 0SR  | Seção plena no apoio. Cálculo pela ABNT NBR9062:2017          |
| 01      | Valor da rigidez das ligações (Global)              | 1SRA | Apoio tipo dente Gerber. Cálculo pela ABNT NBR 9062:2017      |
|         |                                                     | 1SRB | 65% da $A_s$ de continuidade. Cálculo pela ABNT NBR 9062:2017 |
|         |                                                     | 1SRC | Apoio tipo dente Gerber. Cálculo pelo Método dos Componentes  |
| 02      | Variação da rigidez das ligações (entre pavimentos) | 2SRA | Rigidez das ligações aumenta a partir do 1º pavimento         |
|         |                                                     | 2SRB | Rigidez das ligações diminui a partir do 1º pavimento         |
|         |                                                     | 2SRC | Último pavimento com ligações rotuladas                       |

Tabela 2: Valores de rigidez secante das ligações na Análise Paramétrica 1

| Caso | Seção <sup>1</sup> | Ligação com pilar interno <sup>2</sup> |                       |                   | Ligação com pilar de fachada <sup>3</sup> |                       |                   |
|------|--------------------|----------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
|      |                    | Rigidez Secante<br>[MN*m/rad]          | $M_{y,lim}$<br>[kN*m] | $\alpha_r$<br>[ ] | Rigidez Secante<br>[MN*m/rad]             | $M_{y,lim}$<br>[kN*m] | $\alpha_r$<br>[ ] |
| 0SR  | Viga "L"           | 203,1                                  | 563,3                 | 0,460             | 176,4                                     | 563,3                 | 0,425             |
|      | Viga "T"           | 347,1                                  | 803,6                 | 0,528             | 176,4                                     | 563,3                 | 0,362             |
|      | Fechamento         | 62,7                                   | 181,9                 | 0,383             | 62,7                                      | 181,9                 | 0,383             |
| 1SRA | Viga "L"           | 70,3                                   | 331,3                 | 0,227             | 61,0                                      | 331,3                 | 0,204             |
|      | Viga "T"           | 120,1                                  | 472,7                 | 0,279             | 61,0                                      | 331,3                 | 0,164             |
|      | Fechamento         | 14,3                                   | 86,9                  | 0,124             | 14,3                                      | 86,9                  | 0,124             |
| 1SRB | Viga "L"           | 153,2                                  | 360,5                 | 0,391             | 134,1                                     | 360,5                 | 0,360             |
|      | Viga "T"           | 258,9                                  | 514,3                 | 0,455             | 134,1                                     | 360,5                 | 0,302             |
|      | Fechamento         | 45,3                                   | 111,0                 | 0,309             | 45,3                                      | 111,0                 | 0,309             |
| 1SRC | Viga "L"           | 115,5                                  | 296,2                 | 0,227             | 115,5                                     | 296,2                 | 0,204             |
|      | Viga "T"           | 180,3                                  | 408,1                 | 0,279             | 112,3                                     | 296,2                 | 0,164             |
|      | Fechamento         | 25,8                                   | 78,6                  | 0,203             | 25,8                                      | 78,6                  | 0,161             |

Notas:

<sup>1</sup> Viga L: Apoia laje e é de fachada; Viga T: Apoia laje e é interna;  
Viga Fechamento: não apoia laje e é de fachada;

<sup>2</sup> Tipologia de ligação 1 (Armadura passante);

<sup>3</sup> Tipologia de ligação 3 (Luva rosqueada).

Na Análise Paramétrica 2 comparam-se os casos originais, de ligações rígidas (Caso 0RI) e semirrígidas (Caso 0SR), com estruturas cujo valor de rigidez da ligação aumenta (Caso 2SRA) ou diminui (Caso 2SRB) ao longo dos pavimentos, bem como o caso de admitir-se

ligações rotuladas no último pavimento, configuração comum em estruturas pré-moldadas. No caso de considerar as ligações do último pavimento como rotuladas todas as demais ligações têm o valor de rigidez igual ao caso original (Caso 2SRC).

Nessa análise varia-se a rigidez linearmente entre pavimentos: quando com 3 pavimentos o valor de rigidez adotado é de 33%, 66% e 100% da rigidez do Caso 0SR. De forma análoga, as estruturas com 4 pavimentos têm as rigidezes variando em 25%, 50%, 75% e 100% e estruturas com 5 pavimentos apresentam de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da rigidez do caso 0SR.

### 3. Resultados e discussões

Apresentam-se a seguir, na Tabela 3, as análises da estrutura com vento incidente a 90° (na direção de menor inércia da edificação), onde são modelados os casos explicados no item anterior e obtidos os parâmetros de estabilidade global ( $\gamma_z$ ), de deslocamentos máximos ( $d$ ) e de máximos momentos no pilar (esforços na fundação). Análises com outra incidência de vento estão apresentados em Rezende<sup>[4]</sup>.

Tabela 3: Resultados das Análises Paramétricas

| Tabela 6. Resultados das Análises Paramétricas |            |                        |                     |            |            |                  |                             |      |
|------------------------------------------------|------------|------------------------|---------------------|------------|------------|------------------|-----------------------------|------|
| Caso                                           | Ligação    | Pavimentos             | Altura <sup>1</sup> | $\gamma_z$ | $\delta^2$ | $\delta_{lim}^3$ | M <sub>p</sub> <sup>4</sup> |      |
|                                                |            | [inteiro]              | [m]                 | [ ]        | [mm]       | [mm]             | [kN/m²]                     |      |
| REFERÊNCIA                                     | 0RI        | Rígida                 | 3                   | 10,5       | 1,05       | 0,54             | 8,75                        | 66   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,08       | 1,00             | 11,67                       | 104  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,11       | 1,55             | 14,58                       | 152  |
|                                                | 0SR        | Semirrígida            | 3                   | 10,5       | 1,07       | 0,78             | 8,75                        | 80   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,11       | 1,52             | 11,67                       | 139  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,16       | 3,33             | 14,58                       | 223  |
|                                                | 0RO        | Rotulada               | 3                   | 10,5       | 1,13       | 2,12             | 8,75                        | 149  |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,36       | 6,79             | 11,67                       | 242  |
|                                                | ANÁLISE 01 | 1SRA                   | Semirrígida         | 3          | 10,5       | 1,10             | 1,15                        | 8,75 |
| 4                                              |            |                        |                     | 14,0       | 1,17       | 3,46             | 11,67                       | 208  |
| 5                                              |            |                        |                     | 17,5       | 1,26       | 5,21             | 14,58                       | 418  |
| 1SRB                                           |            | Semirrígida            | 3                   | 10,5       | 1,08       | 0,85             | 8,75                        | 84   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,12       | 1,67             | 11,67                       | 149  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,18       | 3,66             | 14,58                       | 247  |
| 1SRC                                           |            | Semirrígida            | 3                   | 10,5       | 1,08       | 0,94             | 8,75                        | 91   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,13       | 1,85             | 11,67                       | 173  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,20       | 4,05             | 14,58                       | 308  |
| ANÁLISE 02                                     | 2SRA       | Semirrígida (variável) | 3                   | 10,5       | 1,09       | 1,04             | 8,75                        | 86   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,17       | 3,37             | 11,67                       | 165  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,28       | 5,29             | 14,58                       | 297  |
|                                                | 2SRB       | Semirrígida (variável) | 3                   | 10,5       | 1,07       | 0,84             | 8,75                        | 85   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,12       | 1,69             | 11,67                       | 151  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,17       | 3,73             | 14,58                       | 252  |
|                                                | 2SRC       | Semirrígida (variável) | 3                   | 10,5       | 1,08       | 0,95             | 8,75                        | 85   |
|                                                |            |                        | 4                   | 14,0       | 1,11       | 1,72             | 11,67                       | 145  |
|                                                |            |                        | 5                   | 17,5       | 1,16       | 3,62             | 14,58                       | 230  |

Notas:

<sup>1</sup> Altura do engaste ao topo do pilar (Comprimento engaste (1,0m) + Altura acima do terreno).

<sup>2</sup> Deslocamento calculado no topo da estrutura, no ELS.

<sup>3</sup> Deslocamento limite - ABNT NBR 9062:2017.

<sup>4</sup> Momento fletor máximo na base dos pilares, no ELU.

### 3.1 Análise Paramétrica 1

É possível observar na Figura 3 a contribuição das ligações semirrígidas na deslocabilidade da estrutura, tomando os casos ORI (ligações rígidas) e ORO (ligações rotuladas) como referência. É notória a relevância do número de pavimentos, destacando-se que no caso com 5 pavimentos tem-se que o deslocamento da estrutura com ligações semirrígidas e seção plena no apoio (Caso 0SR) é aproximadamente o dobro do que com ligações rígidas (Caso ORI).

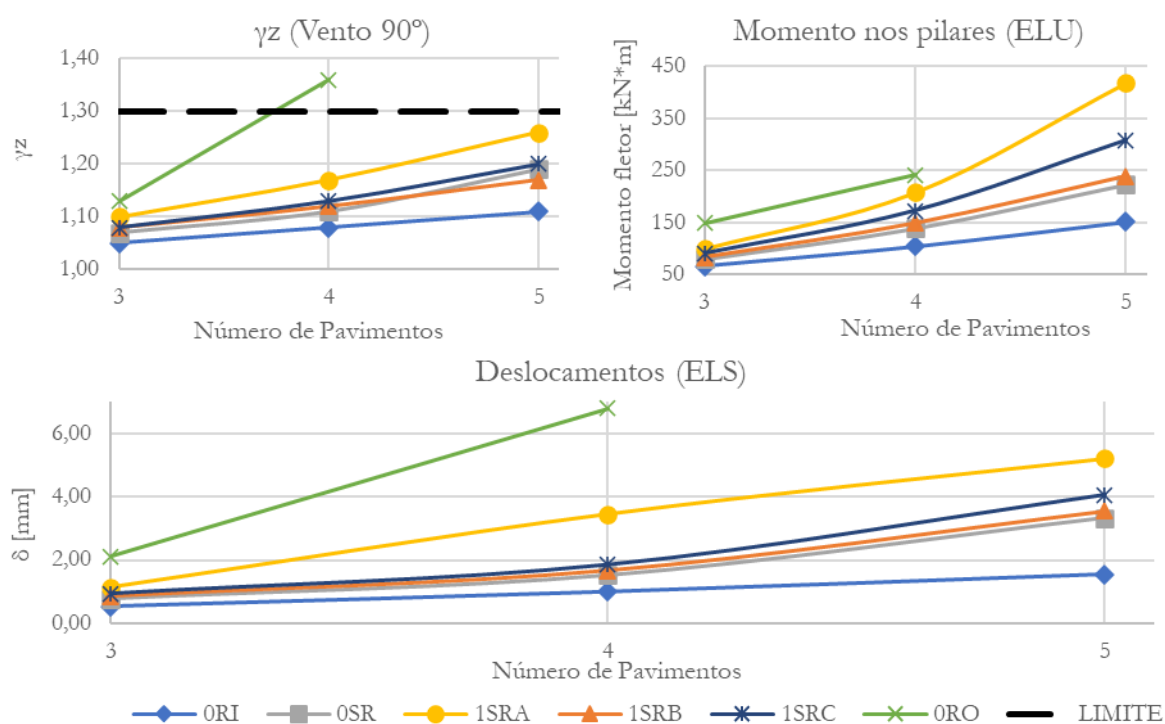


Figura 3: Resultados - Análise Paramétrica 1

Quando adotado apoio dente Gerber nas vigas (Caso 1SRA), com a mesma área de armadura de continuidade que o caso original (Caso 0SR), obtém-se o aumento de aproximadamente 57% dos deslocamentos e 87% nos momentos nos pilares. Isso indica que, apesar de ser uma solução arquitetônica interessante, o apoio dente Gerber promove maiores deslocamentos e concentração de esforços.

A título de comparação, contempla-se o Caso 1SRC, no qual a rigidez secante é calculada através do Método dos Componentes e considera-se apoio tipo Gerber. Observa-se uma configuração de deslocamento intermediária, quando comparado com os casos com seção plena no apoio (Caso 0SR) e apoio dente Gerber (Caso 1SRA) cuja rigidez é calculada através da norma vigente, sendo todos os casos com a mesma área de armadura de continuidade.

Na análise dos esforços na base dos pilares, no ELU, observa-se que a redução da rigidez das ligações resulta em maiores esforços nos pilares, ou seja, as ligações viga-

pilar influenciam na redistribuição dos esforços entre elementos, reduzindo concentração de tensões.

Verifica-se que a redução da área de armadura de continuidade (Caso 1SRB) não provocou efeitos significativos na estabilidade global, nos deslocamentos e nos esforços, indicando que o caso inicial 0SR pode estar superdimensionado.

### 3.2 Análise Paramétrica 2

Analisando a estabilidade global, na Figura 4, observa-se a similaridade guardada entre os casos 2SRB, 2SRC e 0SR, bem como que no caso com maior rigidez no último pavimento e menor no primeiro (Caso 2SRA) obtêm-se uma estrutura no limiar do limite que permite a consideração aproximada dos efeitos de 2ª ordem (através de  $\gamma_z$ ).

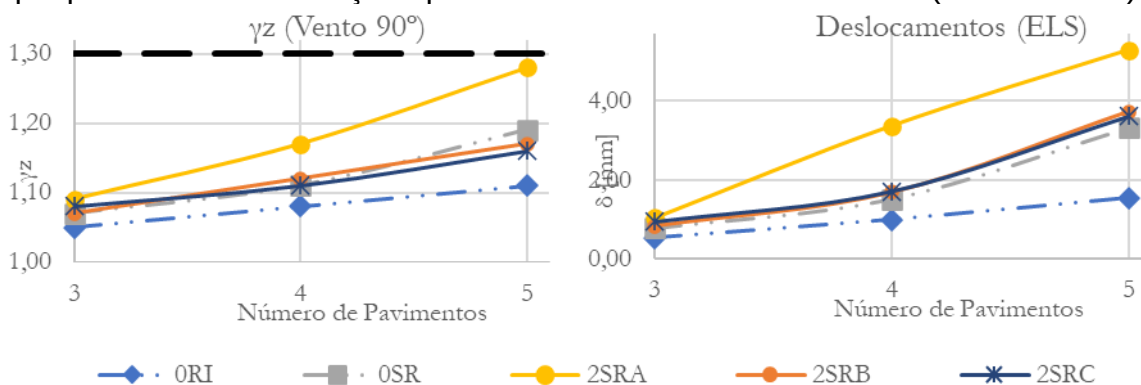


Figura 4: Resultados - Análise Paramétrica 2

Ao confrontar essa inferência com os deslocamentos, constata-se que o Caso 2SRA redonda na estrutura mais deslocável dessa análise, embora distante do limite prescrito em norma. Portanto, o padrão de deformação apresentado no Caso 2SRA permite inferir que a rigidez das ligações nos primeiros pavimentos é determinante no desempenho da estrutura.

Se tratando dos deslocamentos, pode-se observar que há um comportamento correlato entre os casos 0SR, 2SRB e 2SRC. Essa constatação é importante por permitir uma concepção racional e otimizada de estruturas: não se demanda que todas as ligações tenham a mesma rigidez (permitindo ligações com menos armaduras, por exemplo, nos pavimentos superiores), para a manutenção de patamares de deslocabilidade satisfatórios.

Essa condição é relevante para estruturas pré-moldadas correntes, já que a transmissão de esforços entre viga e pilar, no último pavimento, geralmente não é exequível. Essa afirmação é válida devido aos pilares geralmente serem interrompidos (e, por conseguinte, não possibilita a transmissão satisfatória de esforços para o pilar). Portanto, a consideração de ligações rotuladas no último pavimento é fidedigna, e recomendada, na análise de estrutura pré-moldadas.

Desta forma, se pode concluir que a solução de enrijecimento das ligações nos primeiros pavimentos é a mais eficiente, bem como que a consideração de ligações rotuladas no

último pavimento, além de fidedigna com a exequibilidade do sistema construtivo, não acarreta consequências significantes na análise estrutural.

#### 4. Conclusões

O presente estudo averigua as implicações da introdução de ligações semirrígidas, entre vigas e pilares, em estruturas pré-moldadas considerando os aspectos normativos. São observados os efeitos no contexto geral (estabilidade global e redistribuição de esforços) e nos elementos constituintes (deslocamentos dos pilares e esforços solicitantes) da estrutura.

Observa-se que as disposições normativas são interpretativas. A ABNT NBR 9062<sup>[1]</sup>, ao dispor sobre as tipologias de ligação (quando não soldadas), não aborda uma solução de apoio dente Gerber, a qual tem ampla adoção nas obras brasileiras. A consideração dessa solução nas análises desenvolvidas resultou em estruturas mais deslocáveis, indicando que a norma deve explicitar melhor a consequência da combinação de apoio tipo dente Gerber com armaduras de continuidade.

Quando adotado apoio dente Gerber nas vigas da Análise 1, com a mesma área de armadura de continuidade, obteve-se o aumento de aproximadamente 57% dos deslocamentos e 87% nos momentos nos pilares. Isso indica que, apesar de ser uma solução arquitetônica interessante e evitar a instabilidade lateral em vigas, o apoio tipo dente Gerber promove estruturas com maior deslocabilidade e propicia concentração de esforços nos elementos estruturais. Portanto, a adoção das tipologias 1 e 3 em vigas com apoio tipo dente Gerber, nas quais ocorre a diminuição da altura útil da viga na ligação, pode conduzir a resultados desfavoráveis à segurança.

A Análise 1 apresentou um resultado em que a redução de 35% da armadura de continuidade da ligação ainda manteve resultados aceitáveis (incremento de 10% dos deslocamentos). Isso indica que a configuração original estava superdimensionada, e caso a norma abrangesse o pré-dimensionamento da ligação, obter-se-ia, sumariamente, uma área de aço adequada e possivelmente otimizada.

Na Análise 2 observa-se que a redução da rigidez das ligações, maiores nos primeiros pavimentos e menores nos últimos, não resulta em mudança significativa de comportamento estrutural. Portanto, o conjunto dessa análise indica que não há necessidade de se considerar todas as ligações com a mesma rigidez, sendo possível otimizar o comportamento da estrutura enrijecendo, primordialmente, as ligações dos primeiros pavimentos.

Outra conclusão importante é que a consideração de ligações rotuladas, no último pavimento, não gera resultados adversos na análise estrutural. Por ser esta uma solução praticamente inerente ao sistema construtivo (geralmente os pilares são interrompidos no nível da última laje, tornando inexecutível a transferência de esforços das vigas para os pilares), sugere-se a adoção dessa consideração na análise estrutural, de forma a obter um modelo fidedigno e representativo de estruturas pré-moldadas usuais.

Conclui-se, portanto, que o presente estudo pode auxiliar na difusão da aplicabilidade do disposto na ABNT NBR 9062<sup>[1]</sup>, visto que somente na sua última versão passou a contar com definições pertinentes a ligações semirrígidas. O presente estudo indica possíveis boas práticas no tocante às considerações de projetos que envolvem ligações semirrígidas, no que tange ao comportamento de estruturas pré-moldadas (em relação à

análise de estabilidade global, de deslocabilidade e dos esforços), percorrendo sobre a influência da variação da rigidez das ligações viga-pilar (global e localmente), adoção de apoio Gerber, entre outras.

## 5. Agradecimentos

Agradecimentos à Pró-Reitoria de Graduação e Educação Profissional (PROGRAD) e à Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias (PROREC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela bolsa de apoio para o desenvolvimento do estudo.

## 6. Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.
- [2] REZENDE, A.H.; GUTSTEIN, D; KIMURA, E.F.A. **Estudo de estabilidade global de estruturas de concreto pré-moldado considerando ligações semirrígidas segundo critérios da ABNT NBR 9062:2017 e do Método dos Componentes**. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 61º, Fortaleza, 2019, Anais, Fortaleza, 2019.
- [3] COSTA, R. R. R.; LIMA, M. C. V.; ALVA, G. M. S. MAGALHAES, E. S. **Otimização da rigidez à flexão das ligações viga-pilar e pilar-fundação em estruturas pré-moldadas de concreto**. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2017, vol.10, n.5, pp.985-997. ISSN 1983-4195. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000500003>.
- [4] REZENDE, A. H. **Eficiência de ligação semirrígida aplicada em concreto pré-moldado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- [6] FERREIRA, M. A.; ARAÚJO, D. L.; JEREMIAS JÚNIOR, A. ORI.; CATOIA, 2SRA.; KATAOKA, M. N. **Estabilidade global de estruturas pré-moldadas: efeito das ligações semirrígidas**. In: 1o Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. Anais...2005.
- [7] EL DEBS, M. K.; MIOTTO, A. M.; EL DEBS, A. L. ORI. **Analysis of a semi-rigid connection for precast concrete**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, v. 163, n. 1, p. 41–51, 2010.
- [8] EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. Oficina de Textos, 2ed., São Paulo, 2017.