

Análise da Estabilidade Global de Pórticos Planos de Concreto Pré-moldado Considerando a Influência da Ligação Viga Pilar

Efrain Soares Bernardes¹
Jerônimo Santiago Alves Arantes²
Wanderlei Malaquias Pereira Junior³
Daniel de Lima Araújo⁴

Resumo

A estabilidade global das estruturas de concreto pré-moldado apoticadas necessita da devida atenção quando se trata das ligações viga-pilar, uma vez que a sua deformabilidade tem influência nos esforços e nos deslocamentos da estrutura. Essa influência é mais significativa nas estruturas não contraventadas, nas quais os pórticos são responsáveis pela estabilidade global da estrutura. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da influência da rigidez das ligações viga-pilar e suas tipologias na estabilidade global de pórticos planos em concreto pré-moldado. Para tanto, foi implementada uma rotina em Python a fim de calcular os esforços em pórticos planos com ligações semirrígidas. Essa mesma rotina pode calcular a área da armadura de continuidade na ligação e, por meio de um processo iterativo, determinar o valor do fator de restrição à rotação (α_r) que atende simultaneamente os critérios de resistência e rigidez na ligação viga-pilar. Em seguida, são analisados três pórticos planos em concreto pré-moldado, com três, cinco e sete pavimentos. Primeiramente, foi realizada a comparação dos resultados dos deslocamentos horizontais no topo dos pórticos obtidos pela rotina desenvolvida no trabalho com os resultados presentes na literatura e obtidos a partir de programas baseados no método dos elementos finitos. Houve excelente convergência entre os resultados, o que validou a rotina desenvolvida. Na sequência, utilizando o processo iterativo, foram obtidos automaticamente os valores dos fatores de restrição à rotação α_r e do coeficiente γ_z para cada pórtico analisado. Os resultados mostram que o enrijecimento das ligações viga-pilar nos pavimentos inferiores reduziu significativamente o deslocamento horizontal da estrutura.

Palavras-chave: Concreto pré-moldado; Ligação semirrígida; Estabilidade Global; Ligação Viga-Pilar.

1 Introdução

Correntemente as estruturas de concreto pré-moldado em esqueleto, ou apoticadas, são divididas em dois grupos: estruturas isostáticas e estruturas hiperestáticas. No caso das estruturas pré-moldadas isostáticas, as ligações viga-pilar se comportam como articulações e a estabilidade global do edifício depende da rigidez dos pilares, considerados em balanço e engastados na fundação. Neste caso o deslocamento horizontal da estrutura pré-moldada é bastante superior à de uma estrutura monolítica de mesmas dimensões

Para reduzir esse deslocamento, normalmente são utilizadas estruturas de contravetamento e a estrutura pré-moldada é dita contraventada. Por outro lado, no caso das estruturas pré-moldadas e hiperestáticas, que têm ligações viga-pilar resistentes à flexão, tais estruturas apresentam um deslocamento horizontal inferior ao das estruturas pré-moldadas isostáticas, porém, normalmente, ainda superior ao de uma estrutura monolítica com ligações viga-pilar rígidas. Neste caso a estrutura pré-moldada é dita não contraventada e os pórticos em concreto pré-moldado são responsáveis pela estabilidade global da estrutura. Em alguns casos,

¹ Mestrando em Estruturas, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás – UFG, efrain.soaresbernardes@gmail.com

² Graduando em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás – UFG, jeronimo.santiago@discente.ufg.br

³ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Catalão – UFCAT, wanderlei_junior@ufcat.edu.br

⁴ Professor Doutor, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás – UFG, dlaraujo@ufg.br

este tipo de estrutura pré-moldada hiperestática é denominado semi-contínua.

Há várias formas de se classificar uma ligação viga-pilar em estruturas pré-moldadas, sendo a mais usual a baseada no momento fletor transferido pela ligação. Assim, tem-se a ligação articulada, que não transmite momento fletor, a ligação rígida, que transmite integralmente o momento fletor e as ligações semirrígidas, que transmitem parcialmente os momentos fletores das vigas para os pilares (EL DEBS, 2000). Outra forma de classificar as ligações semirrígidas foi proposta por Ferreira, El Debs e Elliott (2002) e Ferreira *et al* (2005), e a classificação depende não apenas da resistência, mas, também, da rigidez à flexão da ligação.

A estabilidade global ganha importância no estudo das estruturas de concreto pré-moldado de múltiplos pavimentos devido à presença das ligações viga-pilar deformáveis, que influenciam os esforços e os deslocamentos da estrutura. Deste modo, a deslocabilidade da estrutura pré-moldada é bastante sensível à rigidez das ligações viga-pilar. Assim, o comportamento semirrígido dessas ligações deve ser considerado na análise global para que se tenha uma análise mais precisa dos esforços e dos deslocamentos de primeira ordem em uma estrutura pré-moldada.

No Brasil, com a revisão da ABNT NBR 9062: 2017, o tema sobre estabilidade global em estruturas pré-moldadas tornou-se mais relevante, havendo a necessidade de se identificar a influência da rigidez das ligações viga-pilar nos esforços globais de segunda ordem que atuam na estrutura. Segundo o procedimento recomendado na ABNT NBR 6118: 2014, o coeficiente γ_z pode ser empregado para avaliar a possibilidade de dispensa dos esforços globais de segunda ordem. A equação (1) apresenta a expressão para determinação do coeficiente γ_z , o qual deve ser avaliado considerando os efeitos da rigidez secante da relação momento-rotação das ligações e a não linearidade física aproximada dos elementos estruturais.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_d}{M_{1d}}} \quad (1)$$

As solicitações globais de segunda ordem podem ser desprezadas no caso das estruturas de nós fixos, quando se tem $\gamma_z \leq 1,10$. Quando se tem $1,10 < \gamma_z \leq 1,30$, as solicitações finais podem ser avaliadas a partir da majoração adicional dos esforços horizontais da combinação de carregamento considerada por $0,95\gamma_z$. Este procedimento simplificado é válido apenas para estruturas com mais de quatro pavimentos. No caso das estruturas pré-moldadas, entretanto, este procedimento

pode ser aplicado mesmo para casos de estruturas com menos de quatro pavimentos, desde que a geometria da estrutura apresente regularidade, não haja discrepância significativas entre os pés-direitos nos pavimentos sucessivos e não ocorra variações bruscas acentuadas entre os momentos de inércia dos pilares nos pavimentos sucessivos (ABNT/CB-002, 2017).

Quando a estabilidade de uma estrutura pré-moldada for garantida por meio da ação de pórtico, através de ligações resistentes à flexão, as quais têm comportamento semirrígido, com fator de restrição à rotação entre 0,15 e 0,85, a ABNT NBR 9062: 2017 estabelece que o projeto da ligação deve levar em conta simultaneamente os critérios de resistência e de rigidez. Neste caso a resistência da ligação deve ser compatível com os esforços mobilizados na estrutura e determinados na análise estrutural considerando o comportamento semirrígido da ligação.

O fator de restrição à rotação α_r pode ser calculado por meio da equação (2) apresentada em Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005). Nessa equação EI é a rigidez equivalente da viga, L é o comprimento da viga com carregamento uniforme e R_{sec} é a rigidez secante da ligação viga-pilar. O fator de restrição à rotação assume valores entre 0 e 1 para ligações articuladas e rígidas, respectivamente.

$$\alpha_r = \left[1 + \frac{3EI}{R_{sec}L} \right]^{-1} \quad (2)$$

O objetivo deste trabalho é avaliar o coeficiente γ_z em estruturas pré-moldadas com ligações semirrígidas. Para isso, considera-se o efeito da deformabilidade das ligações viga-pilar, ou seja, é considerado o comportamento semirrígido das mesmas para a obtenção dos esforços e dos deslocamentos na análise de primeira ordem. Para atender simultaneamente os critérios de resistência e de rigidez das ligações viga-pilar, uma rotina iterativa foi desenvolvida neste trabalho. Para aplicação da rotina desenvolvida, são utilizadas duas tipologias típicas de ligação viga-pilar apresentadas na ABNT NBR 9062: 2017.

2 Procedimentos metodológicos

Para a análise da estabilidade global, foram adotados os pórticos planos em concreto pré-moldado que foram utilizados no trabalho de Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005). Esses autores analisaram pórticos planos com três, cinco e sete pavimentos com diferentes valores para o fator de restrição à rotação α_r . Contudo, diferentemente do realizado por esses

autores, neste trabalho são empregadas duas tipologias típicas de ligação viga-pilar recomendadas pela ABNT NBR 9062: 2017.

2.1 Análise simplificada segundo o PCI

Inicialmente, realizou-se a análise da estabilidade global de um pórtico plano utilizando o processo simplificado proposto no PCI (2010) para avaliação do comportamento semirrígido da ligação viga-pilar. A Figura 1 mostra a simplificação proposta pelo PCI (2010) para pórticos sujeitos à atuação de forças horizontais. Nessa simplificação, a ligação semirrígida é definida a partir de barras com área e inércia devidamente escolhidas para representar a rotação da ligação viga-pilar.

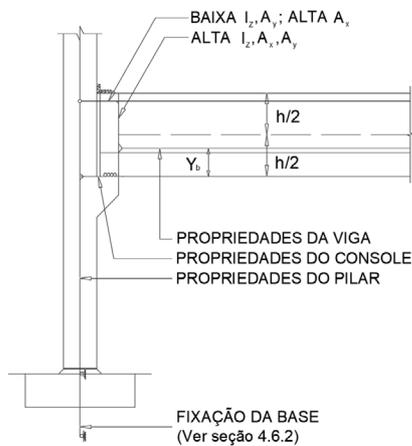
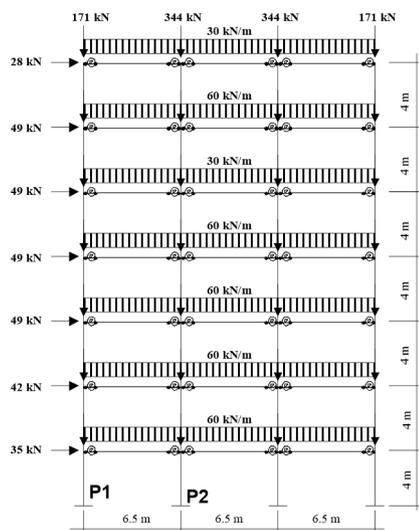


Figura 1 – Sugestão de representação da ligação viga-pilar para pórticos com forças horizontais.

Fonte: adaptado do PCI (2010).



O processo simplificado proposto no PCI (2010) foi aplicado ao pórtico pré-moldado de sete pavimentos previamente analisado por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) e mostrado na Figura 2a. Os pilares têm seção transversal de 50 cm x 50 cm e as vigas possuem seção transversal de 30 cm x 60 cm. O pórtico é confeccionado com concreto de 35 GPa de módulo de elasticidade tangente inicial

A área e a inércia das barras na ligação viga-pilar foram definidas a partir da análise da viga mostrada na Figura 3, que representa uma viga carregada com uma carga distribuída e ligada aos apoios por meio de uma ligação semirrígida. Para essa análise, considerou-se uma ligação semirrígida com o fator de restrição à rotação α_r igual a 0,4, o que corresponde a um momento elástico no meio da viga M_{MS} , obtido pela equação (3), igual a 211,25 kNm e um momento fletor negativo no apoio M_E , obtido pela equação (4), igual a 105,63 kNm. As equações (3) e (4) estão de acordo com o método *Beam-line* descritos em PCI Committee on Connection Details (1988) e em Ferreira, El Debs; Elliott (2002). Para simplificar a análise, foram consideradas duas barras rígidas horizontais com 35 cm de comprimento, que representam o comprimento do consolo na ligação viga-pilar.

$$M_{MS} = \frac{qL^2}{12} \left(\frac{3 - 1,5\alpha_r}{2 + \alpha_r} \right) \quad (3)$$

$$M_E = \frac{qL^2}{12} \left(\frac{3\alpha_r}{2 + \alpha_r} \right) \quad (4)$$

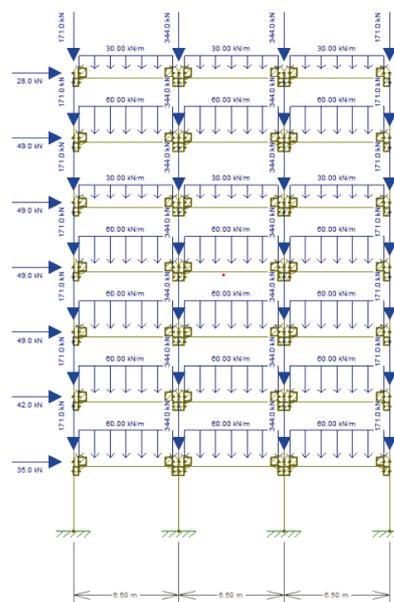


Figura 2 – Pórtico plano com ligação viga-pilar semirrígida analisado por Ferreira e Araújo Jeremias Jr. (2005).

Fonte: adaptado de Ferreira, Araújo e Jeremias Jr (2005).

A partir das configurações da viga mostradas na Figura 3 obteve-se a área de 0,0124 m² e a inércia de 2,4826 x 10⁷ mm⁴ para a barra vertical na ligação, o que fornece os máximos momentos fletores positivo e negativo de 211,25 kNm e 105,63 kNm, respectivamente

A Figura 2b mostra o pórtico modelado no programa FTOOL (MARTHA; GATTASS, 1992), com a representação simplificada das ligações viga-pilar. Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) analisaram esse pórtico utilizando um programa de elementos finitos e obtiveram um deslocamento horizontal no topo do pórtico de 0,139 m. Esse valor é 21,9% maior que o valor de 0,114 m obtido com as ligações viga-pilar representadas de forma simplificada. Com isso o valor do coeficiente γ_z obtido por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) foi de 1,35, valor 8,9% maior que o obtido nesta análise simplificada, que foi igual a 1,24. A partir desse resultado, conclui-se que a simplificação da ligação viga-pilar como recomendado pelo do PCI (2010) mostrou-se pouco precisa na avaliação do coeficiente γ_z em pórticos planos com ligações viga-pilar semirrígidas.

A Figura 2b mostra o pórtico modelado no programa FTOOL (MARTHA; GATTASS, 1992), com a representação simplificada das ligações viga-pilar. Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) analisaram esse pórtico utilizando um programa de elementos finitos e obtiveram um deslocamento horizontal no topo do pórtico de 0,139 m. Esse valor é 21,9% maior que o valor de 0,114 m obtido com as ligações viga-pilar representadas de forma simplificada. Com isso, o valor do coeficiente γ_z obtido por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) foi de 1,35, valor 8,9% maior que o obtido nesta análise simplificada, que foi igual a 1,24. A partir desse resultado, conclui-se que a simplificação da ligação viga-pilar como recomendado pelo do PCI (2010) mostrou-se pouco precisa na avaliação do coeficiente γ_z em pórticos planos com ligações viga-pilar semirrígidas.

2.2 Programa FINITO_SR para pórticos planos com ligação semirrígida

O método simplificado proposto no PCI (2010) para representação da ligação viga-pilar semirrígida é

útil quando se dispõe apenas de programas para análise de pórticos desenvolvidos para estruturas de concreto moldado no local. Nesse tipo de estrutura, é comum admitir ligações viga-pilar com comportamento rígido. Contudo, tendo em vista a discrepância observada no item 2.1, foi desenvolvido neste trabalho um programa de pórtico plano com ligações semirrígidas. Para isso foi utilizada a metodologia apresentada em Ferreira (1993) e Ferreira (1999) para representar o comportamento semirrígido da ligação viga-pilar, utilizando o fator de restrição à rotação α_r .

Para o desenvolvimento do código computacional FINITO_SR, foi modificada a rotina implementada no programa FINITO, desenvolvido por Pereira Jr. (2021), para consideração do carregamento distribuído nas barras horizontais de um pórtico plano. Em seguida, a matriz de rigidez local das vigas foi modificada de modo a considerar a influência da rotação relativa na ligação viga-pilar. Com isso, as solicitações e deslocamentos nodais passam a depender do valor informado para o fator de restrição à rotação α_r . Adicionalmente, foram implementadas no código as tipologias 1 a 4 especificadas na ABNT NBR 9062:2017 para ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas. Com isso, o cálculo da rigidez secante da ligação é realizado automaticamente por meio da equação (5), e o fator de restrição à rotação α_r é determinado automaticamente por meio da equação (2).

$$R_{sec} = k \frac{A_s E_s d^2}{L_{ed}} \quad (5)$$

Na equação (5) k é o coeficiente de ajustamento da rigidez secante e L_{ed} é o comprimento efetivo de deformação por alongamento da armadura de continuidade. Esses valores dependem do tipo de ligação adotada e estão definidos na Tabela 1 da norma ABNT NBR 9062: 2017. Ainda na equação (5), d é a altura útil da seção resistente na ligação negativa, E_s é o módulo de elasticidade do aço e A_s é a armadura de continuidade negativa na ligação viga-pilar.

A ABNT NBR 9062: 2017 ressalta que o projeto de estruturas pré-moldadas com ligações semirrígidas pode ser baseado em uma análise linear aproximada, utilizando a rigidez secante da ligação R_{sec} calculada com a equação (5). Esse procedimento é válido

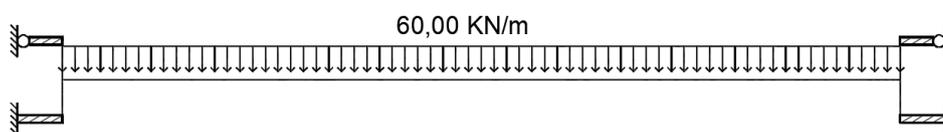


Figura 3 – Viga para definição da ligação semirrígida segundo proposta do PCI (2010).

Fonte: adaptado do PCI (2010).

desde que o momento solicitante elástico de projeto M_d , determinado admitindo engastamento perfeito na ligação viga-pilar, seja menor que o momento de escoamento da ligação M_y calculado com a armadura A_s ($M_y = 0,9A_s f_{yk} d$). Essa ideia é válida no caso das ligações rígidas, com fator de restrição à rotação α_r maior que 0,85, nas quais basta ser atendido apenas o critério de resistência. Nas estruturas com ligações semirrígidas, entretanto, deve-se atender também o critério de rigidez, como estabelecido na ABNT NBR 9062: 2017. Isso significa que, como apresentado no método Beam-line descrito no PCI Committee on Connection Details (1988) e por Ferreira, EL Debs e Elliott (2002), o momento fletor solicitante negativo na ligação viga-pilar M_{Ed} depende da rigidez secante da ligação, R_{sec} , como mostrado na Figura 4. Como a rigidez, determinada pela equação (5), depende da armadura de continuidade negativa na ligação viga-pilar, que depende do momento fletor solicitante M_{Ed} , tem-se um processo indeterminado.

A indeterminação no projeto pode ser evitada se a armadura de continuidade for calculada para resistir, pelo menos, o momento solicitante elástico de projeto M_d determinado admitindo engastamento perfeito na ligação viga-pilar. De posse da armadura A_s , a rigidez secante é determinada pela equação (5), o fator de restrição α_r é determinado pela equação (2) e os momentos fletores no vão M_{MSd} e na extremidade (MEd) das vigas são obtidos pelas equações (3) e (4). Esse procedimento é adequado para ligações rígidas ($\alpha_r \geq 0,85$), pois a diferença entre os momentos M_{Ed} e M_d é pequena.

No caso de ligação viga-pilar com baixa rigidez, porém, esse procedimento resulta em taxa de armadura

de continuidade bem superior ao necessário para resistir ao momento M_{Ed} que de fato atua na ligação viga-pilar. Por essa razão, na prática corrente, muitas vezes é realizada a flexibilização da ligação viga-pilar a partir da redução do momento solicitante elástico de projeto M_d . O valor dessa redução é escolhido em projeto, contudo, caso se deseje que a ligação viga-pilar pré-moldada seja considerada rígida, ou seja, com fator de restrição $\alpha_r \geq 0,85$, deve-se limitar essa redução em, no máximo, 10%. Maiores valores de redução implicam em considerar no projeto ligações com comportamento semirrígido e, portanto, deve-se verificar, também, o critério de rigidez da ligação.

No sentido de se obter um dimensionamento que atenda simultaneamente aos critérios de rigidez e de resistência em ligações semirrígidas com $0,85 \leq \alpha_r \leq 0,15$, foi, então, implementado um procedimento iterativo ao código computacional FINITO_SR desenvolvido. Na Figura 5 é mostrado o fluxograma do código desenvolvido. Por meio desse procedimento, o usuário informa o valor inicial do fator de restrição α_r , que será igual em todas as ligações viga-pilar, e o código computacional automaticamente determina os valores do fator de restrição α_r em cada ligação viga-pilar que atende simultaneamente ao critério de resistência ($M_y = M_{Ed}$ na Figura 4) com a rigidez da ligação determinada usando a armadura de continuidade, A_s , efetivamente presente na ligação. O cálculo da armadura A_s foi realizada pela teoria convencional do concreto armado submetido à flexão simples (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014), limitado ao dimensionamento nos domínios 2 e 3 definidos na ABNT NBR 6118: 2014.

Vale destacar que ao se utilizar esse procedimento

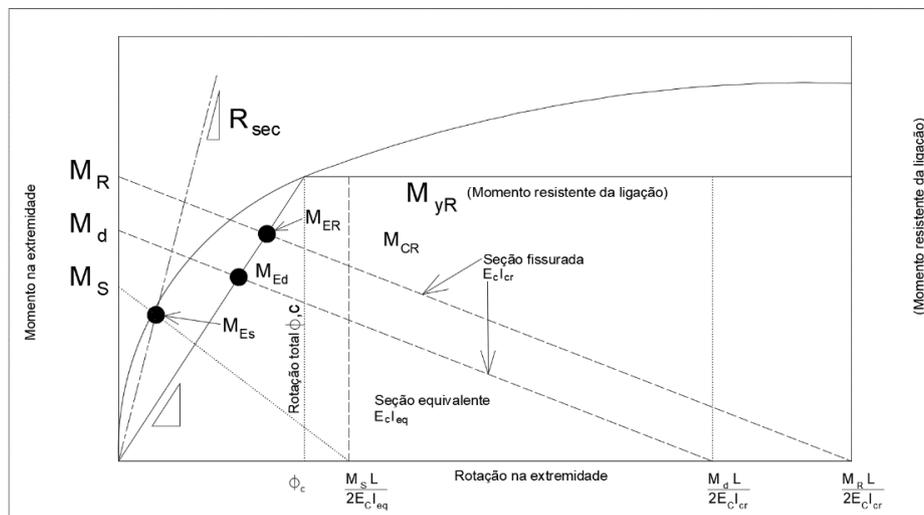


Figura 4 – Procedimento teórico para projeto de ligações semirrígidas.

Fonte: adaptado de Ferreria, El Debs e Elliot (2002).

iterativo, a restrição de que o momento de escoamento da ligação M_y deve ser maior que o momento solicitante elástico de projeto M_d , determinado admitindo engastamento perfeito na ligação viga-pilar, é abandonado. Isso não causa prejuízos à segurança da estrutura, uma vez que é atendido o critério de resistência na ligação viga-pilar no Estado-Limite Último. Além disso, o momento fletor positivo na viga passa a ser avaliado de forma mais precisa, uma vez que o critério de rigidez é sempre verificado para a armadura efetivamente presente na ligação viga-pilar.

O critério de parada do processo iterativo foi definido em função da área de aço da armadura de continuidade na ligação, sendo adotado o maior valor de área de aço calculado à esquerda e à direita da ligação no caso dos pilares intermediários. Quando a variação da área de aço entre duas iterações consecutivas é inferior à tolerância de 10^{-5} cm^2 , o código computacional fixa o valor do fator de restrição α_r nessa ligação. O processo iterativo é interrompido quando a variação no valor da armadura de continuidade é menor que a tolerância

em todas as ligações do pórtico ou ao ser atingido o número máximo de 50 iterações. Se em alguma ligação viga-pilar o fator de restrição α_r atingir os limites de 0,15 ou 0,85, o valor limite de α_r é imposto à ligação e o fator de restrição não é mais atualizado no processo iterativo.

O código computacional foi desenvolvido na linguagem Python e implementado utilizando o compilador *Pycharm* (JETBRAINS, 2009). A entrada de dados é feita mediante arquivo de dados estruturado. Nesse arquivo de dados foram consideradas apenas duas tipologias de ligação, agrupando-se em um único tipo as tipologias 1 e 3 e em um segundo tipo as tipologias 2 e 4 da ABNT NBR 9062: 2017. O usuário tem a opção de informar os valores do fator de restrição α_r para as ligações e apenas determinar os esforços e deslocamentos do pórtico com ligação semirrígida. Ou então pode escolher uma das tipologias de ligação viga-pilar disponível e o código resolve o procedimento iterativo, fornecendo ao final o valor do fator de restrição α_r em cada ligação.

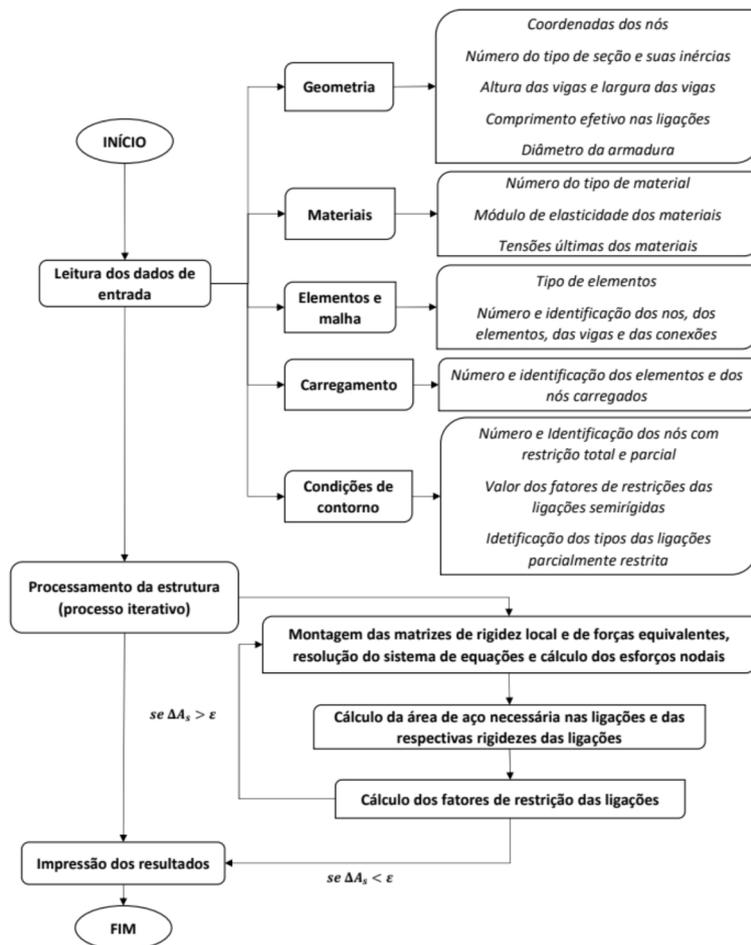


Figura 5 – Fluxograma do código computacional FINITO_SR.

Fonte: própria

3 Resultados e Discussão

Neste item é apresentada a validação do código computacional FINITO_SR, bem como é realizada a comparação com os resultados obtidos no trabalho de Ferreira; Araújo; Jeremias Jr. (2005).

3.1 Validação do código computacional

Na Figura 6 é mostrada a geometria de um pórtico plano monolítico de dois pavimentos utilizado na validação do código computacional FINITO_SR. Os pilares têm dimensão de 40 cm x 50 cm e as vigas têm dimensão de 12 cm x 60 cm. O material tem módulo de elasticidade de 35 GPa. Na Tabela 1 são mostrados os esforços e os deslocamentos obtidos do código FINITO_SR e pelo FTOOL para o elemento 10.

Comparando os resultados do Quadro 1, nota-se que não houve diferença nos deslocamentos nodais obtidos do código computacional FINITO_SR e pelo FTOOL (2022). A diferença as solicitações nodais foi menor que 0,08% e deve-se ao arredondamento usado. Assim, considera-se validado o código computacional FINITO_SR para avaliação de pórticos planos monolíticos com carregamento distribuído aplicado nas vigas.

Na sequência, o código computacional FINITO_SR foi validado para representação de pórticos planos com ligações viga-pilar semirrígidas. Para isso foram utilizados os pórticos de três, cinco e sete pavimentos

analisados por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) em um programa comercial de elementos finitos (Quadro 2). Nesta análise, o código FINITO_SR determina os deslocamentos e esforços para o valor de α_r informado no arquivo de entrada. Esses valores foram adotados iguais em todas as ligações viga-pilar. Nota-se que a diferença percentual no deslocamento horizontal medido no topo do pórtico, em geral, foi menor que 1%, independentemente do valor do fator de restrição utilizado ($0 \leq \alpha_r \leq 1$) e da altura do pórtico. A maior diferença, de 3%, foi observada no pórtico de três pavimentos com a ligação rígida ($\alpha_r = 1,00$), sendo considerado um valor aceitável. Assim, considera-se validado o código computacional FINITO_SR para avaliação de pórticos planos semirrígidos com carregamento distribuído aplicado nas vigas.

3.2 Análise pelo procedimento iterativo para o cálculo do fator de restrição

Tendo sido validado o código computacional FINITO_SR para pórticos planos semirrígidos, neste item analisa-se o procedimento iterativo para o cálculo do fator de restrição α_r . Para isso foram utilizados, novamente, os pórticos de três, cinco e sete pavimentos modelados por Ferreira; Araújo; Jeremias Jr. (2005) e mostrados na Figura 7. Foram adotados três valores iniciais para o fator de restrição α_r (0,14; 0,4; 0,7), admitido igual em todas as ligações viga-pilar. Também

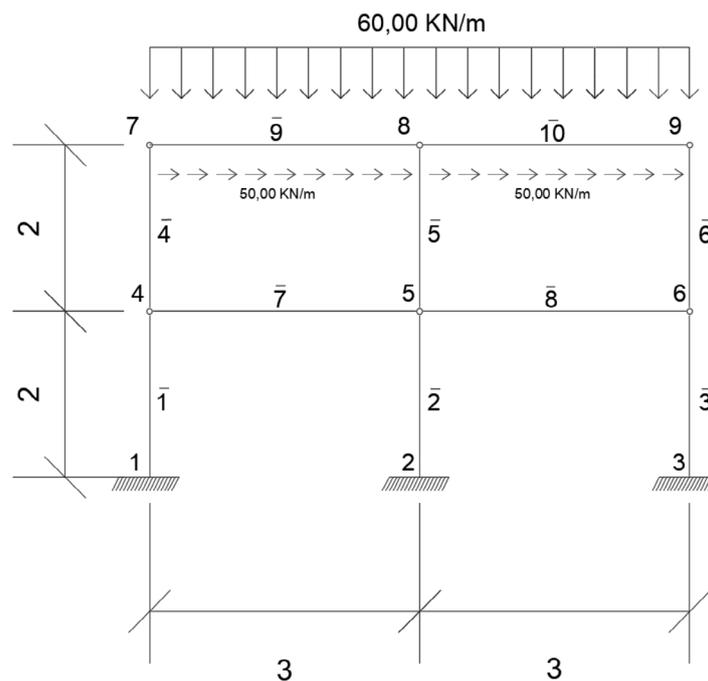


Figura 6 – Pórtico plano monolítico utilizado na validação do código FINITO_SR (dimensão em metro).

Fonte: própria.

Quadro 1 – Deslocamentos e esforços no elemento 10 do pórtico plano monolítico.

Nó	Δ_x (mm)		Δ_y (mm)		N (KN)		V (KN)		M (kNm)	
	FTOOL	FINITO_SR	FTOOL	FINITO_SR	FTOOL	FINITO_SR	FTOOL	FINITO_SR	FTOOL	FINITO_SR
8	2,942	2,942	-0,108	-0,108	52,00	52,04	41,20	41,23	27,50	27,48
9	2,915	2,915	-0,099	-0,100	-98,00	-97,96	-138,80	-138,77	118,80	118,810

Fonte: Própria.

Quadro 2 – Deslocamento horizontal no topo de pórticos planos semirrígidos.

Fator α_r	Engaste Parcial – M_E/M_R (%)	Resultado do Ansys - Ferreira; Araújo; Jeremias Jr. (2005) (mm)	FINITO_SR (mm)	Variação (%)
Pórtico de três pavimentos				
0,00	0	54,30	54,37	0,14
0,03	5	45,50	45,50	0,02
0,07	10	37,40	37,44	0,12
0,14	20	28,70	28,64	0,20
0,26	35	20,50	20,43	0,34
0,40	50	15,30	15,23	0,46
0,67	75	10,10	9,95	1,47
0,86	90	7,90	7,78	1,43
1,00	100	6,80	6,59	3,00
Pórtico de cinco pavimentos				
0,00	0	431,50	431,49	0,00
0,03	5	290,80	290,93	0,05
0,07	10	204,80	205,00	0,10
0,14	20	136,50	136,66	0,12
0,26	35	87,30	87,45	0,17
0,40	50	61,00	61,06	0,11
0,67	75	37,10	37,04	0,16
0,86	90	28,00	27,91	0,31
1,00	100	23,20	23,08	0,53
Pórtico de sete pavimentos				
0,00	0	-	1653,61	-
0,07	10	549,40	549,28	0,02
0,14	20	338,80	338,73	0,02
0,26	35	205,50	205,32	0,09
0,40	50	138,90	138,75	0,11
0,67	75	81,40	81,11	0,36
0,86	90	60,40	60,08	0,53
1,00	100	49,50	49,17	0,67

Fonte: própria

foi variada a tipologia da ligação viga-pilar, conforme apresentado na ABNT NBR 9062: 2017.

Os valores finais do fator de restrição α_r , ao final do processo iterativo, são ilustrados nas Figuras 8 a 10. Ressalta-se que não houve diferença nos valores apresentados nessas figuras ao se partir dos três diferentes valores iniciais escolhidos para o fator α_r . Assim, conclui-se que utilizando o procedimento de convergência escolhido em termos de área de aço da armadura de continuidade, o resultado do processo iterativo independe do valor inicial escolhido para o fator α_r .

Os valores finais do fator de restrição α_r , ao final do processo iterativo, são ilustrados nas Figuras 8 a 10. Ressalta-se que não houve diferença nos valores apresentados nessas figuras ao se partir dos três diferentes valores iniciais escolhidos para o fator α_r . Assim, conclui-se que utilizando o procedimento de convergência escolhido em termos de área de aço da armadura de continuidade, o resultado do processo iterativo independe do valor inicial escolhido para o fator α_r .

Para os pórticos com as tipologias 1 e 3 (junta

horizontal grauteada ou com almofada de elastômero e presença de chumbador vertical) houve uma maior variação do fator de restrição entre as ligações viga-pilar ao longo do pórtico. De forma geral o valor do fator de restrição α_r diminuiu nos pavimentos mais altos. Além disso, o fator de restrição convergiu para maiores valores à medida que a altura do pórtico aumentou. O valor máximo do fator de restrição foi de 0,54, 0,65 e 0,72 para os pórticos de três, cinco e sete pavimentos, respectivamente. Isso mostra a necessidade de ligações mais rígidas à medida em que se aumenta a altura do pórtico pré-moldado. Observa-se ainda uma diferença do valor do fator de restrição entre os pilares nas duas extremidades do pórtico, o que se deve ao fato da força horizontal estar aplicada apenas na face esquerda dos pórticos planos (Figura 7).

Para os pórticos com as tipologias 2 e 4 (ligação positiva por meio de chapas soldadas), o comportamento foi distinto. Neste caso, houve uma menor variação do fator de restrição entre as ligações viga-pilar ao longo do pórtico. De forma geral o valor do fator de restrição α_r permaneceu constante e igual ao valor limite de 0,85 nos pilares de extremidade, independentemente da

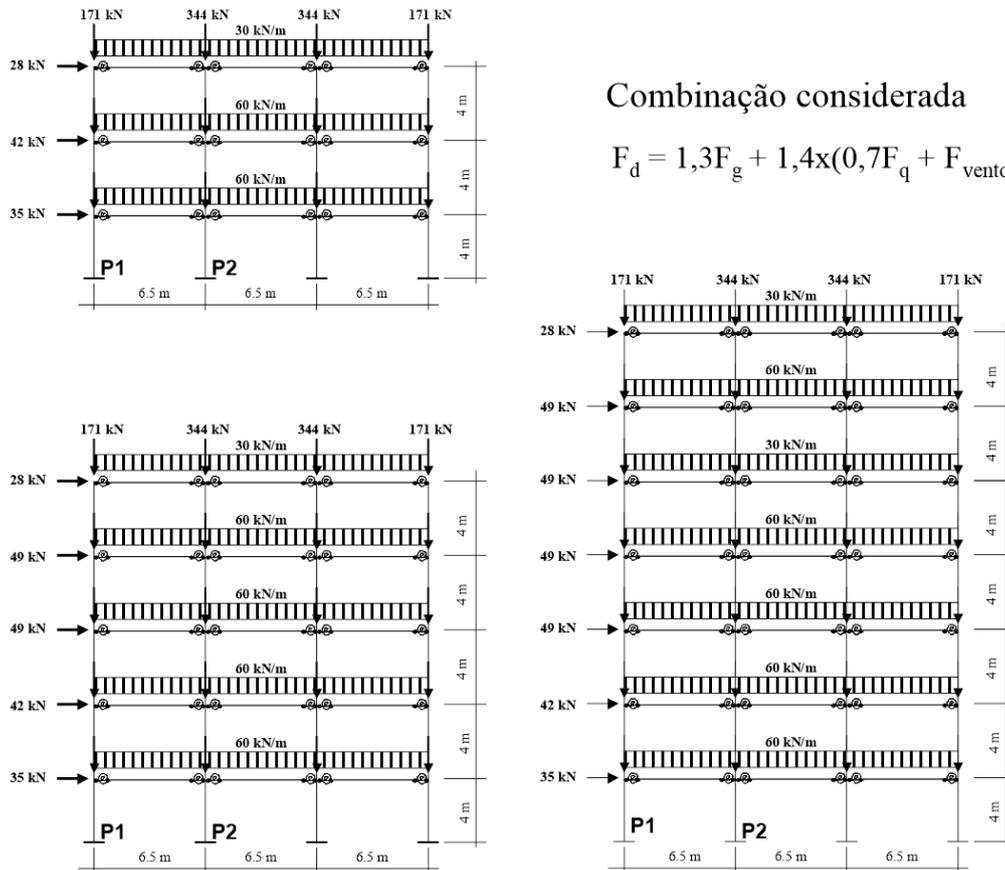


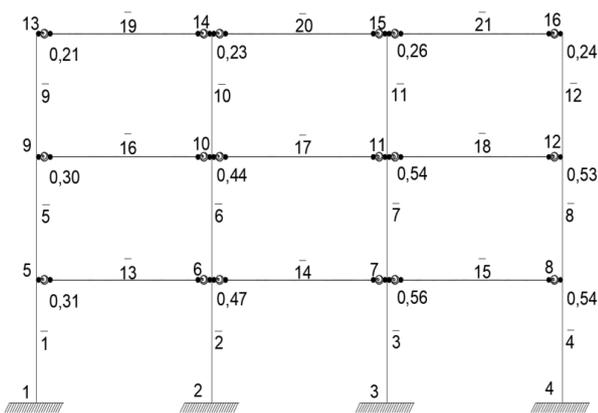
Figura 7 – Pórticos planos analisados por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005).

Fonte: extraído de Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005).

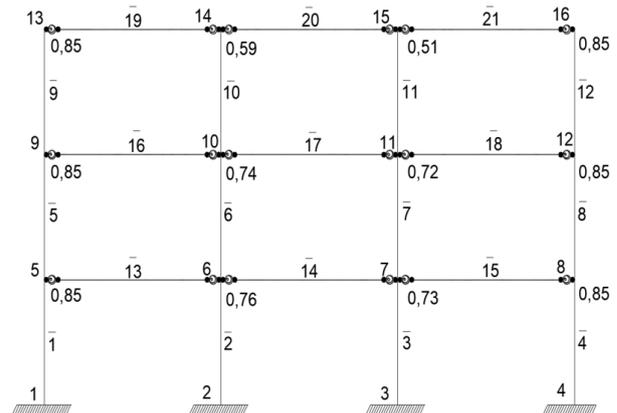
altura do pórtico e do pavimento. As variações no valor do fator de restrição foram observadas nas ligações dos pilares internos. Entretanto, o fator de restrição no primeiro pavimento variou apenas de 0,76 a 0,81 quando a altura do pórtico foi aumentada de três para cinco pavimentos. Analisando cada pórtico isoladamente, o fator de restrição diminuiu para, apenas, 0,51 no pórtico de três pavimentos. Essa menor redução e variabilidade dos valores do fator de restrição nessa tipologia de ligação, quando comparada às tipologias 1 e 3, deve-se à maior rigidez secante da ligação com a presença da chapa de aço soldada no topo do consolo. Por essa razão o código computacional converge para

soluções com ligações viga-pilar mais rígidas.

A influência do processo iterativo na determinação do fator de restrição α_r fica evidente quando se analisa o coeficiente γ_z dos pórticos de três, cinco e sete pavimentos. No Quadro 3 são mostrados os valores do coeficiente γ_z para as soluções mostradas nas Figuras 8 a 10 ao final do processo iterativo. Também são mostrados os valores do coeficiente γ_z determinados por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) para vários valores do fator de restrição α_r , admitido constante em todas as ligações viga-pilar. Como esperado, o coeficiente γ_z determinado por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) diminuiu com



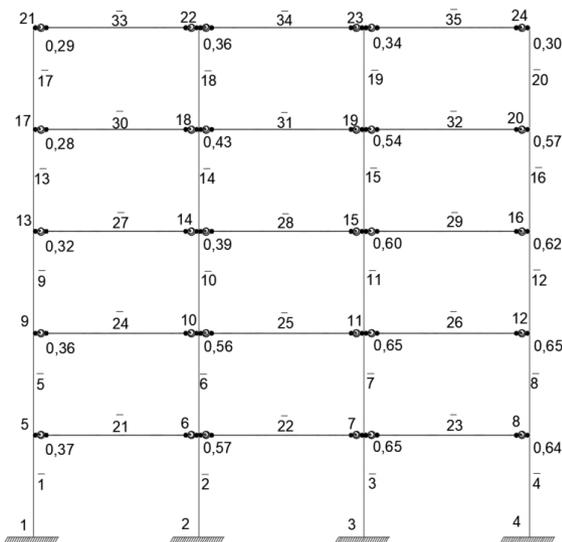
a) Tipologias 1 e 3 da NBR 9092: 2017



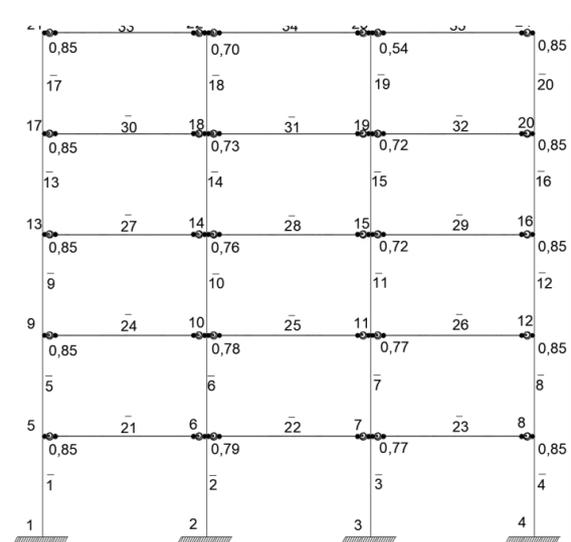
b) Tipologias 2 e 4 da NBR 9092: 2017.

Figura 8 – Fator de restrição α_r ao final do processo iterativo em um pórtico plano semirrígido com três pavimentos.

Fonte: própria.



a) Tipologias 1 e 3 da NBR 9092: 2017.



b) Tipologias 2 e 4 da NBR 9092: 2017.

Figura 9 – Fator de restrição α_r ao final do processo iterativo em um pórtico plano semirrígido com cinco pavimentos.

Fonte: p própria.

o aumento do fator de restrição α_r e aumentou com o incremento no número de pavimentos. O limite de $\gamma_z = 1,3$ é atendido no pórtico de três pavimentos para qualquer valor do fator de restrição α_r . Já nos pórticos de cinco e sete pavimentos, esse limite é atendido para valores do fator de restrição α_r maiores que 0,26 e 0,4, respectivamente. Esses valores foram atendidos em quase todas as ligações ao final do processo iterativo

Ao se analisar os valores do coeficiente γ_z obtidos do código computacional FINITO_SR ao final do processo iterativo, observa-se que ele variou entre 1,01 e 1,12, estando próximo do obtido por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) para os pórticos monolíticos com ligações rígidas. Tomando para análise o maior valor de α_r encontrado nos pórticos das Figuras 8 a 10, isto é, 0,56; 0,65 e 0,71 para a tipologia 1 (pórtico com três, cinco e sete pavimentos, respectivamente) e 0,85 para tipologia 2, pode-se comparar com o valor do coeficiente γ_z obtidos por Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) quando o valor de α_r variou entre 0,67 e 0,86.

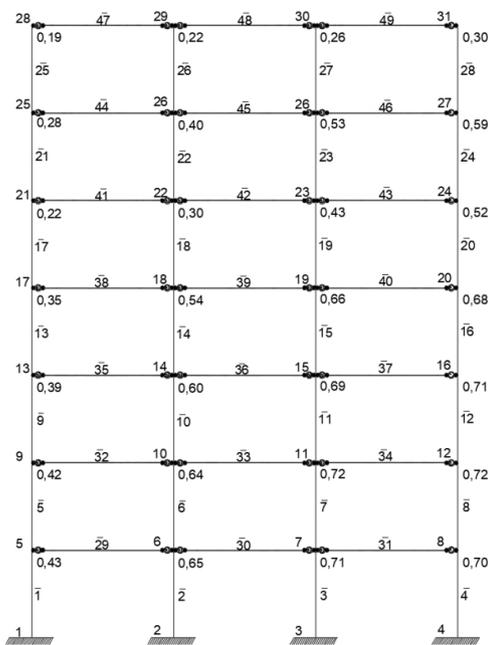
Para o pórtico de três pavimentos, não se observa diferença entre o valor do coeficiente γ_z obtido do processo iterativo ou admitindo o fator de restrição α_r igual em todas as ligações. No caso do pórtico de cinco pavimentos, a diferença entre os valores do coeficiente γ_z também é pequena. Já no pórtico de sete pavimentos, nota-se uma redução do valor do coeficiente γ_z de 1,19

para 1,12 ao se utilizar o processo iterativo. Isso mostra que a solução obtida pelo processo iterativo resultou em um pórtico mais rígido que o obtido ao se adotar um único valor do fator de restrição α_r para todas as ligações.

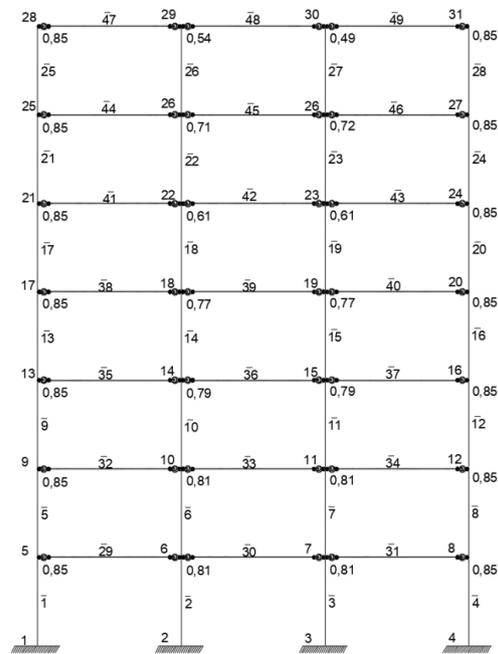
Tomando a solução de Ferreira, Araújo e Jeremias Jr. (2005) para $\alpha_r = 0,40$, o que corresponde a uma ligação semirrígida com 50% da capacidade resistente de uma ligação rígida com mesma taxa de armadura de continuidade, nota-se pequena diferença no valor do coeficiente γ_z para o pórtico de três pavimentos. No pórtico de cinco e sete pavimentos, a diferença do coeficiente γ_z obtido do processo iterativo com a tipologia de ligação 1 para aquele obtido com $\alpha_r = 0,40$ é de 10% e 17%, respectivamente. Isso ocorre porque o processo iterativo convergiu para ligações nos primeiros pavimentos desses pórticos com valores do fator de restrição maiores que 0,4. No caso do pórtico de sete pavimentos, essa alteração resultou na redução do coeficiente γ_z de 1,35 para 1,12.

4 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma rotina computacional que avaliasse conjuntamente os critérios de resistência e de rigidez em ligações viga-



a) Tipologias 1 e 3 da NBR 9092: 2017.



b) Tipologias 2 e 4 da NBR 9092: 2017.

Figura 10 – Fator de restrição α_r ao final do processo iterativo em um pórtico plano semirrígido com sete pavimentos.

Fonte: própria.

pilar em estruturas pré-moldadas com comportamento semirrígido ($0,85 \leq \alpha_r \leq 0,15$). Tendo em vista que a ABNT NBR 9092: 2017 fornece expressões para o cálculo da rigidez secante de ligações viga-pilar que depende da armadura de continuidade, o atendimento conjunto desses dois critérios em ligações viga-pilar com comportamento elástico, resulta em um procedimento indeterminado. A rotina desenvolvida neste trabalho fornece automaticamente, por meio de

um processo iterativo, o valor do fator de restrição α_r em cada ligação de pórticos planos que atende a ambos os critérios ao se utilizar as tipologias 1 a 4 recomendadas pela ABNT NBR 9092: 2017 para ligações viga semirrígidas.

A importância da correta representação da rigidez da ligação viga-pilar ficou evidente ao se utilizar o processo simplificado do PCI (2010) para representar uma ligação semirrígida em um pórtico de

Quadro 3 – Coeficiente γz para os pórticos planos semirrígidos.

Fator α_r	Engaste Parcial – ME/MR (%)	Coeficiente γz			Deslocamento horizontal no topo do pórtico (m)		
		Ferreira, Araújo e Jeremias Jr (2005)	FINITO_SR Tipologias 1 e 3	FINITO_SR Tipologias 2 e 4	Ferreira, Araújo e Jeremias Jr (2005)	FINITO_SR Tipologias 1 e 3	FINITO_SR Tipologias 2 e 4
Pórtico de três pavimentos							
0,00	0	1,27	1,04	1,01	0,0543	0,0082	0,0043
0,07	10	1,18			0,0374		
0,14	20	1,14			0,0287		
0,26	35	1,10			0,0205		
0,40	50	1,07			0,0153		
0,67	75	1,05			0,0101		
0,86	90	1,04			0,0079		
1,00	100	1,03			0,0068		
Pórtico de cinco pavimentos							
0,00	0	8,62	1,07	1,05	0,4315	0,0246	0,0167
0,07	10	1,82			0,2048		
0,14	20	1,46			0,1365		
0,26	35	1,27			0,0873		
0,40	50	1,19			0,0610		
0,67	75	1,11			0,0371		
0,86	90	1,08			0,0280		
1,00	100	1,07			0,0232		
Pórtico de sete pavimentos							
0,00	0	-	1,12	1,09	-	0,0496	0,0354
0,07	10	7,42			0,5494		
0,14	20	2,33			0,3388		
0,26	35	1,58			0,2055		
0,40	50	1,35			0,1389		
0,67	75	1,19			0,0814		
0,86	90	1,14			0,0604		
1,00	100	1,11			0,0495		

Fonte: própria.

cinco pavimentos. Neste caso, o coeficiente γ_z obtido com o processo simplificado do PCI (2010) foi quase 10% inferior ao obtido ao se representar a ligação viga-pilar pelo fator de restrição α_r . Para estruturas com poucos pavimentos e pequena deslocabilidade horizontal, essa diferença pode não ser significativa. Contudo, torna-se significativa em estruturas com elevada deslocabilidade.

Os pórticos pré-moldados solucionados pela rotina desenvolvida neste trabalho com o uso do processo iterativo resultaram mais rígidos que os pórticos que consideravam o fator de restrição ar igual em todas as ligações. Isso deu-se porque o processo iterativo resultou no enrijecimento das ligações viga-pilar nos primeiros pavimentos, que são mais solicitados pelo carregamento horizontal, e uma redução da rigidez das ligações nos pavimentos superiores. Com isso, a deslocabilidade e o coeficiente γ_z obtidos com as duas tipologias de ligação estudadas aproximaram-se da solução considerando os pórticos com ligações rígidas.

Ressalta-se que a solução obtida ao final do processo iterativo deve ser considerada após uma análise criteriosa. Ela não levou em conta o detalhamento das armaduras de continuidade na ligação. Dessa forma, para aplicação em projetos, deve-se verificar se é possível realizar o correto detalhamento da armadura de continuidade obtida ao final do processo iterativo. Assim, ela pode ser usada como uma primeira estimativa para o fator de restrição α_r a ser utilizado em projeto.

Ouro aspecto a ser ressaltado é que a análise aqui realizada considera as ligações viga-pilar com comportamento elástico. Isto é, não foi considerada a possibilidade de plastificação da ligação. Essa é uma solução que pode ser adotada, contudo, como mostrado por Araújo, Ferreira e El Debs (2006), essa solução pode implicar no aumento da deslocabilidade da estrutura.

Estudos futuros poderão considerar na rotina desenvolvida a possível influência da plastificação da ligação viga-pilar e a possibilidade de realizar a análise iterativa partindo de taxas fixas para a armadura de continuidade.

5 Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão da bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e ao Prof. Dr. Wanderlei Pereira Junior pela disponibilização dos recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. O presente trabalho foi realizado também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, a partir da concessão de bolsa de mestrado de demanda social da CAPES.

6 Notação

α_r	Fator de restrição
γ_z	Índice de estabilidade
Δ_x	Deslocamento na cordenada X
Δ_y	Deslocamento na cordenada Y
N	Esforço normal
V	Esforço Cortante
M	Momento Fletor
M_y	Momento de escoamento da ligação
M_d	Momento solicitante elástico de projeto
M_{Ed}	Momento fletor solicitante negativo na ligação viga-pilar
M_{msd}	Momentos fletores no vão
R_{sec}	Rigidez secante da ligação viga-pilar
M_{MS}	Momento elástico no meio da viga

Referências

- ABNT/CB-002. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. ABNT NBR 6118**. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABNT/CB-002. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. ABNT NBR 9062:2017**. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- ARAÚJO, D. L.; FERREIRA, M. A.; EL DEBS, M. K. Estabilidade global de estruturas reticuladas em concreto pré-moldado: influência da plastificação da ligação. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 3, n. 2, p. 85–102, 2006.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- ELDEBS, M. K. **Concreto Pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 2000.
- FERREIRA, M. A. **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, 1993.
- FERREIRA, M. A. **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, 1999.
- FERREIRA, M. A. *et al.* **Analysis of multi-**

storey precast frames considering beam-column connections with semi-rigid behaviour. Keep Concrete Attractive - Proceedings of the fib Symposium 2005. Anais...Budapest: fib, 2005

FERREIRA, M. A.; ARAÚJO, D. L.; JEREMIAS JR., A. C. **Estabilidade global de estruturas reticuladas em concreto pré-moldado.** 47 Congresso Brasileiro do Concreto – CBC 2005. Anais...São Paulo: IBRACON, 2005

FERREIRA, M. A.; EL DEBS, M. K.; ELLIOTT, K. S. **Modelo Teórico para Projeto de Ligações Semi-Rígidas em Estruturas de Concreto Pré-Moldado.** 44 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais...São Paulo: IBRACON, 2002

JETBRAINS, S. R. O. **PyCharm.**, 2009. Disponível em: <<https://www.jetbrains.com/pt-br/pycharm/>

download/#section=windows>

MARTHA, L. F.; GATTASS, M. FTOOL. Rio de Janeiro. PUC-Rio., , 1992. Disponível em: <<https://www.ftool.com.br/Ftool/>>

PCI. **PCI Design Handbook.** 7th. ed. Chicago: PCI – PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 2010.

PCI COMMITTEE ON CONNECTION DETAILS. **Design and Typical Details of Connections for Precast and Prestressed Concrete.** 2th. ed. Chicago: PCI – PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 1988.

PEREIRA JR., W. M. F. **Finito Fem Toolbox.** Catalão. UFCat., 2021. Disponível em: <https://wmpjrufg.github.io/FINITO_TOOLBOX/>