

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO SEMIRRÍGIDA PILAR PRÉ-MOLDADO – FUNDAÇÃO POR MEIO DE CHAPA DE BASE

Tatiana Ueno¹

Anamaria Malachini Miotto Farah²

RESUMO

Este artigo apresenta o estudo do comportamento da ligação pilar-fundação por meio da chapa de base, no que diz respeito a deformabilidade ao momento fletor, cujo parâmetro de comparação é o coeficiente de rigidez. Para determinar este coeficiente existem três tipos de modelos: experimental, analítico e numérico. O estudo foi feito através do desenvolvimento de um modelo numérico da ligação no software Abaqus 6.12, com base em modelos experimental e analítico, já existentes. Em seguida, é analisado o comportamento de um pórtico considerando a deformabilidade da ligação pilar-fundação, através do programa FTOOL. Os resultados permitem comparar seu comportamento com ligação pilar-fundação rígida, articulada e semirrígida, e confirmar o caráter intermediário que a ligação em estudo apresenta.

Palavras-chave: Deformabilidade. Semirrigidez. Ligações. Estruturas de concreto pré-moldado.

¹ Mestranda em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Poli/USP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, ueno.tatiana@gmail.com

² Prof^a. Dr^a., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, anamiotto@uol.com.br

1. INTRODUÇÃO

Na área de estruturas de concreto pré-moldado, a ligação entre os seus elementos é um dos principais assuntos estudados, devido à associação direta do seu comportamento com a redistribuição dos esforços da estrutura.

Há uma certa diferença na consideração das ligações entre elementos de concreto pré-moldado em análises estruturais em relação ao seu comportamento propriamente dito. Comumente são consideradas como rígidas, mas apresentam consideráveis deformações ao momento fletor e ao cisalhamento; ou como articuladas, contudo possuem razoável rigidez à flexão. Porém, a deformabilidade característica apresentada por essas ligações levam à classificação, de acordo com a literatura, como semirrígidas.

Neste contexto, o presente artigo trata do estudo da ligação pilar pré-moldado – fundação por meio de chapa de base. Para isso, primeiramente determinou-se o coeficiente de rigidez da ligação através de modelos experimental, analítico e numérico e depois realizou-se a análise da ligação em pórticos planos.

O objetivo da pesquisa foi determinar a rigidez da ligação ao momento fletor e examiná-la para confirmar o seu comportamento semirrígido, visto que ela apresenta um mecanismo de deformação particular, principalmente nos quesitos redistribuição dos esforços, deslocamentos laterais e estabilidade global da estrutura.

Atestada a semirrígidez, surge uma motivação para a sua consideração em projetos de dimensionamento de elementos de concreto pré-moldado, uma vez que isso pode oferecer grandes economias: em mão de obra, se comparado com as ligações rígidas; ou na seção do pilar, se comparado com as articuladas.

2. DESENVOLVIMENTO

Conforme a tradução do Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto (2002) feita por Marcelo de Araújo Ferreira, o papel das ligações é fazer uma interligação racional entre os elementos pré-moldados, transferindo forças entre as interfaces dos elementos, para compor um sistema estrutural capaz de resistir a todas as forças atuantes, incluindo ações indiretas provenientes da retração, fluência, movimentos térmicos, fogo, etc.

Dentre os diversos tipos que existem de classificações das ligações entre elementos, a pesquisa enfatiza a classificação quanto ao tipo de vinculação – articulada, semirrígida, rígida – em especial a semirrígida. Tal especificação é feita em função do parâmetro coeficiente de rigidez, ou inverso da deformabilidade.

Conforme El Debs (2000), a deformabilidade de uma ligação é definida como a relação do deslocamento relativo entre os elementos que compõem a ligação com o esforço unitário solicitante na direção desse deslocamento. Assim, a deformabilidade ao momento fletor da ligação está associada à rotação do pilar em relação à forma indeformada do nó, conforme mostra as Equações 1 e 2.

$$\delta = \frac{\phi}{M} \quad (1)$$

$$K_m = \frac{1}{\delta} = \frac{M}{\phi} \quad (2)$$

onde: δ : deformabilidade ao momento fletor da ligação;
 ϕ : rotação da ligação;
M: momento fletor atuante na ligação;
 K_m : rigidez ao momento fletor da ligação.

Segundo Miotto (2002), a maneira usualmente empregada para representar a deformabilidade ao momento fletor de uma ligação é através da relação momento fletor-rotação, ou apenas momento-rotação. Na Figura 1, são mostrados os diagramas momento fletor-rotação de uma ligação perfeitamente rígida, perfeitamente articulada e semirrígida. A partir da deformabilidade, obtém-se o coeficiente de rigidez (K_m) que será o fator comparativo das ligações rígida, semirrígida e articulada.

A maneira mais precisa de se determinar a curva momento-rotação de uma ligação é através de experimentos laboratoriais. Porém, como o uso dessa técnica requer laboratórios com equipamentos adequados e espaço suficiente, recursos financeiros e tempo para a realização dos ensaios, foram desenvolvidos, por parte dos pesquisadores, outros métodos capazes de determinar o comportamento nodal sob carregamentos estáticos e cíclicos para o uso em projeto, são eles: o método analítico, ou Método dos Componentes, e o método numérico. Antes de iniciar a descrição de cada modelo, será feito um breve detalhamento da execução e dos mecanismos de deformação da ligação.

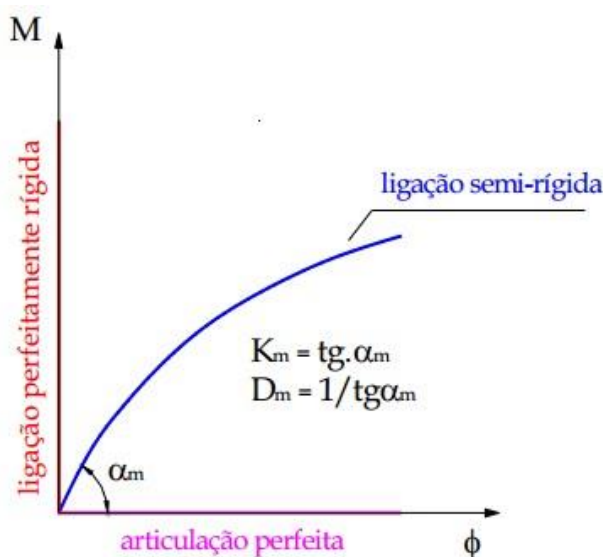


Figura 1 - Curvas momento fletor-rotação

Fonte: Miotto - 2002.

2.1. Ligação pilar-fundação por meio de chapa de base

Segundo El Debs (2000), a ligação pilar – fundação por meio de chapa de base (Figura 2) é feita basicamente por meio da chapa devidamente unida à armadura principal do pilar, chumbadores, porcas e argamassa de enchimento. Trata-se de um tipo de ligação muito empregado nos Estados Unidos, principalmente, e na Europa, no entanto seu emprego no Brasil é relativamente restrito. A

chapa de base pode ter as dimensões transversais do pilar, o que possibilita disfarçar a ligação, ou ser maior que as dimensões transversais do pilar.

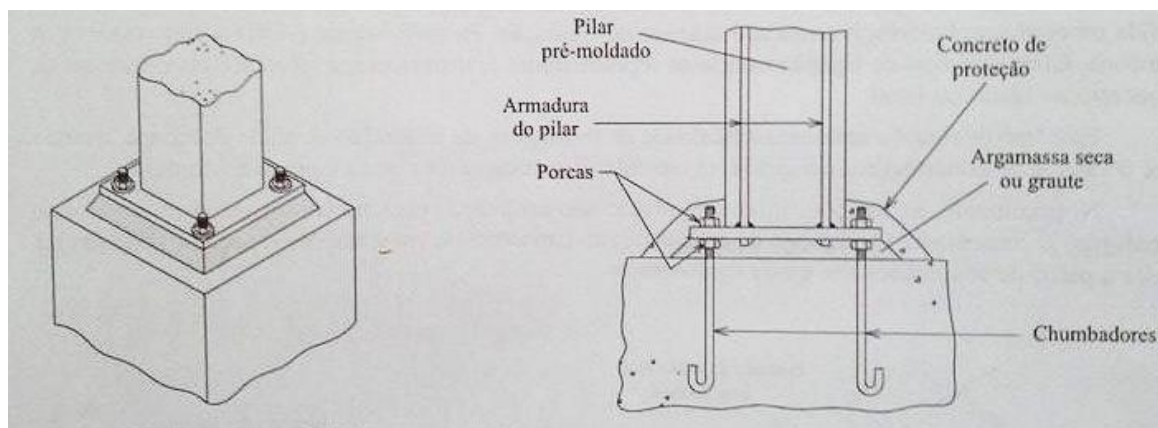


Figura 2 - Ligação pilar - fundação por meio de chapa de base

Fonte: El Debs - 2000.

A montagem inicia-se na fábrica com a solda das armaduras principais do pilar na chapa metálica e a moldagem do pilar. Após o transporte, é posicionado de forma a encaixar os furos da chapa nos chumbadores. Por um sistema de porcas e contraporcas, ajusta-se o prumo e nivelamento. Por fim, o espaço vazio entre o topo da fundação e a face inferior da chapa é preenchida por argamassa seca ou graute.

O comportamento da ligação em relação à transferência de força normal e de momento fletor, consiste basicamente na transmissão das forças da armadura, por solda, e do concreto, por contato, para a chapa. Essas forças são transmitidas da chapa para os chumbadores ou para o material de enchimento, mediante flexão da chapa, e destes para a fundação. O tamanho da chapa metálica pode influenciar na transmissão de momentos fletores, que fica limitado quando a chapa possui as mesmas dimensões da seção transversal do pilar. Além disso, as demais características, como quantidade de chumbadores, armaduras principais, também particularizam o comportamento da ligação.

2.2. Determinação do coeficiente de rigidez – Modelo experimental

A análise experimental de Nóbrega et al (2004) consistiu no ensaio de dois pilares isolados, com a ligação por meio da chapa de base, submetidos a flexão por um carregamento horizontal. O modelo de pilar idealizado (Figura 3) apresentava uma seção transversal retangular 8 x 18 cm, chapa de aço com espessura de 10 mm e dois parafusos com diâmetro de 16 mm, conforme mostra a Figura 4. A carga foi aplicada de forma crescente, a uma altura de 63 cm, até atingir o limite de 10 kN.

Os resultados forneceram as curvas Força x Deslocamento, apresentadas na Figura 3. A partir do deslocamento δ do gráfico e da Equação 3, obteve-se a rigidez $K_m (base) = 1.000 \text{ kN.m/rad}$. Vale ressaltar que a primeira parcela da equação refere-se ao deslocamento do topo de um pilar engastado e a segunda, o deslocamento do topo considerando a rigidez da base.

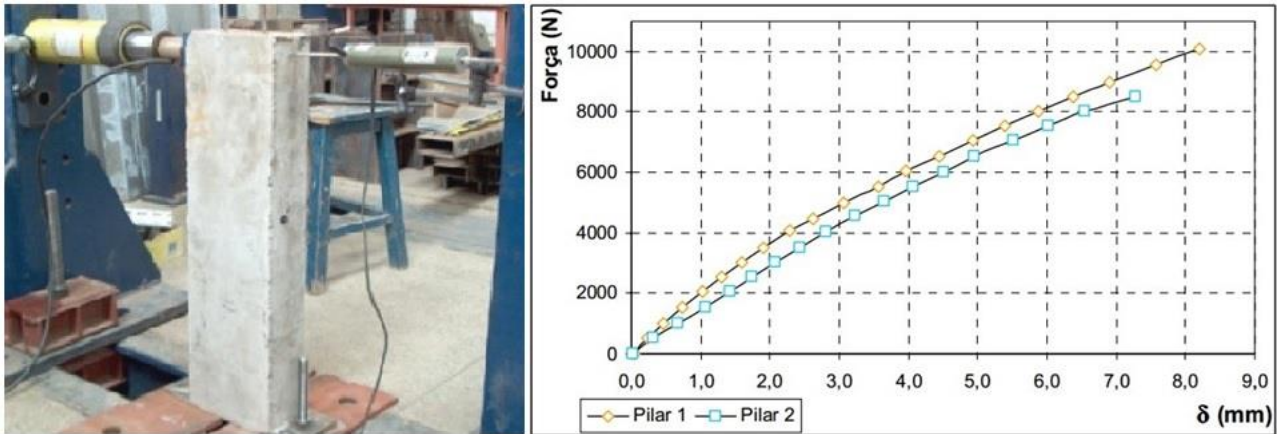


Figura 3 - Modelo do pilar e resultados do ensaio a flexão

Fonte: Nóbrega et al - 2004.

$$\delta = a_1 + a_2 = \frac{F.L^3}{3.E_C.I_{eq}} + \frac{F.L^2}{K_{m(base)}} \quad (3)$$

onde:
 F: Força concentrada aplicada;
 L: Comprimento do pilar;
 E_c: Módulo de Elasticidade do concreto;
 I_{eq}: Inércia;
 K_{m (base)}: Rigidez da base.

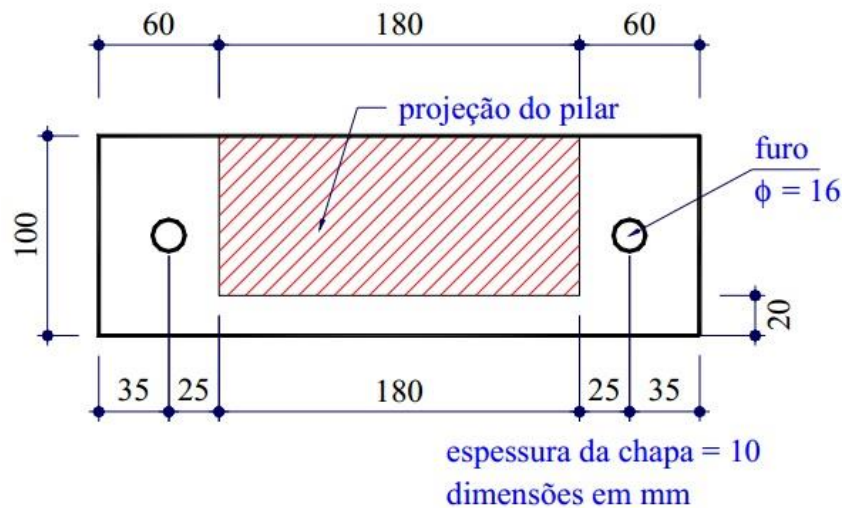


Figura 4 - Dimensões da chapa metálica do modelo experimental

Fonte: Nóbrega et al - 2004.

2.3. Determinação do coeficiente de rigidez – Modelo analítico

O cálculo do coeficiente de rigidez analítico é baseado no equacionamento desenvolvido por Ferreira (1993), que, por sua vez, se fundamentou na equação apresentada por Martin (1980). A metodologia considera os mecanismos básicos de deformação dos elementos que compõem a ligação.

Martin (1980, *apud* FERREIRA 1993) considera dois mecanismos de deformação associados em série: à tração de uma barra inserida no elemento de fundação e à flexão da chapa metálica na base do pilar. Acrescenta-se ainda, o mecanismo de deformação por tração da armadura do pilar proposto por Ferreira (1993). Aplicando-se conceitos de equilíbrio de forças, compatibilização dos deslocamentos e de deformações específicas dos mecanismos de deformação, chega-se na Equação 4.

$$K_{m(base)} = \frac{1}{\lambda_{ab} + \lambda_{bp} + \lambda_{l2}}$$
$$= \frac{1}{\left[\frac{g}{2 \cdot e \cdot A_b \cdot E_S (h + x_1)} \left(\frac{2 \cdot e}{h + 2 \cdot x_1} - 1 \right) \right] + \left[\frac{(x_1 + x_2)^3}{6 \cdot e \cdot E_S \cdot I_{bp} (h + x_1)} \left(\frac{2 \cdot e}{h + 2 \cdot x_1} - 1 \right) \right] + \left[\frac{l_{s2}}{0,85 \cdot E_S \cdot A_{s2} (h - x_2)^2} \right]} \quad (4)$$

em que:

- λ_{ab} : Deformabilidade à flexão do chumbador;
- λ_{bp} : Deformabilidade à flexão da chapa metálica;
- λ_{l2} : Deformabilidade à tração da armadura do pilar;
- g: Comprimento do chumbador;
- e: Excentricidade da carga aplicada;
- A_b : Área da superfície de apoio de uma fundação direta;
- E_S : Módulo de Elasticidade longitudinal do aço;
- h: Largura do pilar;
- x_1 : Distância da face do pilar até o eixo do chumbador de fixação da ligação;
- x_2 : Distância da face do pilar até o eixo de gravidade da armadura tracionada;
- I_{bp} : Momento de inércia da chapa de ligação;
- l_{s2} : Comprimento assumido para deformação da armadura tracionada do pilar, na região da ligação;
- A_{s2} : Área da seção transversal da armadura tracionada do pilar.

Sendo assim, Nóbrega et al (2004) chegou no resultado de $K_{m(base)} = 1409 \text{ kN.m/rad}$.

2.4. Determinação do coeficiente de rigidez – Modelo numérico

A análise da rigidez da ligação por meio do modelo numérico consiste na simulação de uma ligação pilar-fundação semirrígida utilizando o programa computacional Abaqus/ CAE 6.12, o qual se é baseado no Método dos Elementos Finitos.

O modelo simulado pela autora é semelhante ao do experimento de Nóbrega et al (2004), porém a carga concentrada aplicada de 10 kN foi adaptada para um carregamento distribuído uniformemente, de modo que o momento aplicado se mantém o mesmo. De modo análogo ao experimental, obteve-se o coeficiente de rigidez a partir do deslocamento do pilar, conforme a Equação 5.

$$\delta = a_1 + a_2 = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I} + \frac{q \cdot L^3}{2 \cdot K_{m(base)}} \quad (5)$$

em que: q: Carga distribuída na face do pilar.

A fim de confirmar o comportamento semirrígido da ligação, ensaiaram-se, no programa FTOOL, cinco pórticos com apoios diferentes: engastado, articulado e os outros três com cada um dos valores de coeficiente de rigidez da base encontrados pelos modelos analítico, experimental e numérico.

2.5. Resultados

A simulação do pilar isolado no Abaqus 6.12 forneceu o deslocamento total do pilar (δ) de 9,30197 mm. Através da Equação 5, obteve-se o resultado da rigidez da base $K_{m(base)} = 446,83$ kN.m/rad. A Tabela 1 relata os três valores de coeficientes de rigidez oriundos de métodos diferentes que representam a mesma ligação pilar-fundação.

Tabela 1 - Valores de K da ligação por meio de chapa de base

Modelo	$K_{m(base)}$ (kN.m/rad)
Experimental de NÓBREGA et al (2004)	1000
Analítico de Ferreira (1993)	1409
Numérico - Simulação Abaqus	446,8

Fonte: Autor - 2017.

As deformações, as quais o modelo analítico afirma ocorrer na ligação, puderam ser observadas nos resultados da simulação numérica, como mostram as Figuras 5 a 7.

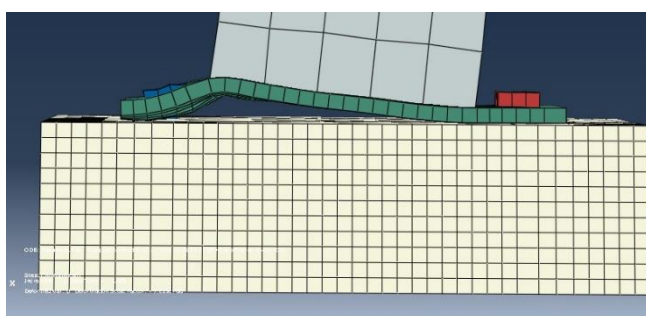


Figura 5 - Deformação da chapa metálica

Fonte: Autor - 2017.

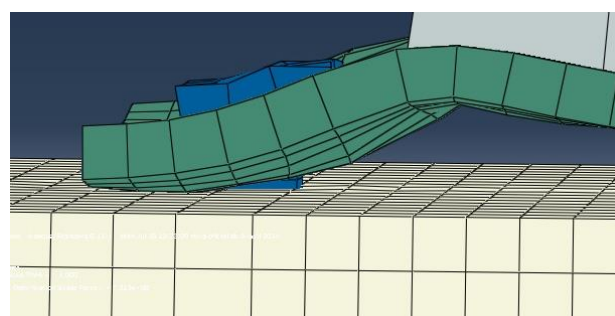


Figura 6 - Alongamento do parafuso

Fonte: Autor - 2017.

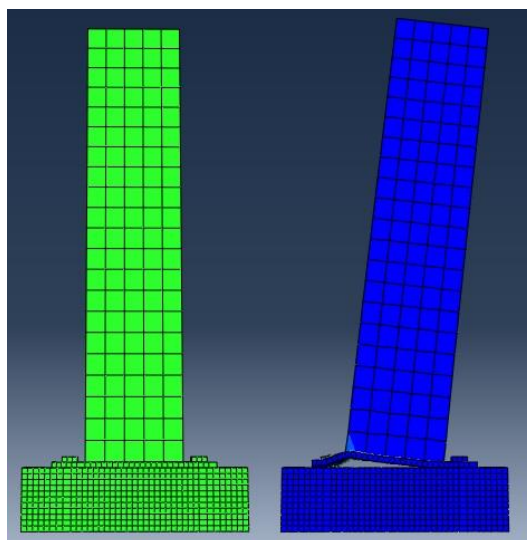


Figura 7 - Ligação pilar-fundação por chapa de base antes e depois da deformação

Fonte: Autor - 2017.

Apesar da diferença de valores, deve-se atentar na análise do seu desempenho que foi gerada pelo ensaio no FTOOL, o qual consistiu em submeter um pórtico a uma carga horizontal de 10 kN no topo do pilar e medir o deslocamento do nó no qual a força foi aplicada e os momentos fletores transmitidos pelos apoios, 1 (cujo pilar recebe a carga concentrada) e 2 (cujo pilar não recebe a carga concentrada), com distintas restrições na base. As Tabelas 2 e 3 exprimem os dois resultados respectivamente e a Figura 8 mostra a configuração deformada dos pórticos.

Tabela 2 - Deslocamentos horizontais dos pórticos

Tipo de ligação pilar-fundação	Deslocamento horizontal calculado pelo FTOOL (mm)
Rígida	0,2985
Semirrígida analítica de Ferreira (1993)	0,8040
Semirrígida de NÓBREGA et al (2004) (K = 1000 kN.m/rad)	0,8928
Semirrígida da análise numérica (K = 446,8 kN.m/ rad)	1,078
Articulada	1,341

Fonte: Autor - 2017.

Tabela 3 - Momentos fletores transmitidos pelos apoios

Tipo de ligação da estrutura	Momento fletor (kN.m) em módulo	
	Apoio 1	Apoio 2
Rígida	2,7	2,6
Semirrígida analítico de Ferreira (1993) ($K = 1409 \text{ kN.m/rad}$)	1,4	1,3
Semirrígida de NÓBREGA et al (2004) ($K = 1000 \text{ kN.m/rad}$)	1,1	1,1
Semirrígida da análise numérica ($K = 446,8 \text{ kN.m/rad}$)	0,7	0,7
Articulada	0	0

Fonte: Autor - 2017.

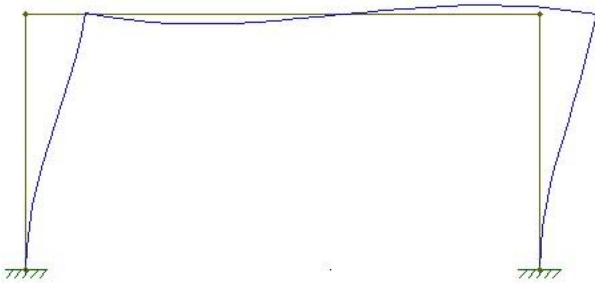


Figura 8.a – Deformação do pórtico engastado.

Fonte: Autor - 2017.

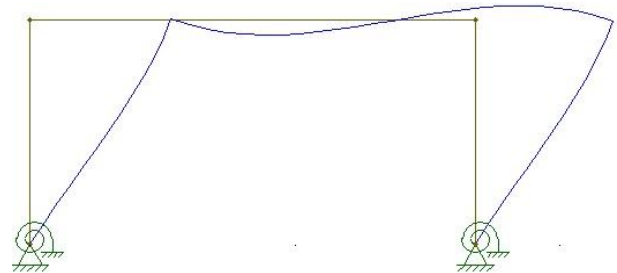


Figura 8.b - Deformação do pórtico semirrígido com $K = 1409 \text{ kN.m/ rad}$

Fonte: Autor - 2017.

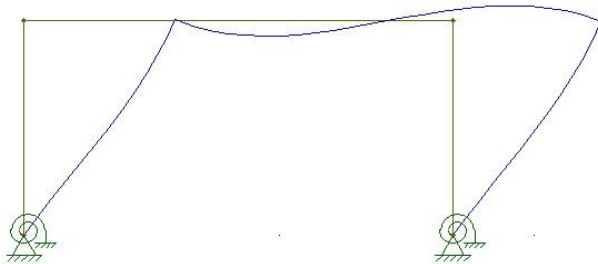


Figura 8.c - Deformação do pórtico semirrígido com $K = 1000 \text{ kN.m/ rad}$

Fonte: Autor - 2017.

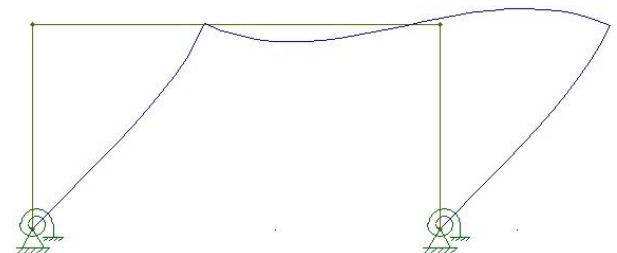


Figura 8.d - Deformação do pórtico semirrígido com $K = 446,8 \text{ kN.m/ rad}$

Fonte: Autor - 2017.

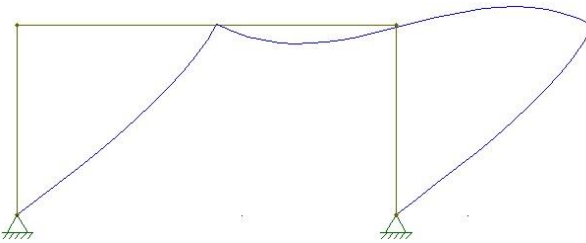


Figura 8.e - Deformação do pórtico articulado

Fonte: Autor - 2017.

De acordo com os resultados, percebe-se o comportamento intermediário da ligação em estudo e que, apesar da variação dos valores experimental, analítico e numérico de coeficientes de rigidez, suas influências no comportamento dos pórticos são muito próximas.

3. CONCLUSÃO

O estudo teórico sobre a ligação semirrígida e as maneiras de se determinar seus mecanismos de deformação criou embasamento para definir o parâmetro de rigidez à flexão de uma ligação pilar-fundação por meio de chapa de base.

Portanto, o objetivo principal foi cumprido, através das análises numéricas que permitiram comprovar o comportamento intermediário da ligação semirrígida, tanto em uma simulação isolada quanto em uma simulação da estrutura. Além disso, vale ressaltar a importância de se estudar cada ligação considerando suas particularidades, visto que a primeira análise, ela se mostrou mais próxima do comportamento articulado e, na segunda, ligeiramente mais próxima da rígida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à prof.^a Dra. Anamaria Malachini Miotto Farah pelo apoio e orientação desta pesquisa.

Agradeço à Universidade Estadual de Maringá e à Fundação Araucária pelo apoio financeiro concedido durante a minha Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e Aplicações**. EESC-USP, São Carlos, 2000.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T.; CANHA, R. M. F. **Ensaio de ligação pilar pré-moldado x fundação mediante chapa de base**. Relatório Técnico. Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

EL DEBS, M.K. et al. **Ensaio de ligação pilar pré-moldado x fundação mediante chapa de base**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, Vitória, 2003.

FERREIRA, M.A. **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos de elementos pré-moldados de concreto**. São Carlos, 1993. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MARTIN, L.D. **Derivation of stiffness coefficients for column base plates**. PCI JOURNAL. Appendix A, Jan-Feb., pp 39-41. 1980.

MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado: análise com ênfase na deformabilidade ao momento fletor**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

NÓBREGA, P.G.B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. Tese de doutorado. EESC-USP, São Carlos, 2004.