

PILARES MISTOS COM PLACAS DE BASE ABERTAS SOLICITADOS À FLEXO-COMPRESSÃO

COMPOSITE COLUMNS WITH OPEN BASE PLATE UNDER AXIAL LOADS AND BENDING

Neuenschwander, R. ¹; Carrasco, E.V.M. ²; Rodrigues, F.C. ³; Fakury, R.H. ⁴

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - Universidade Federal de Minas Gerais



RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental para avaliar o comportamento de um pilar misto, constituído por um perfil de aço tubular quadrado preenchido com concreto, com placa de base aberta, favorecendo a conexão direta do concreto armado do núcleo do pilar aos elementos de fundação. Os esforços resistidos pelo perfil de aço, concreto e armadura são avaliados, assim como o comportamento da placa de base. Os resultados experimentais são comparados com resultados numéricos obtidos com o programa Abaqus.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study to assess the behavior of a composite column consisting of a square tubular steel profile with an open base plate, favoring a direct connection of the reinforced concrete structure to the foundation elements. The resisting efforts of the steel profile, concrete and reinforcement are evaluated as well as the behavior of the base plate. The experimental results are compared to the numerical values obtained with Abaqus program.

1- INTRODUÇÃO

Devido à sua eficiência, o uso de estruturas mistas de aço e concreto vem ganhando cada vez mais espaço na construção brasileira, em especial os pilares mistos formados por perfis de aço de seção tubular preenchidos com concreto. Barras de armaduras adicionais podem ser utilizadas e servem para aumentar a resistência da seção mista.

Como vantagens para o uso de pilares mistos preenchidos pode-se citar

aspectos de comportamento em situação de incêndio, maior durabilidade, menor esbeltez e maior capacidade resistente, levando a estruturas mais econômicas que suas equivalentes não mistas. A facilidade de aplicação desses elementos garante menores prazos de execução e baixos custos sem comprometer a qualidade estrutural das edificações.

Outra vantagem do uso de pilares mistos preenchidos é o efeito do confinamento, que aumenta a capacidade

resistente do concreto do núcleo, em relação ao concreto não confinado.

A interface entre os pilares mistos e os elementos de fundação é realizada pelo conjunto formado pela placa de base e pelos chumbadores, responsável por transferir os esforços solicitantes dos pilares aos blocos de fundação e garantir as condições de contorno da extremidade dos pilares, de acordo com o esquema estrutural adotado. As placas de base, geralmente utilizadas e preconizadas pela literatura tecno-científica e pelas normas de projeto, entre as quais a norma brasileira ABNT NBR 16239:2013, são maciças e no caso dos pilares mistos preenchidos, impedem a ligação direta do concreto do núcleo do pilar e de sua armadura, com os blocos de fundação.

Neste trabalho é realizado um estudo inicial da transmissão de esforços para a fundação de pilares mistos quadrados, preenchidos com concreto armado, com placa de base aberta sob o núcleo de concreto. Essa solução permite a continuidade da armadura longitudinal do concreto do pilar para o bloco de fundação, de modo que a placa de base transmita apenas os esforços atuantes no perfil de aço.

No estudo foram realizados três ensaios experimentais, em um único protótipo, variando-se a excentricidade da carga aplicada e desenvolvido um modelo para análise numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Destaca-se que não foram encontrados na literatura científica outros trabalhos abordando este assunto.

2- ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foram realizados três ensaios com carga aplicada no topo do pilar nas seguintes posições: centrada, com pequena excentricidade ($e=75\text{mm}$) e grande excentricidade ($e=150\text{mm}$) conforme definição da norma brasileira ABNT NBR 16239:2013.

Ao longo do comprimento do pilar não foram utilizados conectores de cisalhamento, de modo que a ligação entre o perfil de aço e o concreto foi proporcionada apenas pelo atrito entre os dois materiais.

O protótipo teve 1,80 m de comprimento e foi constituído por um tubo quadrado de aço ASTM A36, que possui resistência ao escoamento igual a 250 MPa, com lados de 200 mm e espessura de 6,3 mm. Foi preenchido com concreto com resistência característica à compressão de 30 MPa, armadura longitudinal constituída por 4 barras de diâmetro de 12,5mm, com estribos de 6,3mm a cada 15 cm, em aço CA-50, que possui resistência ao escoamento igual a 500 MPa. A placa de base com lados de 440 mm e espessura de 12,7 mm, em aço ASTM A36, foi ancorada ao bloco de apoio, em concreto armado, por chumbadores de 19mm de diâmetro, também em aço ASTM A36. Para permitir a aplicação da carga excêntrica foi projetada sobre a coluna uma chapa de 19 mm com enrijecedores que avança lateralmente 250 mm, como mostra a Fig. 1.

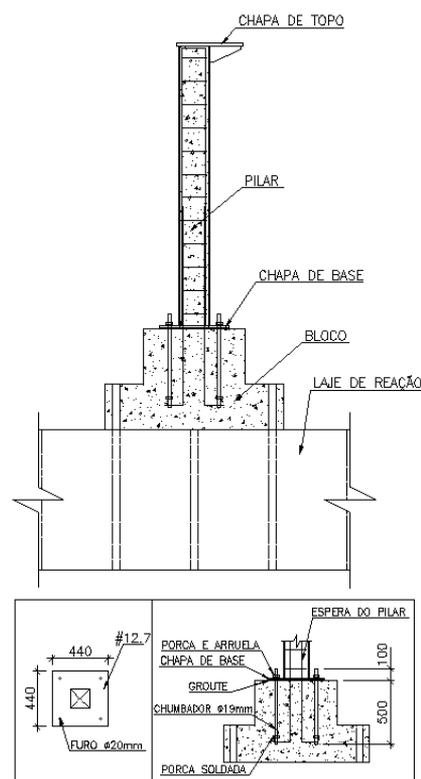


Fig. 1 - Projeto do protótipo

Para instrumentação do protótipo foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, lineares, marca Kyowa, modelo KFC-5-120-C1-11, posicionados no perfil de aço, nas barras da armadura longitudinal e nos chumbadores. A placa de base foi monitorada com extensômetros do tipo roseta (90°), modelo KFG-3-120D16-11. A Fig. 2 mostra o posicionamento dos extensômetros.

A carga foi aplicada com um atuador hidráulico Enerpac, modelo GLRG 2006, com capacidade de 3.000 kN, fixado ao pórtico de reação.

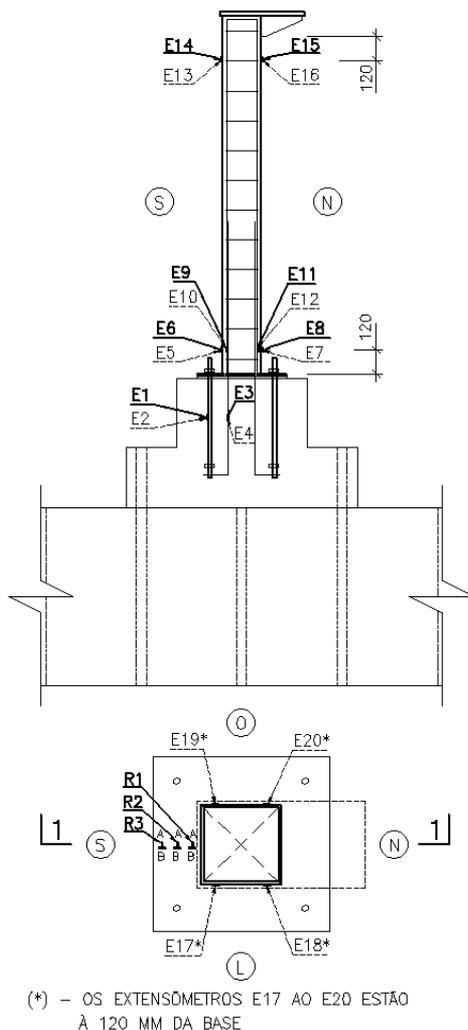


Fig. 2 - Posicionamento dos extensômetros

Para aquisição automática de dados foi utilizado o equipamento LYNX ADS 2002, com 36 canais e as informações foram armazenadas em um computador utilizando o programa AqDados 7.02.

A Fig. 3 mostra o posicionamento do protótipo no pórtico de reação.



Fig. 3 - Protótipo no pórtico de reação

O protótipo foi submetido a três ensaios, variando a excentricidade da carga: Ensaio 1 para excentricidade nula, Ensaio 2 para excentricidade de 75 mm e Ensaio 3 para excentricidade de 150 mm.

No Ensaio 1 a carga aplicada foi de 450 kN, em seguida o protótipo foi descarregado e alterada a posição do atuador para a excentricidade de 75mm, para realização do Ensaio 2. Novamente foi aplicada a carga de 450 kN e o protótipo descarregado e alterada a posição do atuador para a excentricidade de 150 mm, para realização do Ensaio 3. Nesse ensaio a carga aplicada foi de 1.000 kN, quando foi paralisado devido à flambagem local da chapa do tubo de aço, logo abaixo da região de introdução de carga, como mostra a Fig. 4.

A carga de 450 kN foi estimada em 30% da carga prevista para o ensaio, de 1.500 kN, de forma a não ultrapassar o limite elástico de deformação do pilar misto.



Fig. 4 - Flambagem local do perfil de aço

3- ANÁLISE NUMÉRICA

Uma modelagem numérica foi desenvolvida utilizando o programa ABAQUS - 6.13 (Hibbit *et al.*, 2009), considerando o comportamento elastoplástico para o aço e o modelo de dano plástico para o concreto.

Cada elemento foi discretizado individualmente e em seguida foram acoplados formando o modelo mostrado nas Fig. 5 e 6.

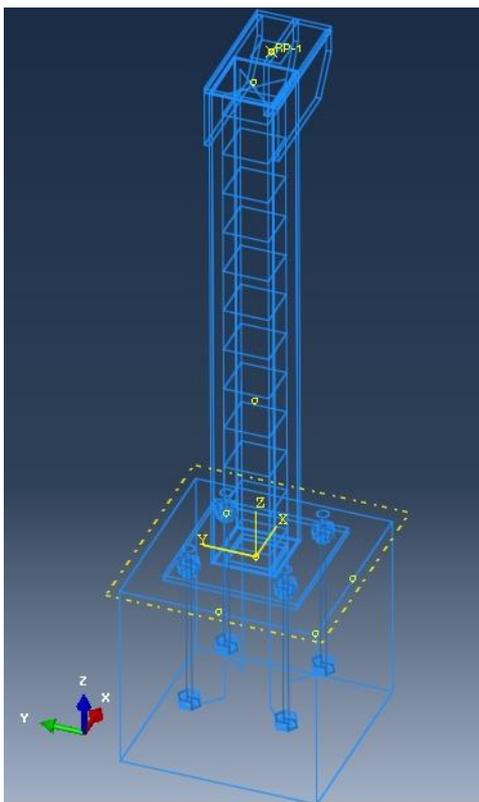


Fig. 5 - Elementos do modelo numérico

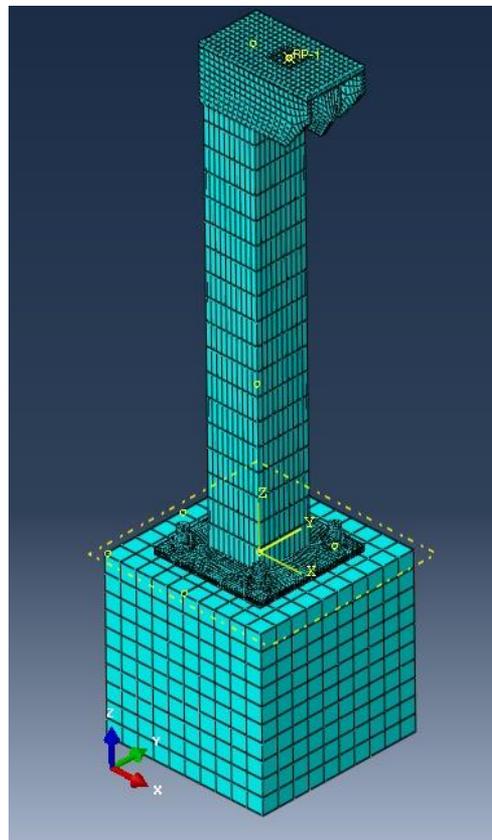


Fig. 6 - Vista geral do modelo numérico

4- RESULTADOS

4.1 - Sequência dos Ensaios

A Tabela 1 mostra um resumo da sequência dos ensaios, com o comportamento observado.

Tabela 1 – Resultados gerais dos ensaios

Ensaio	Carga Máx. (kN)	Excentricidade e (mm)	Comportamento
01	450	0	Elástico sem deformação residual
02	450	75	Elástico sem deformação residual
03	1000	150	Plástico com deformação residual

4.2 - Perfil de Aço

Nas Fig. 7 e 8 tem-se os gráficos carga x deformação dos extensômetros colados no perfil de aço e o resultado numérico comparado com a média das leituras dos extensômetros, respectivamente, para o Ensaio 1.

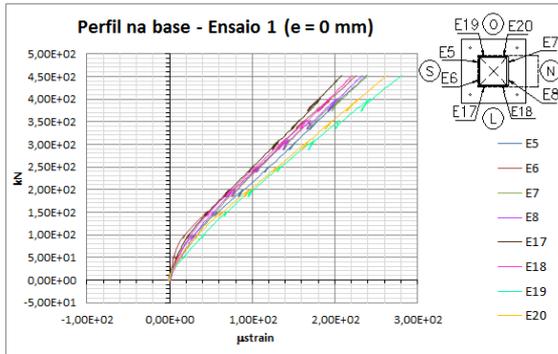


Fig. 7 - Curva Carga x Deformação no perfil de aço para o Ensaio 1

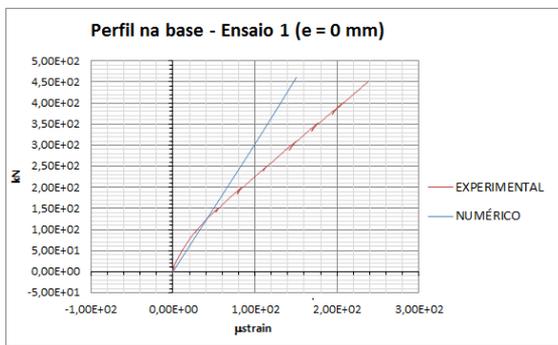


Fig. 8 - Média Experimental x Numérico no perfil de aço para o Ensaio 1

Para a deformação de $236 \mu\epsilon$, a parcela de força normal resistida pelo perfil é de 223 kN, que representa 49,5% da carga aplicada no ensaio.

Nas Fig. 9 e 10 têm-se os gráficos carga x deformação dos extensômetros no perfil de aço e o resultado numérico comparado com a média das leituras dos extensômetros, respectivamente, para o Ensaio 2, onde a carga foi aplicada com uma excentricidade igual a 75 mm. Nota-se que foram obtidos valores muito próximos dos resultados do Ensaio 1.

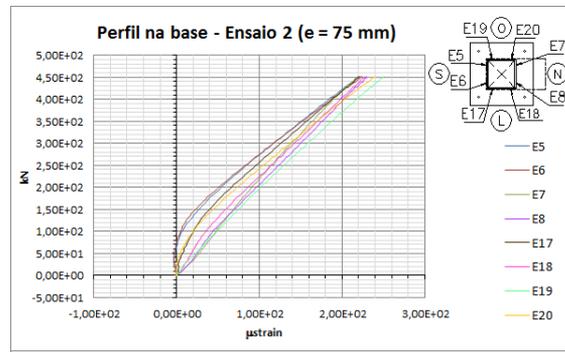


Fig. 9 - Curva Carga x Deformação no perfil de aço para o Ensaio 2

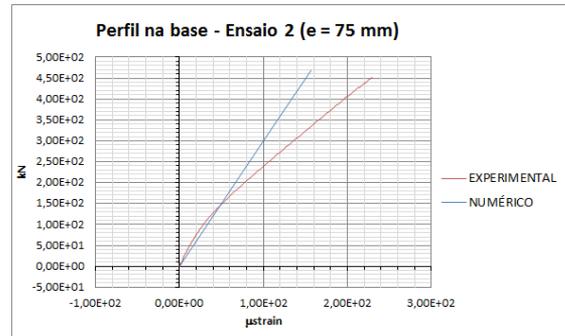


Fig. 10 - Média Experimental x Numérico no perfil de aço para o Ensaio 2

No Ensaio 3, o protótipo apresentou um modo de deformação em dupla curvatura. Os extensômetros E7, E8, E18 e E19 inverteram a tendência da curva de deformação em direção à tração, como mostra a Fig. 11. Esse efeito também ocorreu no modelo numérico, Fig. 12 e 13, quando foram restringidos os deslocamentos nas direções horizontais X e Y do ponto de aplicação da carga, indicando que o atuador interferiu no modo de deformação do protótipo.

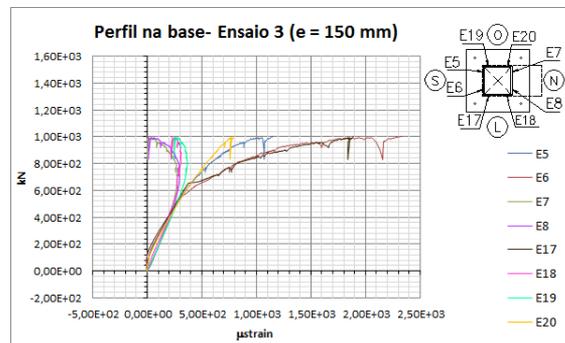


Fig. 11 - Curva Carga x Deformação no perfil de aço para o Ensaio 3

Colunas mistas com chapas de base abertas solicitadas à flexo-compressão

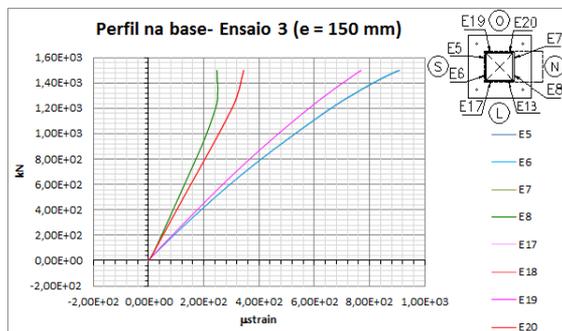


Fig. 12 - Curva carga x deformação no perfil de aço no modelo numérico correspondente ao Ensaio 3

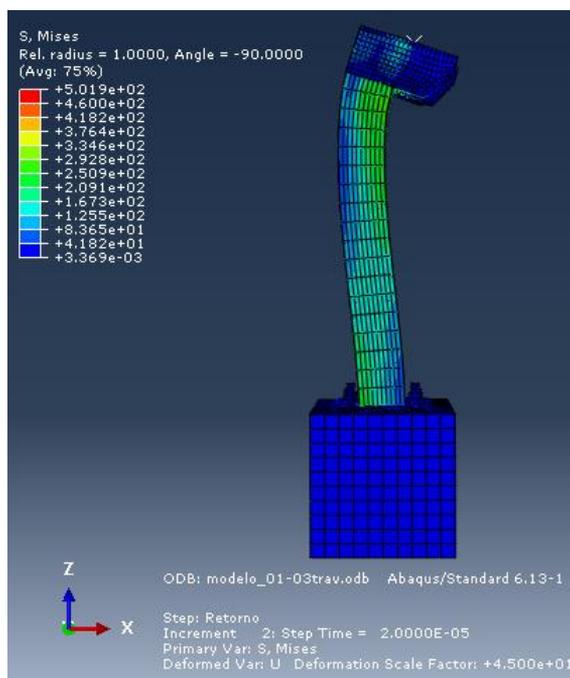


Fig. 13 - Deformação no modelo numérico correspondente ao Ensaio 3

4.3 - Armadura Longitudinal

Nas Fig. 14 e 15 tem-se os gráficos carga x deformação dos extensômetros colados na armadura longitudinal junto à base do pilar e o resultado numérico comparado com a média das leituras dos extensômetros, respectivamente, para o Ensaio 1.

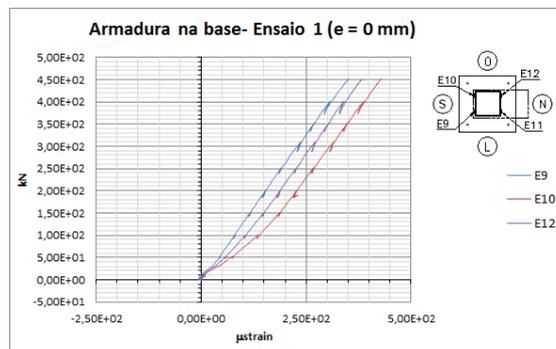


Fig. 14 - Curva Carga x Deformação nas barras da armadura para o Ensaio 1

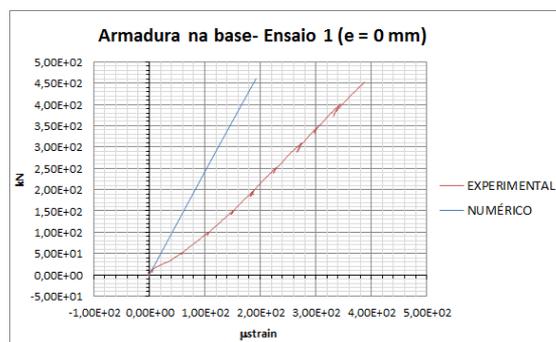


Fig. 15 - Média Experimental x Numérico nas barras da armadura para o Ensaio 1

Para a deformação $\epsilon_s = 388 \mu\epsilon$ a parcela de força normal resistida pela armadura é de 40 kN, representando 8,9% da carga aplicada no ensaio.

Para o núcleo de concreto restou a força de 187 kN, que corresponde a 41,6% da carga aplicada no ensaio.

A Fig. 16 mostra a participação de cada elemento na resistência ao esforço normal da seção mista.

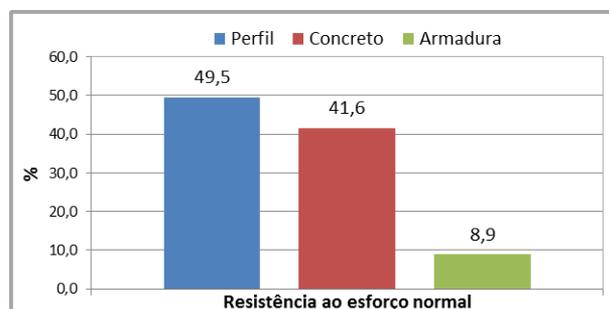


Fig. 16 - Participação dos elementos na resistência da seção mista

Nas Fig. 17 e 18 têm-se as deformações nos extensômetros colados na armadura e os valores médios comparados com o resultado numérico, respectivamente, para o Ensaio 2.

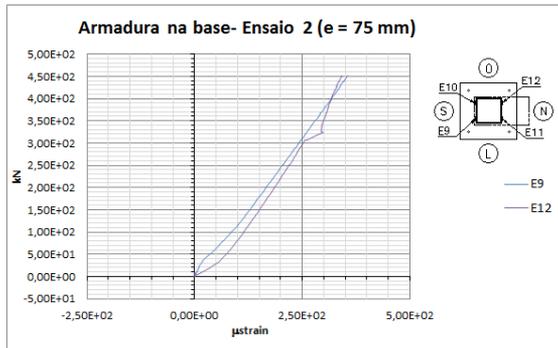


Fig. 17 - Curva Carga x Deformação nas barras da armadura para o Ensaio 2

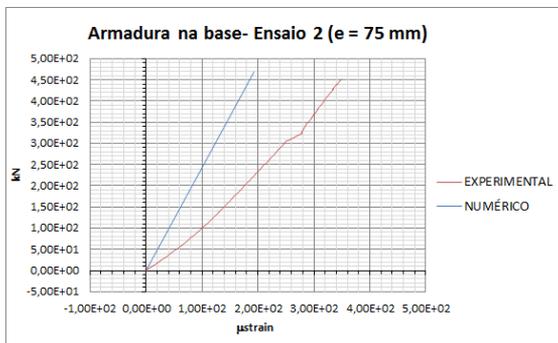


Fig. 18 - Média Experimental x Numérico nas barras da armadura para o Ensaio 2

No Ensaio 3, o extensômetro E12 também inverte a curva de deformação em direção à tração, mostrando o mesmo comportamento observado no perfil de aço, tendendo a tracionar o lado que deveria estar comprimido devido à excentricidade da carga aplicada (Fig. 19).

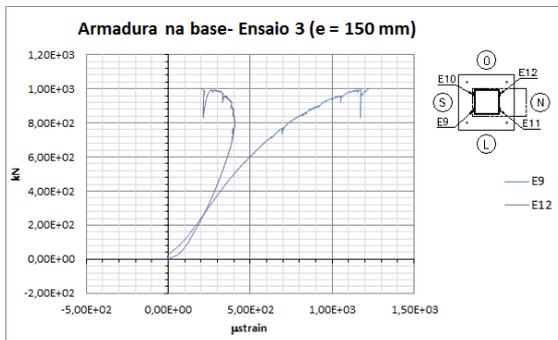


Fig. 19 - Curva Carga x Deformação nas barras da armadura para o Ensaio 3

4.4 - Placa de Base

Nas Fig. 20 a 22 têm-se as deformações lidas nas rosetas A coladas na placa de base e, nas Fig. 23 a 25, as deformações nas rosetas B, correspondentes aos Ensaio 1, 2 e 3, respectivamente. Observa-se que o nível de deformações é pequeno e que há boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

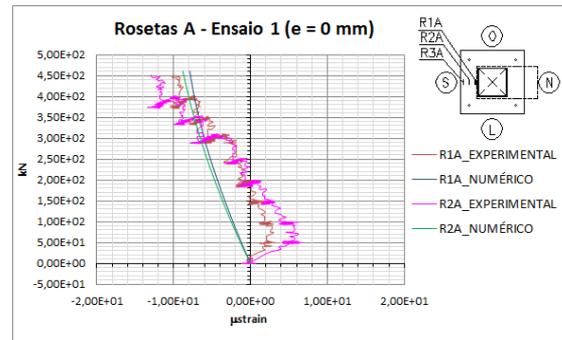


Fig. 20 - Resultados experimental e numérico nas rosetas A da placa de base para o Ensaio 1

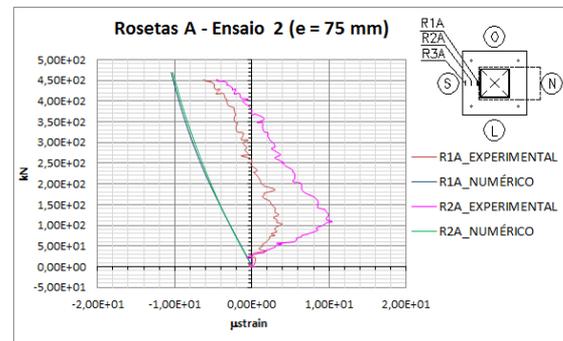


Fig. 21 - Resultados experimental e numérico nas rosetas A da placa de base para o Ensaio 2

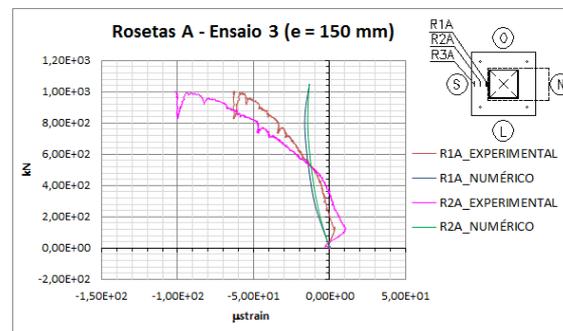


Fig. 22 - Resultados experimental e numérico nas rosetas A da placa de base para o Ensaio 3

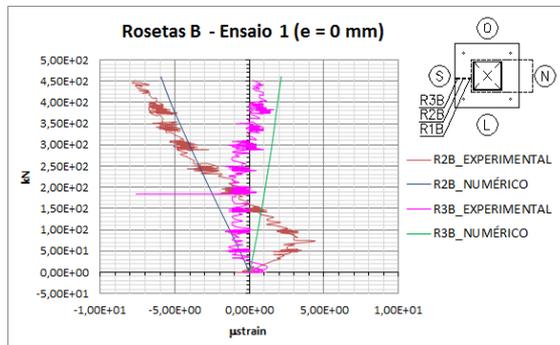


Fig. 23 - Resultados experimental e numérico nas rosetas B da placa de base para o Ensaio 1

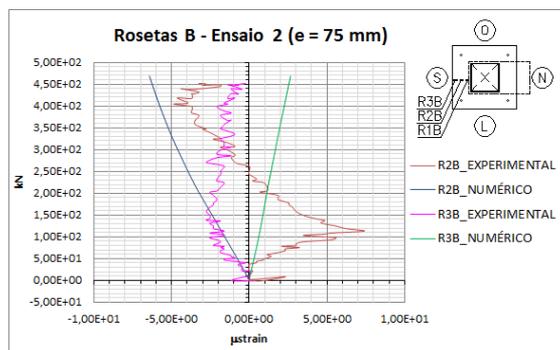


Fig. 24 - Resultados experimental e numérico nas rosetas B da placa de base para o Ensaio 2

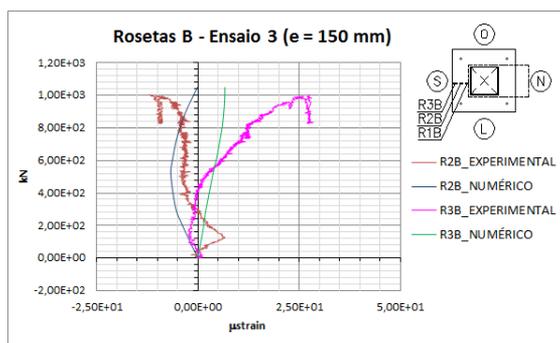


Fig. 25 - Resultados experimental e numérico nas rosetas B da placa de base para o Ensaio 3

Como o protótipo apresentou o comportamento de dupla curvatura, não foi possível observar o efeito de tração na placa de base esperado no Ensaio 3. Entretanto, pode-se aferir que a abertura na placa de base leva a tensões mais baixas do que aquelas atuantes no perfil de aço e a um comportamento mais equilibrado do pilar misto, uma vez que os esforços do núcleo de concreto são transmitidos diretamente para os blocos de fundação.

4.5 - Chumbadores

Nas Fig. 26 a 28 têm-se as deformações lidas nos chumbadores correspondentes aos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. Constata-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

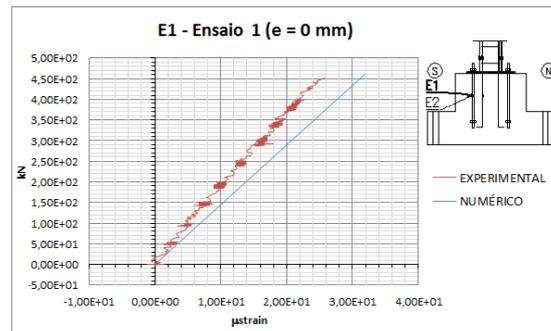


Fig. 26 - Resultados experimental e numérico nos chumbadores correspondentes ao Ensaio 1

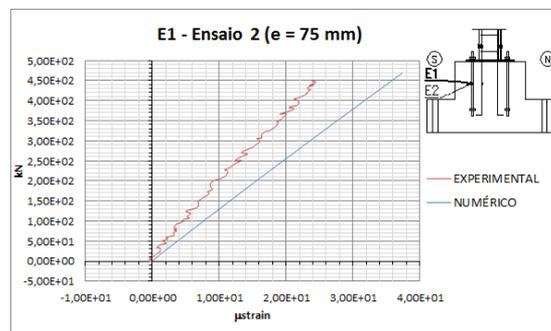


Fig. 27 - Resultados experimental e numérico nos chumbadores correspondentes ao Ensaio 2

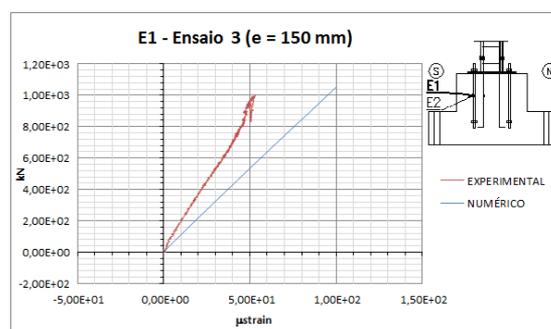


Fig. 28 - Resultados experimental e numérico nos chumbadores correspondentes ao Ensaio 3

4.6 - Armadura de Espera

Nas Fig. 29, 30 e 31 são mostradas as deformações nas armaduras de espera obtidas na análise experimental comparadas com as deformações no modelo numérico para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

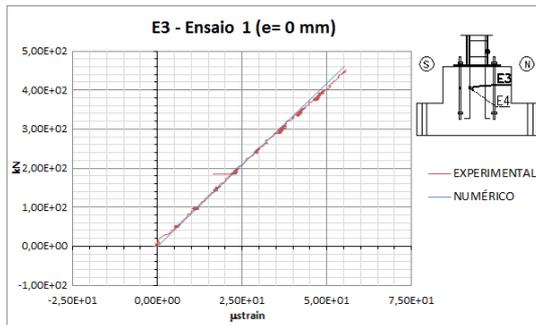


Fig. 29 - Resultados experimental e numérico na armadura de espera para o Ensaio 1

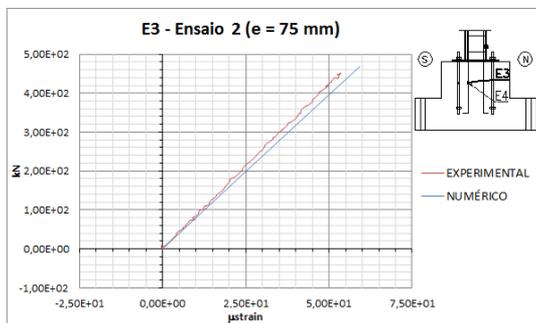


Fig. 30 - Resultados experimental e numérico na armadura de espera para o Ensaio 2

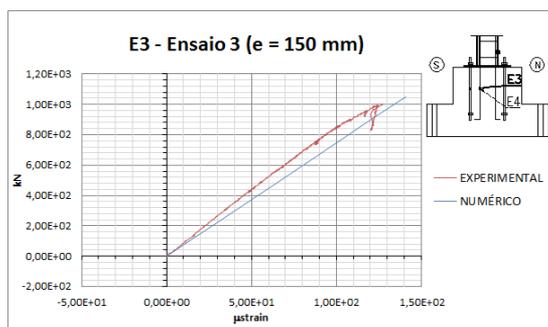


Fig. 31 - Resultados experimental e numérico na armadura de espera para o Ensaio 3

5- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apesar de alguns problemas percebidos na introdução das cargas, considera-se que os resultados experimentais e numéricos tiveram boa concordância.

O modo de deformação do modelo experimental foi adequadamente reproduzido no modelo numérico.

Medidas devem ser tomadas para liberar os deslocamentos no ponto de aplicação de cargas, de modo que o atuador não interfira no modo de deformação do protótipo.

As tensões na placa de base foram menores que as tensões na face do perfil de aço. Isso indica que a abertura da placa de base permitindo a continuidade da ligação do concreto do núcleo do pilar com os elementos da fundação representa uma solução interessante para os pilares mistos preenchidos com concreto.

6- REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 16239:2013. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, 85p.
- HIBBITT, KARLSSON and SORENSEN, ABAQUS/Standart - User's manual, Vol. I, II, III, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, EUA, 2009.