

Análise teórico-experimental de placas de base de colunas metálicas tubulares

Gisele S. Novo Possato

Engenheira, M.Sc., Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Área de Construção Metálica, Departamento de Engenharia Civil - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
E-mail: gisele.novo@gmail.com

Arlene M. S. Freitas

Professor Adjunto, D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Área de Construção Metálica, Departamento de Engenharia Civil - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
E-mail: arlene@em.ufop.br

Resumo

O aumento do uso de seções tubulares em estruturas metálicas tem destacado a necessidade de métodos que racionalizem as ligações parafusadas de barras tubulares. Nesse trabalho, foi desenvolvido um estudo teórico-experimental do comportamento das ligações de placas de base de colunas em perfil tubular circular solicitadas à força axial e momento fletor. Esses estudos foram realizados de modo a avaliar e comparar os resultados experimentais com as avaliações teóricas apresentadas em prescrições e literaturas existentes. O programa experimental envolve ensaios em colunas curtas com placas de base conectadas através de chumbadores a uma base de concreto com resistência controlada. A partir das comparações dos resultados experimentais com as avaliações teóricas, concluiu-se que as formulações propostas pela maioria das prescrições são conservadoras. As análises realizadas nesse trabalho foram na fase linear elástica.

Palavras-chave: Sistemas tubulares, seções tubulares, ligações.

Abstract

The increase of tubular sections in steel construction has created a need for methods to rationalize the connections for tubular frames. This paper presents a theoretical and experimental analysis of the hollow-steel-column base plates under eccentricity loads. Experimental results were compared with the results in existing literature. The experimental program involved the use of stub columns with steel base plates connected by anchor bolts set in a strength-controlled concrete foundation. Analyzing the experimental results in comparison to the theoretical evaluations, the results showed that majority of the theoretical analytical expressions were conservative. All the analysis was based on the elastic limit of the material.

Keywords: *Hollow Systems, Hollow Sections, Connections, Base Plates.*

1. Introdução

As placas de base são utilizadas para fazer a ligação da base da coluna com o elemento de apoio, geralmente um bloco de concreto, e tem por finalidade distribuir, adequadamente, a pressão da coluna sobre uma determinada área de fundação, sem exceder a resistência do concreto da mesma e garantir a fixação da extremidade da coluna. A fixação da placa de base com o bloco é através de chumbadores. O desempenho desse tipo de ligação é muito significativo no comportamento global da estrutura e influencia na distribuição de esforços, deslocamentos e estabilidade da mesma.

As placas de base de colunas podem estar submetidas a tipos de carregamento que dependem da excentricidade da aplicação da carga. A conexão entre a coluna e a chapa de base depende da combinação desses carregamentos atuantes e pode ser classificada de acordo com a restrição ao giro em: (a) bases flexíveis, que não oferecem restrição ao giro; (b) bases rígidas, que oferecem restrição ao giro; (c) bases semi-rígidas, que estão submetidas a carga horizontal e axial.

Nesse trabalho, a análise das placas de base contempla bases rígidas com comportamento uniforme e sem a utilização de enrijecedores na coluna.

2. Programa experimental

Os estudos experimentais envolveram cinco ensaios e foram realizados para analisar a resistência de placas de base de colunas formadas por tubos metálicos circulares. A posição do carregamento e a espessura foram variadas, considerando-se as mesmas dimensões, para placa de base e coluna, e foram observados nos ensaios, os modos de colapso obtidos e as conformidades destes com as avaliações teóricas.

No primeiro ensaio, Ensaio 1, a excentricidade do carregamento axial, na coluna, foi igual a uma vez o raio externo

do tubo da coluna, 84,15mm. No Ensaio 2, a excentricidade foi igual a duas vezes o raio externo do tubo da coluna, 168,3mm, e o protótipo (Protótipo 1) foi o mesmo utilizado no Ensaio 1. Para o Ensaio 3, foi construído um novo protótipo (Protótipo 2) de mesmas dimensões que o Protótipo 1 e com excentricidade de carregamento de 168,3mm. As chapas de base dos Protótipos 1 e 2 possuem espessura de 12,5mm. Nos Ensaios 4 e 5, foram fabricados mais dois protótipos (Protótipos 3 e 4) similares aos Protótipos 1 e 2, mas com espessura da placa de base igual a 16mm e excentricidade de carregamento de 168,3mm. Foi avaliada, ainda, a distribuição de deformações medidas a cada etapa de carregamento através de extensômetros elétricos de resistência.

2.1. Projeto dos protótipos e montagem dos ensaios

Para avaliação da placa de base, foram projetados protótipos com coluna curta tubular de seção transversal circular de comprimento definido, para que não ocorressem fenômenos como a flambagem da mesma. Para a aplicação de carga, foi projetado um consolo na extremidade livre da coluna de forma a absorver os níveis de carga previstos.

Foram adotadas, para os protótipos, placas de base quadradas de lado igual a 300mm e colunas tubulares circulares de diâmetro igual a 168,3mm, posicionadas no centro da placa de base. O bloco de apoio foi armado nas duas direções, utilizando barras de diâmetro de 8,0mm, de modo a evitar ruptura e danos no mesmo e, ainda, possibilitar sua fixação na laje de reação. Para a ancoragem da placa de base, foram utilizados chumbadores de barras rosqueadas de diâmetro igual 19mm. O protótipo foi posicionado no bloco de apoio e utilizou-se *grout* para nivelamento da superfície entre ambos. A Figura 1 ilustra um protótipo ensaiado e o sistema de aplicação de carga nos ensaios realizados e o esquema de montagem dos ensaios.

2.2 Instrumentação

Para a instrumentação dos corpos de prova, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), transdutor de deslocamento (LVDT), defletômetros, célula de carga e sistema automático de aquisição de dados. Os extensômetros foram colados na placa de base e nos chumbadores e seu posicionamento estão mostrados nas Figuras 2 e 3.

Os LVDT's e defletômetros mecânicos (Figura 4) foram utilizados para medição dos deslocamentos de recalque do bloco e, assim, avaliar as influências dos mesmos nos resultados obtidos.

Para a aplicação da carga, utilizou-se atuador hidráulico fixado à mesa inferior da viga do pórtico de reação e, para medição do carregamento, utilizou-se célula de carga.

2.3 Metodologia de ensaio

Inicialmente realizou-se um pré-ensaio, na fase elástica do material, para verificação do sistema de aquisição de dados, da instrumentação e dos equipamentos utilizados, e, também, para acomodação do conjunto bloco de concreto e protótipo. Em seguida, fez-se a aplicação de carregamentos crescentes até o colapso. A cada etapa de carga, foi realizada a aquisição de deformações e deslocamentos.

3. Resultados experimentais

Para a caracterização do material das placas de base, foram realizados ensaios de tração, dureza e análise química nas chapas conforme a ASTM (1995). Para os protótipos 1 e 2, que possuem espessura da chapa de 12,5 mm, têm-se o limite de escoamento de 308,3 MPa e o limite de ruptura de 464,3 MPa. Para os protótipos 3 e 4, que possuem espessura da chapa de 16 mm, têm-se o limite de escoamento de 435,6 MPa e o limite de ruptura de 632,6 MPa.

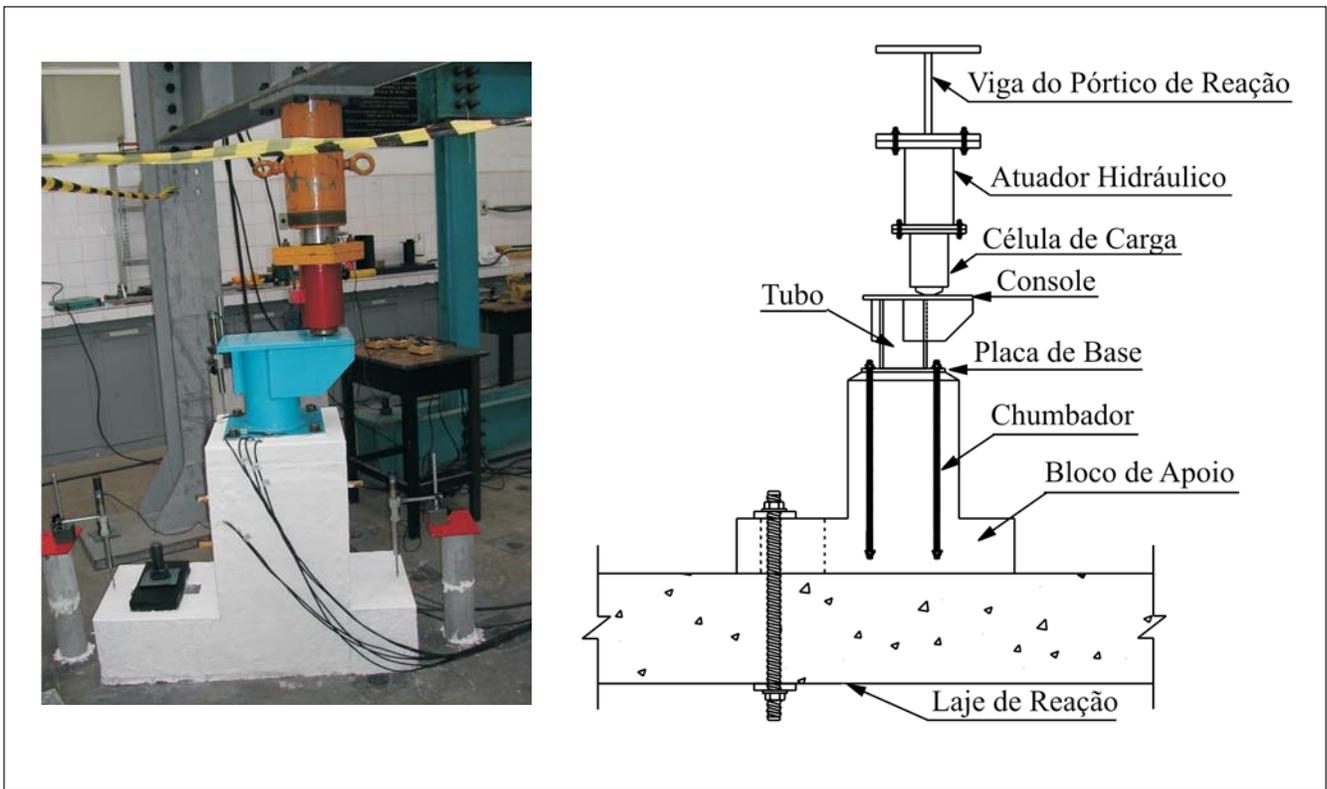


Figura 1 - Esquema geral de montagem dos ensaios.

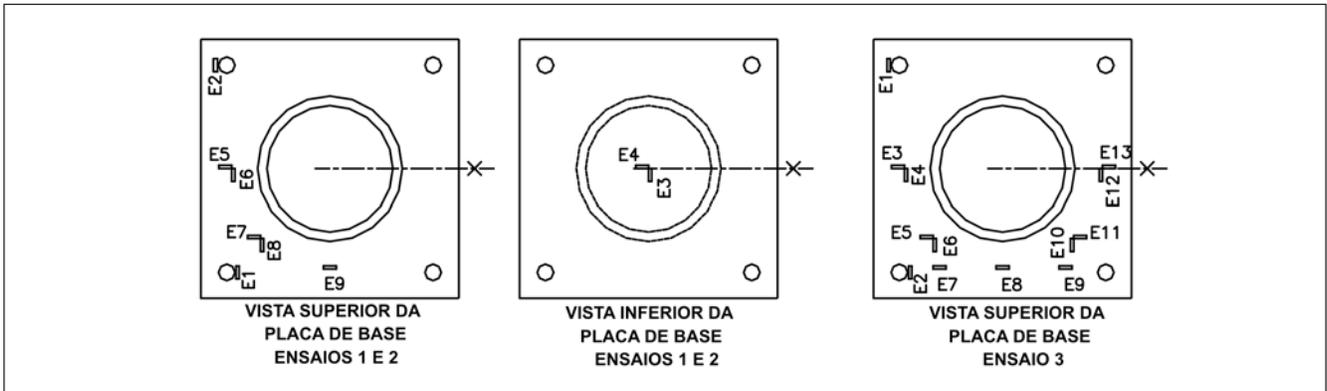


Figura 2 - Esquema de instrumentação com extensometria - Ensaios 1, 2 e 3.

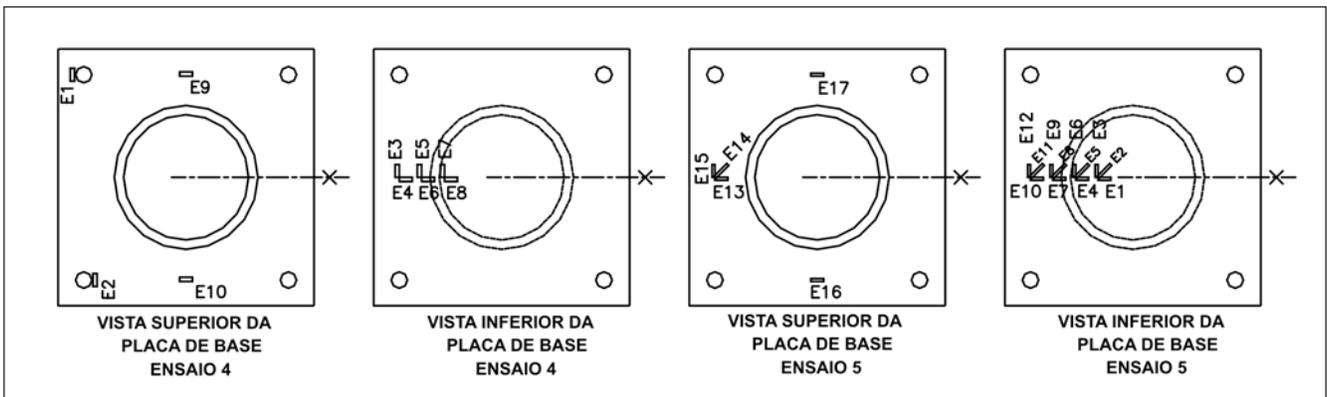


Figura 3 - Esquema de instrumentação com extensometria - Ensaios 4 e 5.

Foram realizados cinco ensaios, sendo que apenas no Ensaio 1 não ocorreu escoamento da placa de base, devido à paralisação do mesmo por problemas no sistema de aplicação da carga. O valor da carga, que levou a placa de base ao escoamento, foi encontrado a partir da tensão de escoamento do aço da placa de base, proveniente do ensaio de caracterização do material da mesma. Para todos os ensaios, foram calculadas as tensões principais, a partir das deformações lidas pelos extensômetros, nos ensaios, e, dessa forma, foi possível fazer análise do comportamento elástico da placa de base. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Quadro 1 e a posição dos extensômetros está mostrada nas Figuras 2 e 3. Nesse Quadro 1, têm-se os valores máximos de deformação.

As leituras dos defletômetros e do LVDT apresentaram valores muito pequenos, concluindo-se, assim, que não houve movimentação do bloco de concreto e nem deslocamentos significativos do console de aplicação da carga, em todos os ensaios realizados.

No Ensaio 1, a carga máxima aplicada foi de 600,32 kN e a deformação máxima de 687 μ no extensômetro E6, que corresponde à tensão de 179,3 MPa. Ainda, nesse ensaio, observou-se que o núcleo

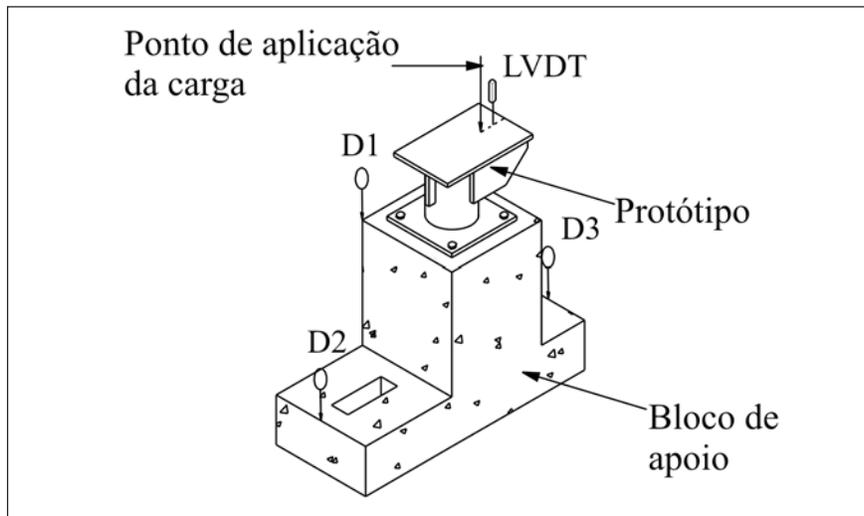


Figura 4 - Detalhe do posicionamento do LVDT e defletômetros do Ensaio 3.

central do tubo sofreu variações nas deformações que caracteriza região limite entre tracionada e comprimida da placa de base.

No Ensaio 2, observou-se, que praticamente, não houve deformação no núcleo central do tubo, devido ao nível de excentricidade desse ensaio, que é de 168,3 mm, e passa a ser determinante no comportamento do conjunto placa-bloco. Já no Ensaio 1, os valores das deformações são bem maiores no núcleo central, pois a região de aplicação de carga

está localizada na parede do tubo da coluna, caracterizando a alta concentração de tensões através da transmissão da carga pelo tubo para a placa de base.

No Ensaio 5, ficou comprovado que as tensões calculadas, nesse trabalho, a partir das deformações lidas pelos extensômetros em todos os ensaios, são as tensões principais, pois foram colados extensômetros a 45° e, a partir destes, puderam ser calculadas as tensões de cisalhamento, verificando-se, dessa forma, que são praticamente nulas.

Quadro 1 - Resultados dos ensaios experimentais.

Ensaio	Carga de Escoamento (kN)	Carga Máxima (kN)	Deformação no Escoamento (microstrain)	Tensão no Escoamento (MPa)	Direção das Tensões	EER
2	158,7	301,3	584	215,81	Tensão x	E5
			1073	291,18	Tensão y	E6
3	163,3	306	509	201,9	Tensão x	E3
			1117	295,61	Tensão y	E4
4	287,9	378,5	-195	-182,42	Tensão x	E4
			-1812	-431,66	Tensão y	E3
5	310,5	414,7	136	143,19	Tensão x	E13
			1474	349,42	Tensão 45	E14
			847	6,62	Tensão y	E15

4. Avaliação e comparação dos resultados experimentais

A avaliação teórica das placas de base utilizadas nos ensaios foi calculada a partir das características geométricas dos protótipos ensaiados e, assim, foi encontrada a carga máxima nominal que as respectivas placas suportam na fase elástica. Para o cálculo da carga máxima nominal, não foi utilizado nenhum coeficiente de majoração nas equações.

4.1 Avaliação segundo prescrições existentes

O método de cálculo para bases de colunas recomendadas pela maioria dos autores segue uma concepção básica que será descrita a seguir e será apresentado o dimensionamento de placa de base rígida utilizando dois desenvolvimentos de cálculo, um baseado na European Committee for Standardisation EUROCODE3 (1992) e o outro baseado na American Institute of Steel Construction AISC (1998).

Para calcular a espessura da placa de base, é necessário, primeiramente, calcular as pressões de contato da placa com o bloco de concreto. Portanto a tensão resultante dos esforços solicitantes transmitidos pela base não deverá superar a resistência do concreto, uma vez que o esmagamento do concreto também constitui um estado limite último:

$$\sigma \leq \sigma_c = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = f_{cd} \quad (1)$$

Onde: σ = tensão resultante dos esforços solicitantes, σ_c = tensão resistente do concreto, f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão, γ_c = coeficiente de ponderação do concreto, sendo $\gamma_c = 1,4$; f_{cd} = resistência de cálculo do concreto à compressão.

A pressão de contato admissível de cálculo, P , é função da resistência do concreto e da relação entre as áreas do con-

creto e da placa, como mostrado a seguir:

$$P = \phi \cdot 0,7 \cdot f_{ck} \cdot \sqrt{\frac{A_c}{A_b}} \leq \phi \cdot 1,4 \cdot f_{ck} \quad (2)$$

Onde, A_b = área da superfície da placa de base; A_c = área da superfície de concreto homotética em relação a A_b ; ϕ = resistência de cálculo, sendo $\phi = 0,7$ para EUROCODE3 (1992) e NBR8800 (1986) e $0,5$ para AISC (1998).

A placa de base deve ser dimensionada para comportar-se como uma placa rígida. O comportamento dessa placa rígida é considerado, pela maioria dos autores, semelhante a de uma viga em balanço, Figura 5(c), com carregamento distribuído, devendo ser calculado o momento fletor em torno de uma seção crítica. De acordo com a EUROCODE3(1992), a seção crítica é localizada na face externa da coluna e o comprimento do balanço da viga é igual a a_1 , conforme mostrado na Figura 5(a). Já na AISC (1998), a seção crítica é mais interna à coluna e o comprimento do balanço da viga é igual a m , conforme mostrado na Figura 5(b). Os valores de a_1 e m são obtidos através da Equação 3, onde L é o comprimento da placa de base e D é o diâmetro da coluna.

$$a_1 = \frac{L - D}{2} \quad \text{ou} \quad m = \frac{L - 0,8 \cdot D}{2} \quad (3)$$

Inicialmente são calculadas a pressão de contato máxima e a mínima, P_1 e P_2 , que variam em função da dimensão da placa de base e da excentricidade do carregamento axial (Figura 5(c)). Com as pressões de contato encontradas, é possível calcular o momento na borda da placa, que é o maior momento que ocorre na placa de base. Com o valor do momento na borda da placa, M_{borda} , é realizada a relação de que o momento de solicitação deve ser menor ou igual ao momento resistente, e, assim, é possível calcular a espessura, t_p , da placa de base, como apresentado na Equação 4, onde, t_p = espessura da placa de base; f_y = tensão de escoamento do aço.

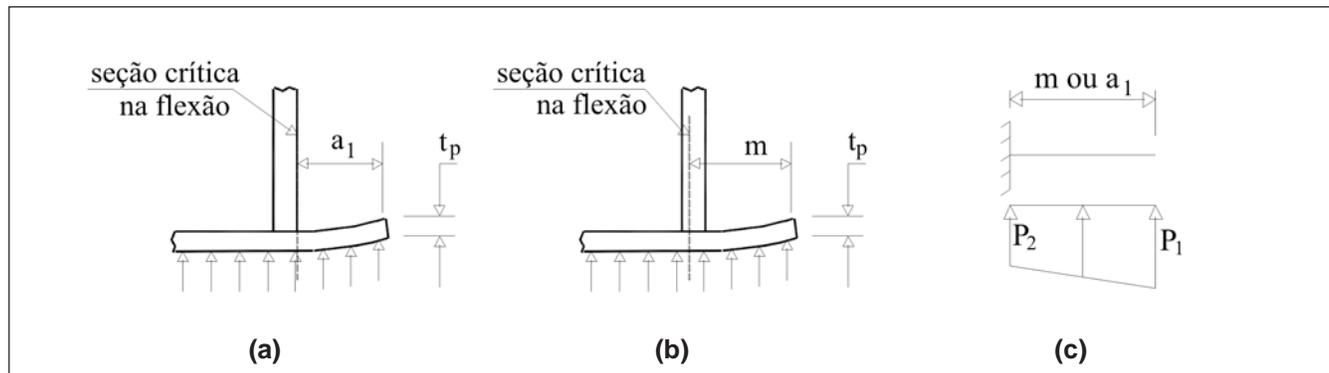


Figura 5 - Detalhe seção crítica da viga em balanço e sua projeção.

$$t_p = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{borda}}}{B \cdot f_y}} \quad (4)$$

Dessa forma, têm-se no Quadro 2, o resultado da análise teórica e da análise experimental no regime elástico.

4.2 Comparações entre as formulações

Para comparar os resultados da análise teórica com a análise experimental, foi feito um gráfico, Figura 6, onde foram

consideradas a espessura da placa de base de 12,5 mm e a tensão de escoamento do aço da placa de 308 MPa, de acordo com os Ensaios 2 e 3, e a espessura da placa de 16 mm e a tensão de escoamento do aço da placa de 435 MPa, de acordo com os Ensaios 4 e 5. No eixo vertical, está representada a carga máxima de ruptura dividida pela tensão de escoamento do aço da placa de base e, no eixo horizontal, está representado o comprimento da placa de base dividido pela espessura da mesma. A espessura da placa de base variou de 12 mm até 17 mm. A excentricidade da aplicação da

carga foi de 168,30 mm, como ocorreu nos Ensaio 2 ao Ensaio 5.

Na Figura 6, é possível perceber a influência da espessura e do limite de escoamento do aço da placa de base na resistência da mesma e que a formulação baseada na AISC é mais conservadora que a formulação baseada no EUROCODE.

5. Conclusões

Através dos resultados obtidos, pode-se observar, de uma maneira geral, que as tensões variam muito com o au-

Quadro 2 - Resultados da Análise Teórica e Experimental (Regime Elástico).

Ensaio	Carga Máxima Nominal na Placa de Base(kN)		
	Análise Teórica EUROCODE a ₁ = 65,85mm	Análise Teórica AISC m = 82,68 mm	Análise Experimental
2	86	56,4	158,7
3	86	56,4	163,3
4	199	130,4	287,9
5	199	130,4	310,5

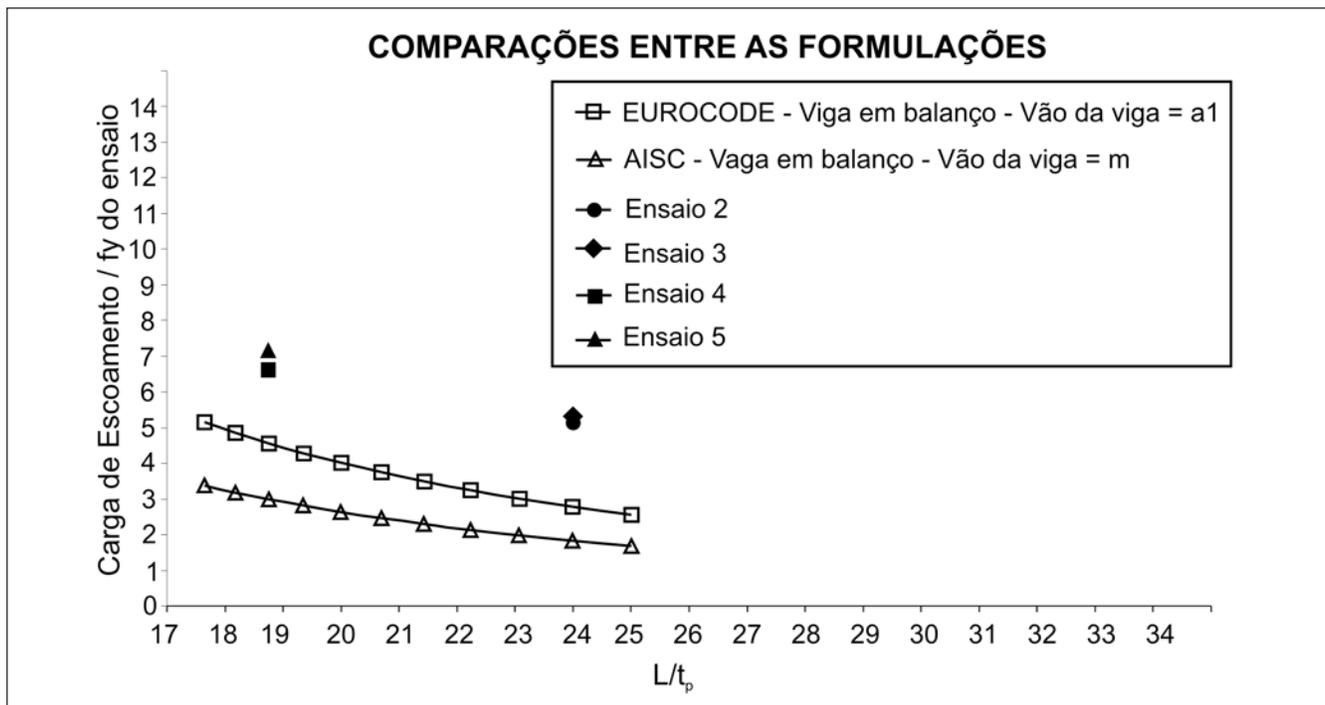


Figura 6 - Comparação dos resultados da análise teórica e experimental.

mento da excentricidade, para um dado carregamento axial, e uma mesma espessura de placa. A distribuição de tensões, no carregamento axial, mostra que a aproximação do comportamento da placa de base a de uma viga em balanço com carregamento distribuído é conservadora e fornece espessura elevada.

Nos Ensaio 2 a 5, que possuem excentricidade de carregamento de 168,30 mm, o escoamento ocorreu primeiro na posição dos extensômetros que se localizam na linha de eixo dos chumbadores tracionados, ou seja, nessa posição ocorreu as maiores tensões diminuindo à medida que os extensômetros se aproximam da coluna, chegando a ficarem nulos no centro da mesma. Observou-se, também, que as cargas experimentais médias que provocaram escoamento na placa de base são, aproximadamente, 33% e 47% maiores que as cargas teóricas obtidas a partir de formulações das prescrições de cálculo. De acordo com as deformações medidas, obser-

vou-se que, em todos os ensaios e para um mesmo nível de carregamento, têm-se valores de deformação compatíveis entre si. Esse resultado possibilita uma mesma análise para todos os ensaios realizados.

As prescrições propõem que, para o cálculo da espessura da placa de base, deve ser considerada a projeção da placa como sendo uma viga em balanço, engastada na parede do tubo da coluna e livre na borda da placa de base, onde o carregamento dessa viga é a pressão de contato entre a placa de base e o bloco de concreto. Com relação a essa hipótese, foi possível observar, experimentalmente, a condição de engaste, já que, nos Ensaio 4 e 5, as deformações aumentam à medida que se aproxima dos chumbadores tracionados e tendem a zero na região interna do tubo da coluna, caracterizando a hipótese de que existe um engaste nessa região, mas sua posição seria mais interna ao tubo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES e a V&M do Brasil.

7. Referências bibliográficas

- AISC. *Hollow structural sections*. Connections Manual, 1997.
- AISC. *Manual of steel construction*. . 2. ed. Load and Resistance Factor Design-LRFD, v.1&2, Illinois, 1998.
- ASTM. *E8M-95 A-Standard test methods for tension testing os metallic materials (metric)*. 1995.
- NBR 8800. *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*. Rio de Janeiro/RJ: 1986.
- DEWOLF, J.T., RICKER, D. T. *Column Base Plates*. AISC Design Guide Series I, Chicago, IL. 1990.
- EUROCODE 3. *Design of steel structures*. ENV 1993-1 - 1: General rules and rules for buildings. 1992.
- POSSATO, G.S.N. *Análise teórico-experimental de placas de base de colunas metálicas tubulares*. Ouro Preto: 2004. (Dissertação de Mestrado).
- Artigo recebido em 28/12/2005 e aprovado em 11/09/2006.**

REM - Revista Escola de Minas
70 anos divulgando CIÊNCIA.

www.rem.com.br
