



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE BARRAS COMPOSTAS COMPRIMIDAS FORMADAS POR PERFIS TUBULARES CIRCULARES CONCÊNTRICOS LAMINADOS DE AÇO

Glaucimar Lima Dutra

Ricardo Hallal Fakury

Francisco Carlos Rodrigues

Lucas Figueiredo Grilo

Vitor Augusto Correia

João Gabriel Ferreira dos Santos

galdutra@hotmail.com

fakury@dees.ufmg.br

francisco@dees.ufmg.br

lucasfgrilo@gmail.com

vitoraugusto1992@hotmail.com

Joaogabriel-fs@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte, CEP 31270-901, Minas Gerais, Brasil.

Resumo. Os perfis tubulares circulares possuem um ótimo comportamento estrutural quando submetido à compressão axial. Devido limitação de diâmetros dos perfis laminados a quente, eles têm uma faixa de aplicação limitada. Contudo, podem ser adotadas alternativas para viabilizar sua utilização em situações de atuação de maior força axial de compressão, como o uso de perfis unidos por justaposição, por barras de treliçamento ou por chapas ou, ainda, a colocação de concreto em seu interior. Essas alternativas, entretanto, podem gerar impacto na arquitetura ou modificações substanciais no projeto original. Nesse contexto, foi proposta uma nova solução com barras compostas por dois ou três perfis tubulares circulares concêntricos. Neste trabalho são apresentados os resultados da análise experimental de três modelos de barras compostas por três perfis tubulares circulares concêntricos submetidas à força axial de compressão, variando-se o tipo de interligação entre os perfis.

Palavras-chave: estruturas de aço, perfis tubulares circulares concêntricos, compressão axial.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares circulares, devido à sua forma geométrica da seção transversal (fechada e vazada), que proporciona uma concentração de material mais distante do seu centro de massa, possuem boa resistência às solicitações de compressão axial e de torção. Comparados com os perfis abertos, sob essas solicitações, são mais econômicos, pois possuem menor peso e, adicionalmente, menor área superficial o que diminui os custos de pintura e material de revestimento contra fogo. Além disso, apresentam-se eficientes também em solicitações dinâmicas como resultantes de esforços causados pelo vento e à maré.

No Brasil, os perfis tubulares circulares sem costura, que são obtidos através do laminador perfurador, são produzidos somente pela Vallourec Tubos do Brasil, na Usina Barreiro em Belo Horizonte e na Usina de Jeceaba, ambas em Minas Gerais. Devido à restrição de dimensões pelo equipamento que os produzem, esses perfis têm diâmetros e espessuras limitados, o que impede o seu uso quando os esforços solicitantes são muito elevados.

Para resolver essa situação, algumas alternativas são empregadas. A mais comum delas é a composição de perfis tubulares, usualmente feita de duas formas. A primeira é feita com perfis soldados diretamente entre si (perfis justapostos), e a segunda feita unindo os perfis por meio de barras de treliçamento ou chapas de ligação contínuas ou intermitentes (ou outros perfis tubulares), como se vê na figura 1, para a composição de dois e três tubos. Essa alternativa apresenta inconvenientes de fabricação e dimensionamento. As soldas entre os perfis justapostos não são de fácil execução e nas ligações com outros elementos estruturais, a excentricidade pode ser grande, o que provoca aumento das solicitações. Além disso, podem provocar impactos desfavoráveis nos aspectos arquitetônicos.

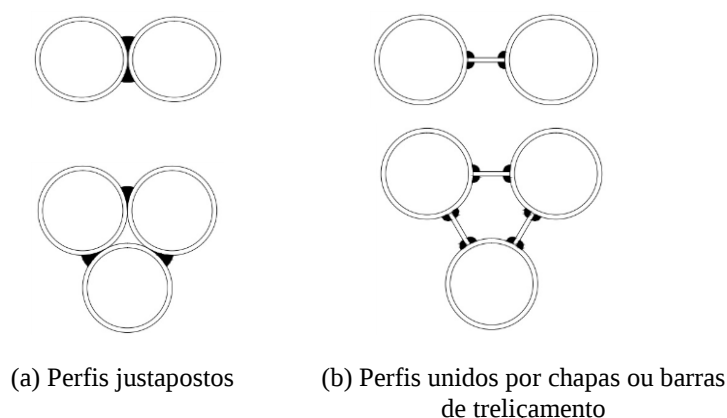


Figura 1. Seções transversais compostas com dois e três tubos.

Outra alternativa consiste em preencher o perfil tubular com concreto, formando um elemento misto de aço e concreto. Entretanto, tal solução também pode apresentar aspectos desfavoráveis em função das operações inerentes ao uso do concreto, além de elevar o peso da estrutura.

Uma solução inovadora, estudada por Grilo (2015) para situações de força axial de compressão é o emprego de dois ou três perfis tubulares circulares compostos concentricamente, como mostra a figura 2. Assim, os esforços atuantes podem ser suportados

pelos múltiplos perfis sem a utilização de concreto e praticamente sem modificar o projeto arquitetônico.



(a) Dois perfis tubulares

(b) Três perfis tubulares

Figura 2. Seção transversal de perfil tubular circular concêntrico composto por dois ou três perfis (Grilo, 2015).

Este trabalho tem por objetivo analisar, por meio de ensaios de laboratório, o comportamento de barras compostas formadas por três perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço a fim de determinar a força axial de compressão resistente dos mesmos. Nessa análise, os resultados dos ensaios são comparados, quando possível, com os do procedimento proposto por Grilo (2015), obtidos com base em análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos.

2 PERFIS TUBULARES CIRCULARES COMPOSTOS CONCÊNTRICOS

2.1 Ligação dos tubos nos flanges de extremidade

Nas extremidades, os perfis tubulares circulares compostos concêntricamente, doravante denominados PTCCs, são unidos por chapas transversais (flanges) vazadas para se obter acesso à solda do tubo interno, como ilustra a figura 3, sendo essas chapas também usadas para ligação com outros componentes da estrutura. A ligação do tubo externo com o flange é realizada com solda de filete, e a do tubo interno por meio da solda de penetração parcial, com a execução de chanfro no flange (a solda fica nivelada com a face externa do flange). Para o encaixe do tubo intermediário, o flange recebe duas ranhuras, simétricas, que devem ser chanfradas na face inferior desse tubo para que haja penetração da solda.

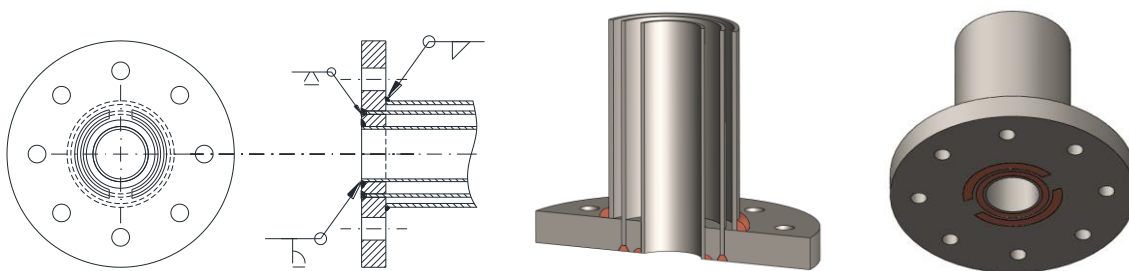


Figura 3. Corte e detalhe da ligação do flange nos perfis tubulares circulares compostos concêntricos (Grilo, 2015).

2.2 Interligação entre os tubos ao longo do comprimento da barra

Ao longo do comprimento dos PTCCs, conforme Grilo (2015), é prevista a possibilidade de utilização de interligações entre os tubos por meio de travamento fixo e travamento deslizante, bem como a situação em que nenhum travamento é utilizado.

No caso de PTCC com travamento fixo, são utilizadas peças de conexão soldadas entre as paredes dos tubos. O processo de montagem desse travamento pode ser dividido em três etapas. Na primeira etapa, as peças de conexão são fixadas, com solda de filete, na parede externa do tubo interno, conforme a figura 4.a. Na segunda etapa, o tubo intermediário é perfurado, de acordo com a posição das peças de conexão, posicionando e, em seguida, soldado nas peças de conexão com solda de tampão (figura 4.b). Na terceira etapa, repetem-se as operações da segunda etapa para o tubo externo (figura 4.c).

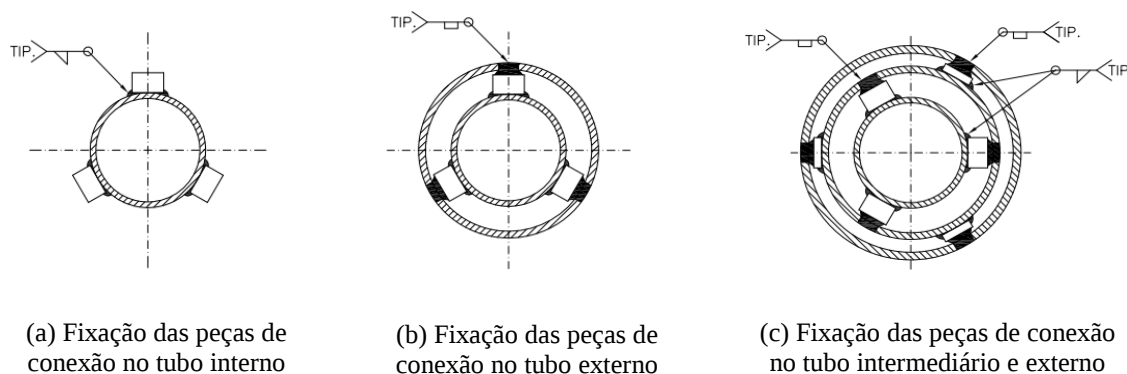


Figura 4. Travamento fixo dos PTCCs (Grilo, 2015).

Para PTCC com travamento deslizante, mostrado na figura 5, a interligação entre os tubos é feita pela fixação de pinos. Os pinos são fixados nos tubos externo e intermediário, transpassando suas paredes de forma que os pinos do tubo externo toquem o tubo intermediário e os pinos do tubo intermediário toquem o tubo interno. A montagem desse tipo de travamento consiste em, primeiramente perfurar os tubos externo e intermediário nos pontos que os pinos serão transpassados. Logo em seguida, monta-se o conjunto e posicionam-se os pinos de forma que faceiem os tubos intermediário e interno. Após o posicionamento dos pinos utilizam-se soldas de filete ligando os pinos às faces externas dos tubos externo e intermediário.

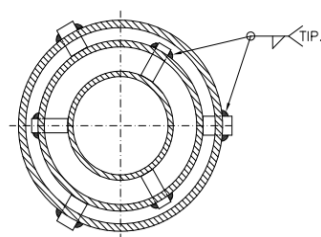


Figura 5. Travamento deslizante dos PTCCs (Grilo, 2015).

2.3 Comportamento e dimensionamento de PTCC sob compressão axial

O estudo do comportamento de PTCCs submetidos à força axial de compressão deu-se a partir da análise de modelos numéricos calibrados conforme a ABNT NBR 16239:2013,

portanto com curvatura inicial de um milésimo do comprimento, desenvolvida por Grilo (2015). Para tal, foram simulados 324 modelos numéricos com três tubos, sem travamento entre si ao longo do comprimento e com travamentos fixos e deslizantes, com esbeltez (λ) da barra entre 5 e 200 e utilizando dimensões de perfis tubulares circulares sem costura comercializados no Brasil.

Adotou-se o aço resistência ao escoamento (f_y) de 350 MPa e módulo de elasticidade (E) de 200 GPa. As tensões residuais foram desprezadas, tendo em vista que, nos os perfis tubulares circulares laminados a quente são de baixa magnitude e distribuídas ao longo da sua espessura. Isso ocorre devido à geometria da seção transversal desses perfis, cujo resfriamento acontece de modo praticamente uniforme e mais rapidamente na face externa com relação à face interna (Law e Gardner, 2012). Segundo o European Convention for Constructional Steelwork (1976), as tensões residuais não afetam de forma considerável os perfis tubulares circulares laminados a quente, como ocorre em outros perfis laminados, pois apresentam uma variação linear ao longo da espessura entre -15% a +15% da resistência ao escoamento do aço.

A análise consistiu na distribuição da força de compressão nos perfis tubulares circulares compostos concêntricos ao longo da aplicação do carregamento em cada tubo do conjunto, de acordo com o passo de carga.

Segundo Grilo (2015), os tubos internos, com travamentos fixo e deslizante, suportam mais carga quando trabalham isoladamente. Isso se deve ao fato que os tubos externo e intermediário estabilizam o tubo interno menos rígido, ampliando sua capacidade de resistência e compatibilizando os deslocamentos ao longo dos perfis. Assim, os travamentos (fixo e deslizante) aumentam a capacidade resistente do conjunto quando comparada com a soma das capacidades dos tubos isolados.

Já no caso em que não há travamento ao longo do comprimento do conjunto, os tubos não trabalham totalmente solidarizados. Como o tubo interno é menos rígido que os demais, é possível que a força de colapso nele seja atingida antes dos demais. Essa condição faz com que a capacidade resistente do conjunto possa ser inferior à dos PTCCs com travamentos, podendo chegar, em algumas situações, à ser inferior à soma da capacidade resistente dos tubos isolados. (Grilo, 2015).

Como ilustração, na figura 6 é apresentado o gráfico de força *versus* passo de carga para o modelo de esbeltez igual a 80, composto por três perfis tubulares circulares com as seguintes dimensões:

- perfil interno: diâmetro de 73.0 mm e espessura de 3.6 mm;
- perfil intermediário: diâmetro de 114.3 mm e espessura de 4.5 mm;
- perfil externo: diâmetro de 141.3 mm e espessura de 5.0 mm.

Nesse gráfico, pode-se observar os comportamentos dos tubos em conjunto do PTCC sem travamento e com os travamentos fixo e deslizante, além das forças atuantes em cada tubo isolado e as forças resistente nominais obtidas de acordo com ABNT NBR 16239:2013.

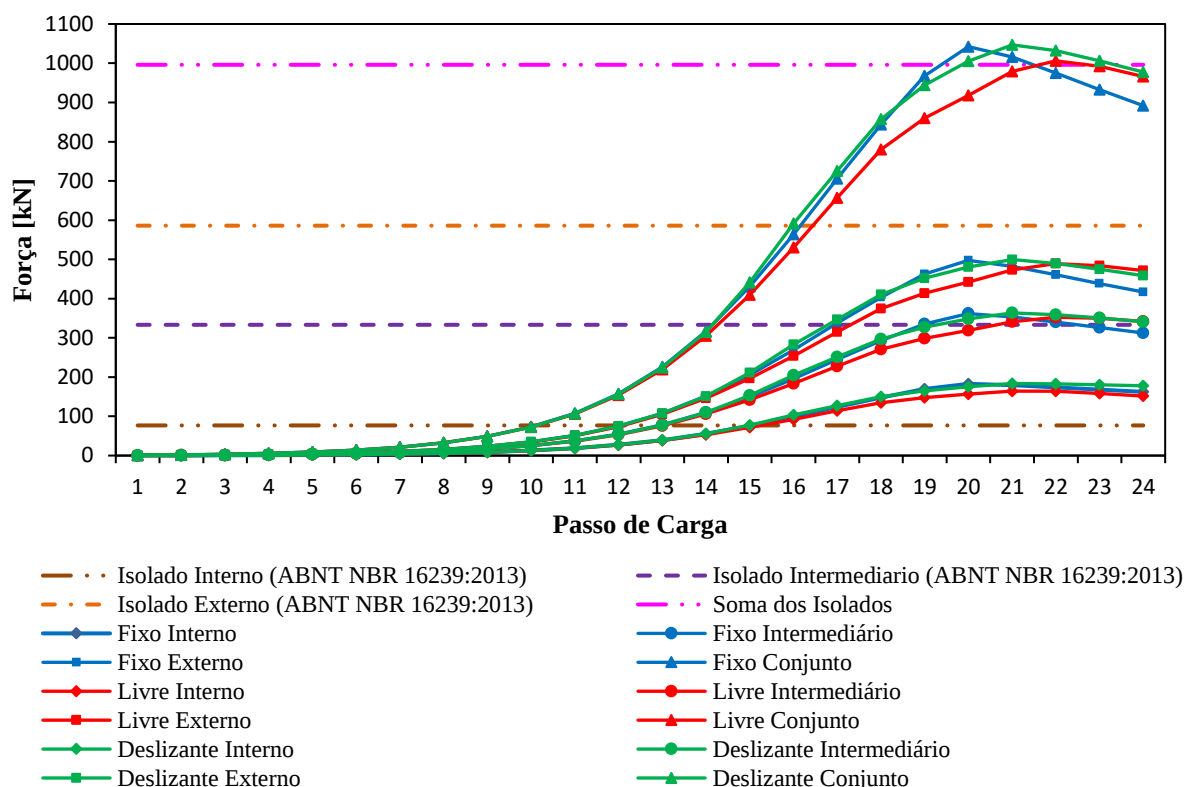


Figura 6. Força versus passo de carga perfis tubulares compostos por três tubos concêntricos (Grilo, 2015).

Grilo (2015) concluiu que os conjuntos com travamentos fixo e deslizante apresentavam comportamentos similares e que esses conjuntos poderiam ser dimensionados usando o procedimento da ABNT NBR 16239:2013 para barras axialmente comprimidas, tomando como área bruta e momento de inércia da seção transversal as somas das áreas brutas e dos momentos de inércia de cada tubo isolado, respectivamente. Observou-se que as forças resistentes nominais obtidas por esse procedimento ficavam sempre inferiores às da análise numérica, mas sem ultrapassar a diferença de 6%.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Para a investigação experimental, foram utilizados três modelos de perfis tubulares circulares compostos por três tubos concêntricos de 3.6 m de comprimento, mostrados na figura 7, em que o tubo externo tem seção 141.3 (diâmetro externo) x 5.0 (espessura), o intermediário 114.3 x 4.5 e o interno 73.0 x 3.6, sendo um modelo com travamento fixo (Modelo B-F), um com travamento deslizante (Modelo B-D) e o último sem travamento (Modelo B-L). Todos os perfis foram produzidos pela Vallourec Tubos do Brasil, com aço VMB 350 e valores nominais de f_y de 350 MPa e de f_u de 485 MPa. A fabricação dos perfis compostos foi executada pela Brafer, na cidade do Rio de Janeiro.

Os modelos, após terem suas imperfeições geométricas medidas, foram submetidos a ensaio de força de compressão centrada no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foram executados nos modelos ensaios de força de compressão centrada.



Figura 7. Modelos dos perfis tubulares circulares compostos por três tubos concêntricos.

3.2 Processo de medição de imperfeições geométricas

Para medir as imperfeições geométricas em perfis tubulares circulares tem-se a dificuldade da geometria da seção transversal circular, além do modelo ser constituído por tubos internos. A solução adotada foi medir a distância entre a superfície do tubo até uma linha de nylon previamente tracionada, tomando como referência os flanges nas extremidades dos tubos, como mostra a figura 8.a. Essa distância foi aferida por meio de um paquímetro eletrônico (figura 8.b). Em relação aos tubos internos, foram executados pequenos furos (diâmetro de 6 mm) nas extremidades do modelo e na região central, de maneira que fosse possível a passagem da haste do paquímetro (figura 8.c).



(a) Linha de nylon previamente tracionada posicionada no modelo.



(b) Aferição da distância entre a linha de nylon e a superfície do tubo utilizando o paquímetro.



(c) Furos com diâmetros de 6 mm para o alcance da superfície dos tubos internos.

Figura 8. Procedimento para as medidas de imperfeição geometria dos modelos.

Essas medidas foram realizadas nos quatro lados do flange nos eixos: X- X' e Y-Y' (figura 9.a). Em cada lado eram aferidas as distâncias da superfície do tubo a linha das duas extremidades (pontos A e B) e na região central (ponto C), conforme mostra o esquema da figura 9.b.

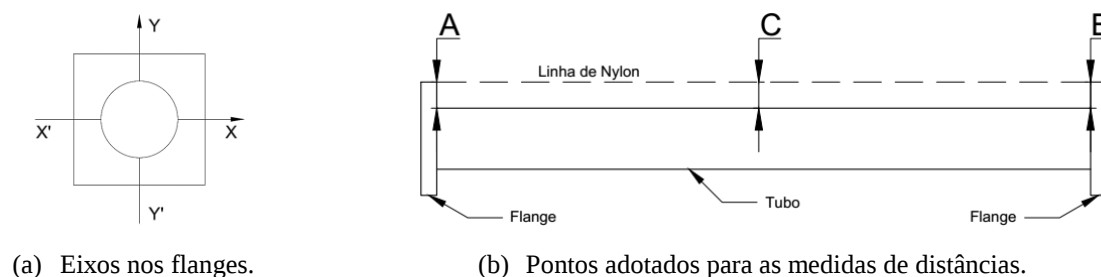


Figura 9. Esquema das medidas de imperfeição geométrica dos modelos.

3.3 Dispositivos de ensaios e instrumentação

Para execução dos ensaios utilizou-se um pórtico que suporta o atuador hidráulico responsável pela aplicação da força centrada de compressão no modelo, como pode ser observado na figura 10.a. Os modelos foram fixados em suas bases por rótulas semiesféricas, que configuram um sistema birrotulado (figuras 10.b e 10.c). A rótula semiesférica permite a rotação no espaço das extremidades do perfil, mas impede o seu deslocamento.

A carga foi aplicada nos modelos por meio de um atuador hidráulico manual com capacidade de 2000 kN e pressão máxima de trabalho de 700 bar. O curso do atuador era fixo à chapa constituinte da rótula semiesférica, que por sua vez estava fixa aos modelos, transmitindo, assim, a estes, a carga (figura 10.b).



(a) Pórtico utilizado para execução dos ensaios.



(b) Rótula semiesférica presa ao atuador hidráulico (extremidade superior).



(c) Rótula semiesférica fixa na extremidade inferior do modelo.

Figura 10. Montagem do modelo no pórtico rígido para aplicação da carga de compressão.

Nos ensaios, as medidas dos deslocamentos laterais na região central dos modelos foram obtidas através de transdutores de deslocamentos (DTs), baseados na tecnologia LVDT (linear variable differential transformer). Como a seção transversal é circular há inúmeras possibilidades de direção que o deslocamento lateral pode assumir quando o perfil é solicitado. Portanto, houve a necessidade de se estudar uma forma de posicionar os DTs de maneira que pudesse medir o deslocamento em qualquer direção, para os tubos internos, intermediários e externos. As seguintes configurações foram adotadas:

- tubo externo: utilizou-se dois DTs apoiados em uma coluna metálica, fixa, com os seus cursores posicionados sobre chapas soldadas no modelo, posicionados a 90° um do outro,

como mostram as figuras 11.a e 11.c. Essas chapas visam garantir que os cursores dos DTs não percam a base de medidas dos deslocamentos laterais no tubo;

- tubos intermediário e interno: empregou-se dois DTs apoiados sobre o tubo externo, posicionados nos furos a 0° e 90° feitos no próprio tubo externo (figura 11.b). Esse posicionamento dos DTs, permite um maior grau de acerto sobre a direção do deslocamento do tubo por dois pontos medidos. Esse deslocamento será subtraído do deslocamento do tubo externo para se obter o deslocamento efetivo.



Figura 11. Montagem dos DTs nos modelos.

As leituras das deformações foram determinadas por meio de extensômetros elétricos de resistência (EERs). Os EERs foram conectados a três cabos condutores, sendo dois deles conectados a um fio condutor. Foram utilizados EER do tipo uniaxial, dispostos nas direções longitudinais posicionados nas extremidades dos perfis nas proximidades das bases. Além de medir as deformações, os EERs também serviram para monitorar o alinhamento do pilar no início do carregamento, onde os quatro EERs posicionados na mesma seção deviam apresentar valores próximos entre si nas etapas iniciais.

Nos modelos compostos por três tubos, as deformações foram medidas através de quatro EERs posicionados em cada extremidade do tubo externo (totalizando oito EERs) e outros dois EERs posicionados em cada extremidade do tubo intermediário (totalizando quatro EERs). A figura 12 apresenta o posicionamento dos extensômetros nos modelos analisados.

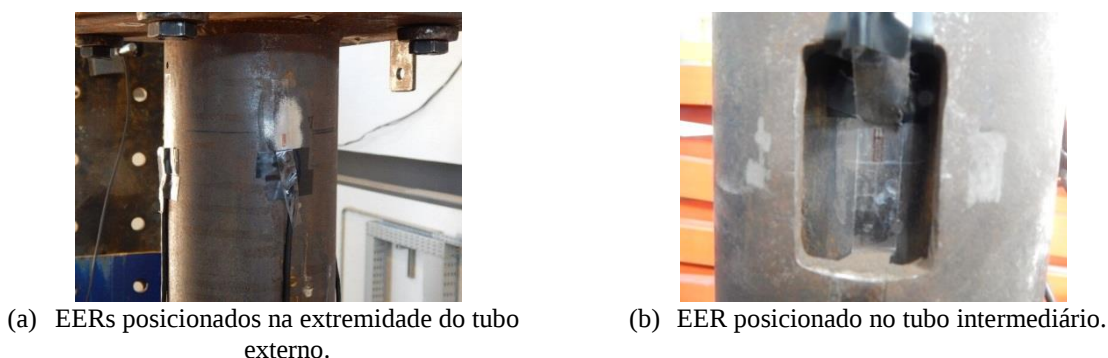


Figura 12. Posicionamento dos EERs nos modelos.

Os tubos externos dos modelos foram fabricados com os devidos furos e aberturas previstas para o posicionamento dos DTs e dos EERs para os tubos internos do modelo idealizados para execução dos ensaios. Portanto, a instrumentação dos modelos foi realizada de modo apropriado.

Um sistema de aquisição de dados Spider 8 600 Hz, modelo SR 30, foi utilizado para coletar os dados dos dispositivos citados, com o *software* Catman 4.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Valores das imperfeições geométricas

As imperfeições geométricas são variações na geometria idealizada de peças estruturais intrínsecos aos processos de fabricação, transporte e montagem. Essas imperfeições influenciam no comportamento estrutural dessas peças quando comprimidas. A sua amplitude é expressa, comumente, por uma fração do comprimento da barra e é limitada conforme as normas de fabricação do perfil estrutural. Em perfis tubulares a norma brasileira ABNT NBR 8261:2010 estabelece que a curvatura máxima resultante de fabricação não ultrapasse o valor de $L/400$.

Para determinar a amplitude da imperfeição dos tubos foi necessário obter a flecha inicial (δ), que é a distância entre a linha reta formada entre as extremidades do tubo com a superfície do tubo no seu ponto central. Neste caso, utilizou o conceito de semelhança de triângulos para definir a flecha teórica (δ_T). Como a variação dessa distância não é linear, a flecha foi calculada pela diferença entre os pontos c' e a flecha teórica. O ponto c' é definido pela diferença entre o ponto C e o menor valor de distância encontrado nas extremidades.

Na figura 13 é apresentado o desenho esquemático para o cálculo da flecha dos tubos, considerando a distância medida no ponto A menor que a medida no ponto B. Assim, na figura 13.a, a curvatura do tubo é definida com o valor negativo e na figura 13.b, com o valor positivo.

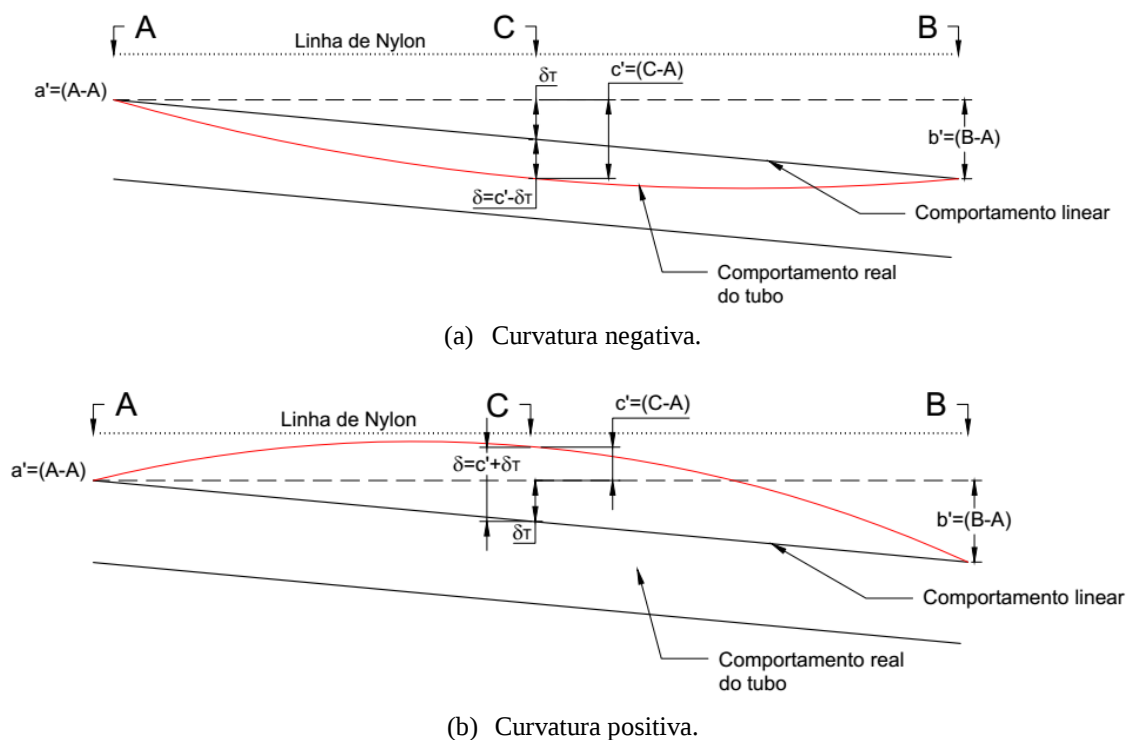


Figura 13. Determinação da flecha dos tubos.

Os valores das flechas obtidos para cada lado dos tubos constituintes de cada modelo são apresentados na tabela 1, juntamente com os valores da amplitude da imperfeição adotada para cada tubo.

Tabela 1. Valores das flechas e das amplitudes referentes a cada tubo do modelo.

Modelo	Eixo	Flecha [mm]			Amplitude			Amplitude Adotada		
		T. Externo	T. Interm.	T. Interno	T. Externo	T. Interm.	T. Interno	T. Interno	T. Externo	T. Interm.
B-F	X	-0.17	-0.38	-0.08	L/21176	L/9474	L/45000			
	X'	1.25	1.09	-0.75	L/2876	L/3294	L/4811	L/2876	L/1797	L/3337
	Y	0.72	-2.00	1.08	L/5012	L/1797	L/3337			
	Y'	0.13	2.00	-0.25	L/27342	L/1797	L/14368			
B-D	X	-0.25	5.63	-0.80	L/14694	L/639*	L/4488			
	X'	0.84	-4.29	0.80	L/4269	L/839*	L/4488	L/1695	L/639*	L/4488
	Y	2.12	0.07	0.62	L/1695	L/49091	L/5822			
	Y'	0.39	3.24	-0.62	L/9153	L/1112	L/5822			
B-L	X	-0.67	0.25	-0.48	L/5387	L/14305	L/7448			
	X'	2.31	0.70	0.48	L/1557	L/5106	L/7448	L/1557	L/5106	L/7448
	Y	-0.18	-0.36	0.23	L/20000	L/10141	L/16000			
	Y'	1.34	0.35	-0.22	L/2697	L/10385	L/16000			

Observa-se que os valores encontrados são, de modo geral, bastante inferiores àquele definido por Grilo (2015), que adotou em sua análise uma imperfeição de $L/1000$, conforme a ABNT NBR 16239:2013. Alguns poucos valores, destacados com asterisco (*), são superiores a $L/1000$.

Pode-se observar ainda, que o sentido das curvaturas iniciais consideradas críticas (maior valor da flecha) em cada tubo da composição dos modelos divergem, a curvatura de todos os tubos não foi posicionada no mesmo sentido durante a fabricação. Entretanto, o modelo B-L é uma exceção, com as curvaturas iniciais de todos os tubos no mesmo sentido (X-X').

4.2 Análise do ensaio de compressão

Na tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios de compressão com os valores de forças de colapso observados experimentalmente. As forças nominais de colapso teóricas foram determinadas conforme o procedimento apresentado no Subitem 2.3, exceto para o modelo sem travamento, para o qual não há uma formulação elaborada. São também mostradas as forças de colapso obtidas por vias numéricas, utilizando o programa ABAQUS 6.17 (Hibbitt *et al.*, 2005), que se baseia no Método dos Elementos Finitos na realização das suas simulações. Nessas simulações, adotou-se os parâmetros e os procedimentos expostos por Grilo (2015).

Tabela 2. Resultados dos ensaios.

Modelo	Tipo de Travamento	Força Nominal de Colapso Teórica - Grilo (2015)	Força de Colapso Análise Numérica - Grilo (2015)	Força de Colapso Experimental	Diferença	
		$N_{u,Teo}$ [kN]	$N_{u,Num}$ [kN]	$N_{u,Exp}$ [kN]	$1 - \frac{N_{u,Num}}{N_{u,Teo}}$	$1 - \frac{N_{u,Num}}{N_{u,Exp}}$
B-F	Fixo	980	949	1080	0.03	0.12
B-D	Deslizante	980	946	1153	0.03	0.18
B-L	Sem Travamento	-	910	1108	-	0.18

A centralização do carregamento inicial foi verificada por meio de oito extensômetros instalados nas extremidades da seção do tubo externo (quatro em cada extremidade), de modo que esses quatro apresentassem valores semelhantes entre si.

Podem ser vistas na figura 14 as respostas dos ensaios experimentais, em termos de força total *versus* deslocamento transversal em cada tubo. O início da instabilidade global dos modelos foi detectado através dos DTs instalados para medir os deslocamentos transversais da seção central dos tubos da composição, quando esses deslocamentos apresentam uma grande variação para um pequeno intervalo de força.

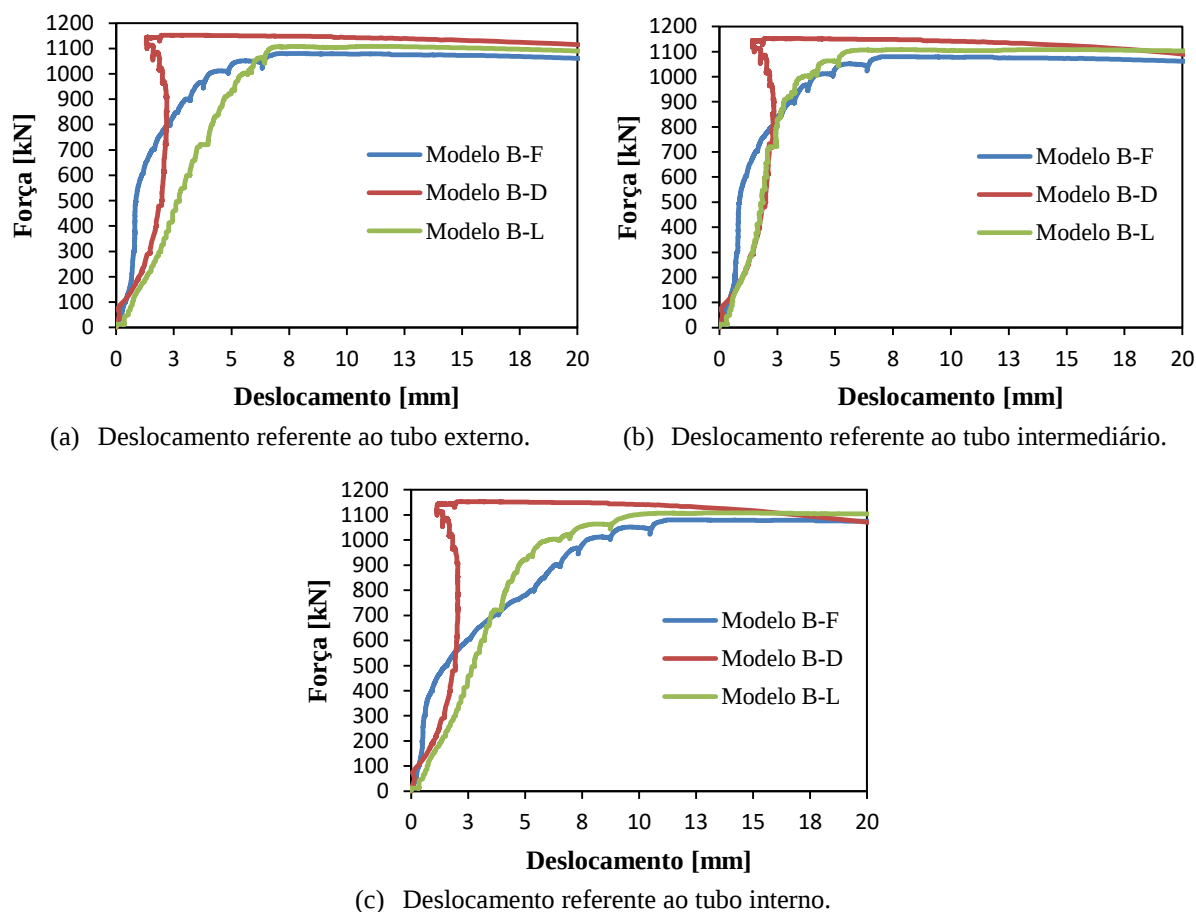


Figura 14. Força total *versus* deslocamento referente a cada tubo da composição.

Na figura 15 são apresentados os gráficos de força total do conjunto *versus* força em cada tubo os modelos ensaiados. A força exercida em cada tubo foi obtida a partir das deformações medidas pelos extensômetros instalados nos tubos externo e intermediário. Para o tubo interno, a força foi determinada pela subtração entre a força total do conjunto e as forças dos outros dois tubos.

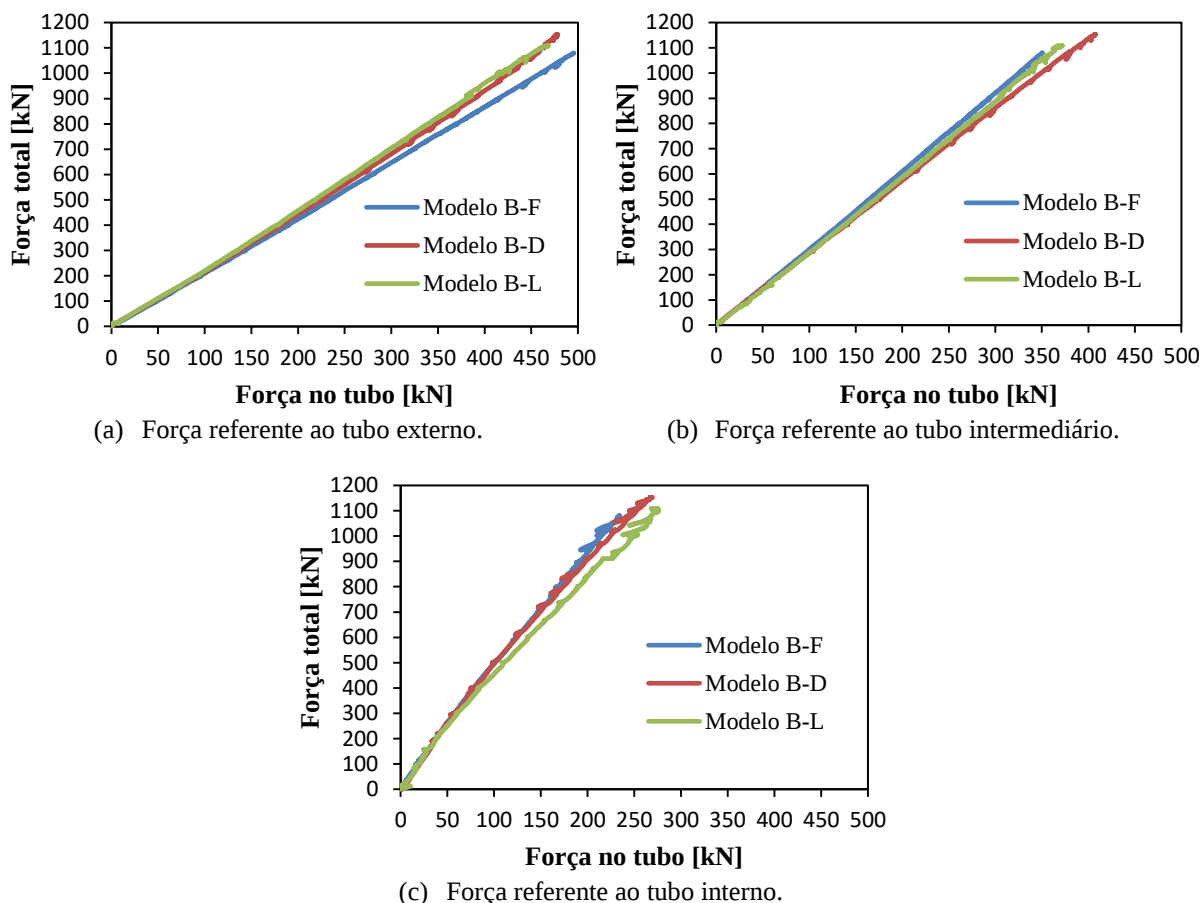


Figura 15. Força total *versus* força em cada tubo das composições.

Na tabela 2, observa-se que as diferenças entre as forças de colapso teórico e numérico são bastante reduzidas, como comprovado por Grilo (2015), sendo aproximadamente 3%. As diferenças de forças de colapso numérico e experimental são um pouco mais elevadas (inferior a 20%), pois na simulação numérica não se levou em consideração as imperfeições da barra em sua real situação.

Também pode se aferir que os modelos possuem valores de forças de colapso próximas entre si, independentemente do tipo de análise. Na análise numérica tem-se uma diferença entre os modelos inferior a 5% e, na análise experimental, inferior a 7%.

Através dos resultados expostos nas figuras 14 e 15 e na tabela 2, observa-se que o modelo B-D apresenta maior força de colapso na análise experimental que os demais modelos, o que pode ser explicado pelas imperfeições, como a geometria da seção transversal, as propriedades do aço e a curvatura inicial, dentre outros fatores. Na análise numérica a maior força de colapso ocorreu nos modelos com travamento (praticamente igual nos modelos B-F e B-D).

É possível ser visto na figura 14.b que os tubos intermediários dos modelos B-L e B-D apresentam nos ensaios comportamentos iniciais semelhantes. Contudo, para uma carga um pouco acima de 700 kN, o tubo intermediário do modelo B-L passou ter comportamento próximo ao do tubo do modelo B-F.

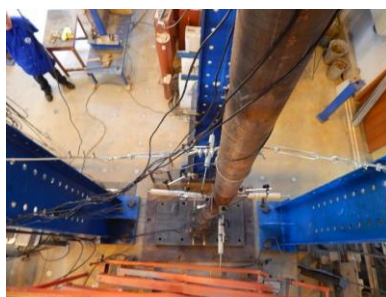
Observa-se na figura 14 que o modelo B-D apresentou uma curva anormal no início da instabilidade, que possivelmente se manifestou por causa de alguma falha na aquisição dos dados do atuador hidráulico ou alguma outra interferência não detectada.

As forças em cada tubo dos modelos foram, de maneira geral, praticamente proporcionais às suas áreas, do início da aplicação das forças até o colapso, como pode ser observado na figura 15.

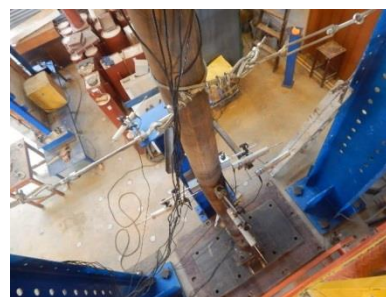
Na figura 16 são mostradas as configurações deformadas dos modelos logo após o colapso, antes do descarregamento. As curvaturas dos modelos B-F e B-L foram diagonais em relação ao flange nos sentidos dos eixos X-Y' e eixos X-Y, respectivamente. Já o modelo B-D apresentou curvatura no sentido do eixo Y-Y'.



(a) Modelo B-F



(b) Modelo B-D



(c) Modelo B-L

Figura 16. Configuração deformada dos modelos.

5 CONCLUSÃO

O estudo experimental do comportamento de perfis tubulares circulares concêntricos compostos é importante para evidenciar sua eficiência quando solicitados à compressão centrada considerando as situações reais.

O método desenvolvido para medição das imperfeições geométricas dos modelos foi inovador atingiu os objetivos desejados. Os dispositivos e a metodologia aplicada para o ensaio de compressão foram suficientes e convenientes para execução dos ensaios de compressão, evidenciando resultados aceitáveis para os modelos ensaiados.

A análise experimental dos modelos de perfis tubulares concêntricos circulares com três tubos resultou em forças de colapso superiores aos valores teóricos.

Pode-se verificar que, nos ensaios realizados, o conjunto com o travamento deslizante forneceu a maior força de colapso, seguido, nesta ordem, pelo conjunto sem travamento e pelo conjunto com travamento fixo, embora as diferenças tenham sido muito reduzidas. Isso pode ser explicado por diversos aspectos que influenciaram os ensaios, como as magnitudes e sentidos das curvaturas iniciais dos três tubos de cada conjunto.

Esses resultados parecem indicar que, em PTCCs com relações geométricas similares às seções transversais dos tubos ensaiados: (a) um mesmo procedimento de projeto possa ser usado para as três condições de ligação entre os tubos, e: (b) não haja necessidade de se efetuar ligação entre os tubos ao longo do comprimento da barra composta, o que simplifica muito o processo de fabricação. Entretanto, se faz necessário um estudo numérico dos modelos analisados experimentalmente para realizar uma análise mais rigorosa do comportamento desse tipo de barra composta.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio e suporte ao desenvolvimento e divulgação desta pesquisa ao CNPq, a CAPES e à FAPEMIG.

REFERENCES

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Perfil tubular, de aço carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. *NBR 8261*, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. *NBR 16239*, 2013.

European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) – Committee 8. *Manual on stability of steel structures*, 2nd Ed. 1976.

Grilo, L. F. *Estudo do comportamento de barras compostas comprimidas formadas por perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

Hibbitt; Karlsson; Sorensen. *ABAQUS/Standard – User's Manual*, USA, 2005.

Law, K. H.; Gardner, L. Lateral instability of elliptical hollow section beams. *Engineering structures*, v. 37, 2012.