

MÉTODO DE ENSAIO DE CISALHAMENTO UTILIZADO EM PILARES MISTOS TUBULARES DE AÇO PREENCHIDOS COM CONCRETO

PUSH TEST METHOD APPLIED IN CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Hermano de Sousa Cardoso¹, Rodrigo Barreto Caldas², Ricardo Hallal Fakury³

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Estruturas. Avenida Antônio Carlos, 6.627 Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

¹Mestre em Engenharia de Estruturas. E-mail: hermanocardoso@yahoo.com.br

²Doutor em Engenharia de Estruturas. E-mail: caldas@dees.ufmg.br

³Doutor em Engenharia de Estruturas. E-mail: fakury@dees.ufmg.br

RESUMO

A Norma Europeia EN 1994-1-1:2004 prescreve um ensaio de cisalhamento padrão para caracterização do comportamento de conectores de cisalhamento (standard push test) aplicável a vigas mistas de aço e concreto. Entretanto, para outros tipos de elementos estruturais, a norma recomenda que sejam realizados ensaios específicos. Na literatura são encontrados diferentes métodos para realização de ensaios de cisalhamento em pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto. Neste artigo é apresentado um método de ensaio de cisalhamento para caracterizar o comportamento de conectores de cisalhamento aplicados nesses pilares que tem por base o ensaio padrão apresentado pela referida norma europeia e leva em conta diferentes procedimentos encontrados na literatura científica. Um exemplo de aplicação do método é apresentado e os resultados demonstram a sua eficiência.

Palavras-chave: Ensaio de cisalhamento, pilar misto preenchido com concreto, conector de cisalhamento, transferência de forças.

ABSTRACT

The European Standard EN 1994-1-1:2004 introduces a standardized push test to characterize the behaviour of shear connectors applied in composite steel and concrete structures. However, when other types of structural composite elements are analyzed, this standard recommends that specific tests should be carried out. In the current literature are found different methodologies for push test performed in concrete-filled steel tube columns elements. In this paper, it is introduced an adapted push test methodology to characterize the behaviour of shear connectors applied in these columns. This methodology is based on the European standardized test and take into account different procedures found in the scientific literature. An example of application of this method is presented and the outputs shows its efficiency.

Keywords: Push test, filled composite column, shear connector, load transfer.

1 – INTRODUÇÃO

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 e normas internacionais, como a europeia EN 1994-1-1:2004 e a norte-americana ANSI/AISC 360-10, nos pilares mistos é necessário que haja interação completa entre o perfil de aço e o concreto. Ainda segundo essas normas, na região de introdução de forças no pilar, deve-se evitar que ocorra escorregamento significativo na interface entre os dois componentes. Para tanto, devem ser utilizados conectores de cisalhamento sempre que a tensão de cisalhamento solicitante de cálculo na interface ultrapassa a tensão resistente de cálculo.

Para caracterizar os conectores de cisalhamento, é necessário a realização de ensaios de cisalhamento. Nesses ensaios, em geral, uma força é aplicada em um dos componentes (aço ou concreto). Assim, essa força deve ser transferida totalmente para o outro componente, no qual é posicionado o apoio. Esse procedimento tem como objetivo obter uma curva de força *versus* deslizamento relativo na interface entre os componentes, da qual se pode extrair a rigidez e a capacidade resistente da ligação proporcionada pelos conectores.

A norma europeia EN 1994-1-1:2004 prescreve os procedimentos do ensaio de cisalhamento padrão (*standart push test*), aplicável aos conectores usados nas vigas mistas de aço e concreto. Nesse ensaio, os conectores de cisalhamento são soldados em perfis I padronizados posicionados entre duas lajes de concreto. Essas lajes são apoiadas na parte inferior e a força é aplicada na parte superior do perfil de aço. A norma estabelece que ensaios de cisalhamento específicos devem ser utilizados para outras situações, como nos pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto (pilares mistos constituídos por um tubo de aço preenchido com concreto, representados pela sigla PMPC).

Na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE-UFG) foi elaborado um método de ensaio de cisalhamento que obedece às diretrizes prescritas pelo ensaio padronizado da norma EN 1994-1-1:2004, porém, adaptadas para se obter uma melhor representação do comportamento dos conectores em PMPC. Esse método, que foi utilizados nos estudos experimentais realizados por Cardoso (2014) e Caldas *et al.* (2014), é descrito neste artigo.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

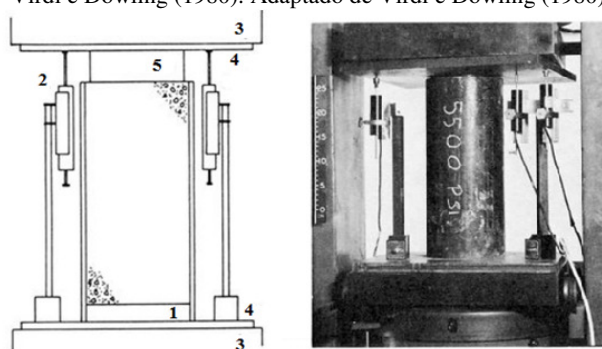
Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica sobre estudos experimentais realizados em PMPC por meio de ensaios de cisalhamento. É importante diferenciar a metodologia utilizada em cada estudo, com destaque para a forma pela qual o carregamento é aplicado, as condições de contorno e a instrumentação utilizada. A escolha correta dos procedimentos é fundamental para que se permita uma análise criteriosa da transferência de forças na interface entre os componentes tubo de aço e núcleo de concreto nos PMPC.

Virdi e Dowling (1980) analisaram as tensões de aderência na interface entre o núcleo de concreto e o tubo de aço em PMPC em modelos experimentais sem conectores de cisalhamento e com o comprimento da interface entre 149 mm e 445 mm. A força foi aplicada sobre o núcleo de concreto, com o auxílio de um bloco cilíndrico de 50 mm de espessura e com diâmetro 12 mm menor do que o diâmetro interno do tubo de aço. A base do tubo de aço foi apoiada sobre uma chapa rígida, e foi deixada uma folga de 37 mm entre a base do núcleo de concreto e a base do tubo de aço, conforme ilustrado na Figura 1.

Para medir os deslocamentos relativos entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, foram utilizados três transdutores de deslocamentos (DT) entre a chapa superior e a chapa inferior. Na primeira etapa dos ensaios, foi aplicada uma força de 10 kN, com posterior descarregamento para eliminar os efeitos das acomodações iniciais devidas às irregularidades da superfície do concreto. Na sequência, a força foi aplicada a uma taxa de 15 kN/min. Inicialmente os deslocamentos foram medidos para os incrementos de 5 ou 6 kN. A partir do momento em que a curva de força *versus* deslizamento começou a mostrar uma mudança acentuada, as medidas foram registradas a cada 2 mm de deslizamento relativo. O ensaio foi interrompido quando atingiu-se o deslizamento relativo próximo de 37 mm, sendo esse valor de deslizamento correspondente ao da folga adotada nestes ensaios. Na Figura 2 é apresentada uma curva típica de força *versus* deslizamento relativo.

Shakir-Khalil (1993a, b) realizou uma série de ensaios de modelos com e sem conectores de cisalhamento. Os conectores analisados foram os pregos Hilti e parafusos grau 4.6. Os pregos Hilti tinham 3,7 mm de diâmetro e 62 mm de comprimento, e os parafusos 12 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. Os perfis tubulares de aço possuíam seções retangulares, circulares e quadradas. Nos modelos que apresentavam comprimentos de 250 mm, 450 mm e 650 mm foi adotada uma folga de 50 mm entre a base do núcleo de concreto e a do tubo de aço (Figura 3).

Figura 1 – Ensaios de cisalhamento em PMPC realizados por Virdi e Dowling (1980). Adaptado de Virdi e Dowling (1980)

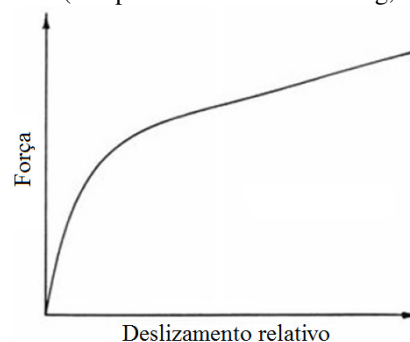


Montagem do corpo de prova

Modelo durante o ensaio

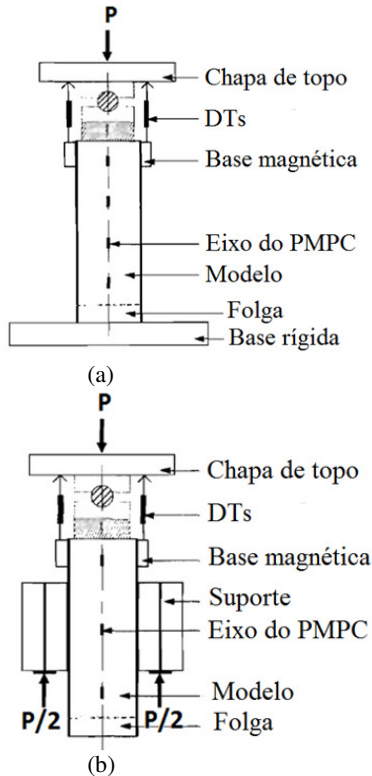
1. Folga (37 mm)
2. Transdutor de deslocamento
3. Equipamento de teste
4. Chapas de carregamento (400x400x18 mm)
5. Bloco circular de carregamento (com diâmetro 12 mm menor que o diâmetro interno do tubo)

Figura 2 – Curva típica de força versus deslizamento relativo (Adaptado de Virdi e Dowling, 1980)



A força foi aplicada sobre o núcleo de concreto, porém com os PMPC apoiados de duas maneiras diferentes, como pode ser observado na Figura 3. No primeiro caso, a extremidade inferior do tubo de aço foi inteiramente apoiada (Figura 3-a). No segundo caso, foram soldados suportes metálicos ou placas de aço que serviam como apoio (Figura 3-b). A distância dos suportes ou das placas de aço até a extremidade superior do tubo variava de acordo com o modelo analisado. Para a medida dos deslocamentos, foram utilizados dois DT entre o tubo de aço e a chapa de topo. Extensômetros elétricos de resistência (EER) foram colados sobre a parede do tubo para a leitura das deformações longitudinais, com o intuito de obter a parcela de força transferida do núcleo de concreto. Em alguns modelos, houve a aplicação de óleo na superfície interna do tubo, para minimizar sua aderência natural com o concreto.

Figura 3 – Ensaio de cisalhamento em PMPC realizados por Shakir-Khalil (1993a, b): (a) tubo de aço apoiado; (b) suportes apoiados. Adaptado de Shakir-Khalil (1993a, b)



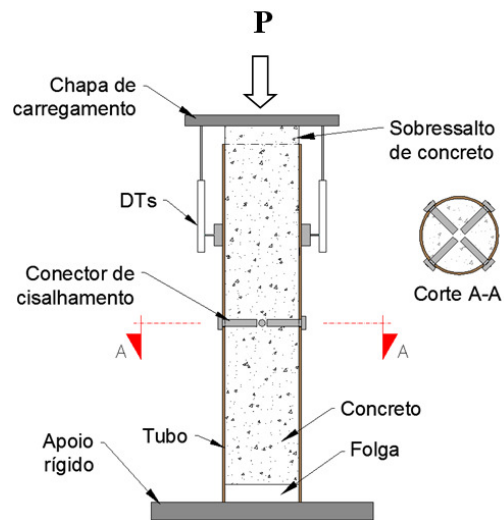
Ribeiro Neto *et al.* (2012) realizaram quinze ensaios experimentais com PMPC compostos por perfis tubulares de 1.000 mm de comprimento e com seções tubulares circulares de 219 mm diâmetro e espessuras de 15,2 mm e 8,2 mm. Esses modelos utilizavam parafusos de alta resistência mecânica como conectores de cisalhamento. Antes da concretagem, foi soldado na extremidade do tubo um complemento do mesmo perfil tubular de 50 mm (Figura 4-a). Os modelos também foram lubrificados internamente para minimizar a aderência natural e o atrito entre o aço e concreto, de modo que o a totalidade da força aplicada fosse transferida pelos conectores. Após a cura do concreto, o complemento do perfil era retirado obtendo-se uma região de sobressalto do concreto no topo dos modelos. A instrumentação e a disposição dos modelos durante os ensaios são representados na Figura 5.

A força foi aplicada sobre a extremidade do sobressalto de concreto e somente o tubo de aço era apoiado (Figura 5). A folga entre esses componentes era situada na extremidade inferior dos modelos (Figuras 4-b e 5). O comprimento adotado para o sobressalto de concreto e para a folga entre o tubo de aço e o núcleo de concreto na região inferior dos modelos foi de 50 mm. Todos os modelos foram instrumentados com dois DT para a medição do deslizamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto. Durante a execução dos ensaios foram aplicados inicialmente cinco ciclos de força e descarregamento com controle de força de 10 kN/min. Os ciclos eram limitados a uma força de 40% da força máxima estimada. Posteriormente, os modelos foram submetidos a uma força monotônica por controle de deslocamento de 0,0025 mm/s.

Figura 4 – Detalhes para se obter uma folga de 50 mm na concretagem (RIBEIRO NETO *et al.*, 2012): (a) complemento do perfil para confecção do sobressalto de concreto; (b) folga na extremidade inferior dos modelos



Figura 5 – Ensaio de cisalhamento em PMPC com conectores parafusos

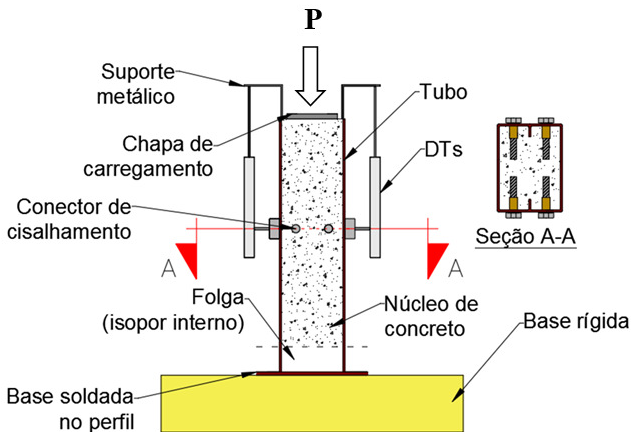


Cardoso *et al.* (2014) realizaram ensaios de cisalhamento em PMPC com conectores constituídos por parafusos com cabeça sextavada e rebite com rosca interna (Figura 6). A seção dos perfis tubulares era do tipo caixa constituída por dois perfis U enrijecidos formados a frio, soldados entre si com solda intermitente. Os modelos tinham altura de 505 mm. A força foi aplicada sobre o núcleo de concreto, com o tubo de aço apoiado em sua extremidade inferior. A folga entre os componentes foi obtida ao colocar-se, antes da concretagem, uma camada de isopor de 50 mm de espessura na base do modelo. A superfície interna do tubo em perfil caixa foi tratada com aplicação de pintura e cera desmoldante, minimizando a aderência e o atrito. Nesses ensaios foram utilizados dois DT entre o tubo de aço e um suporte metálico fixado no concreto (Figura 7). A força foi aplicada conforme as diretrizes do ensaio de cisalhamento padrão da norma EN 1994-1-1:2004, com uma fase inicial de ciclos e, posteriormente, com a força monotônica até o final do ensaio.

Figura 6 – Ensaio de cisalhamento realizados por Cardoso *et al.* (2014)



Figura 7 – Desenho esquemático de ensaios de cisalhamento em PMPC com conectores parafusos e rebites de rosca interna



Tao *et al.* (2016) ensaiaram a cisalhamento 24 modelos com o comprimento entre 600 mm e 1.800 mm, dentre os quais 13 modelos com perfis tubulares circulares e 11 modelos com perfis quadrados. Esses perfis possuíam diâmetro ou lados entre 120 mm e 600 mm, e espessuras entre 3,6 mm e 8 mm. Nesses ensaios foi analisado o comportamento dos PMPC com e sem conectores de cisalhamento, e com e sem um anel interno. Os conectores utilizados foram os pinos com cabeça. Os modelos com anel interno não apresentavam conectores de cisalhamento. As espessuras dos anéis internos eram de 8 mm e 10 mm para os PMPC com seções circulares e quadradas, respectivamente. Nas Figuras 8-a e 8-b são ilustrados alguns dos modelos adotados: um modelo com seção circular e conectores pino com cabeça; e, outro modelo com seção quadrada e anel interno. O esquema dos ensaios é apresentado na Figura 9, com a força aplicada na extremidade superior do núcleo de concreto e com a base do tubo de aço apoiada. O tubo de aço era apoiado sobre um bloco de aço vazado. Essa disposição permitia o deslizamento relativo entre os componentes.

Figura 8 – Modelos de PMPC (TAO *et al.*,2016 – Adaptado): (a) Modelo com seção circular e conectores pinos com cabeça; (b) Modelo com seção quadrada e anel interno (dimensões em mm)

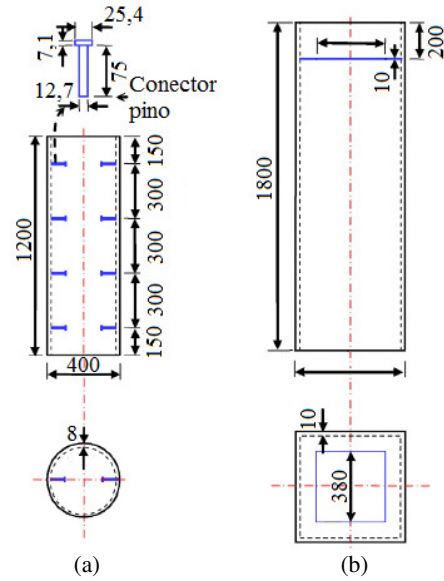
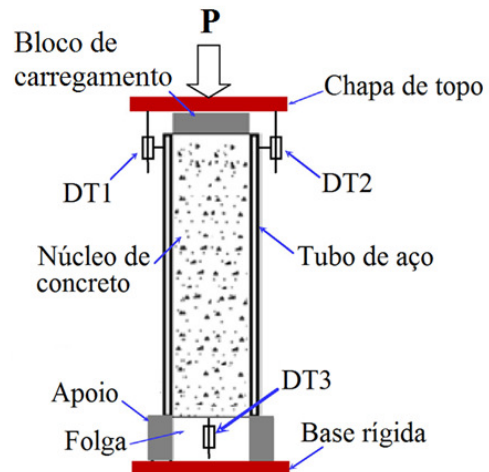


Figura 9 – Ensaio de cisalhamento em PMPC realizados por Tao *et al.* (2016). Adaptado de Tao *et al.* (2016)



Nesses ensaios foram colados EER sobre a parede do tubo de aço ao longo do seu comprimento, igualmente espaçados de 125 mm ou 150 mm. Esses valores de espaçamento eram escolhidos de acordo com a altura dos modelos. A leitura do deslizamento relativo foi obtida com o auxílio de três DT, como pode ser observado na Figura 9. Dois DT mediam os deslocamentos entre o tubo de aço e a chapa de topo usada para a aplicação da força em conjunto com uma outra chapa rígida sobre o concreto. O terceiro DT media os deslocamentos entre a extremidade inferior do núcleo de concreto e a base rígida de apoio. Os modelos foram submetidos a um controle de deslocamento com taxa de 0,3 mm/min até que se alcançasse a força máxima. Posteriormente, a velocidade de aplicação da força era aumentada para uma taxa de 0,6 mm/min.

Na literatura observada, notou-se que é necessário, em ensaios de cisalhamento em PMPC, uma folga entre o tubo de aço e o núcleo de concreto para possibilitar o deslizamento relativo. Para garantir essa folga, os autores

utilizaram diversas estratégias como a utilização de apoios vazados ou a disposição de uma camada de material de resistência desprezável na base do modelo. Observa-se que, na maioria dos estudos, essa folga era de 50 mm.

Observou-se em alguns estudos o tratamento da superfície interna do PMPC com algum tipo de material lubrificante (SHAKIR-KHALIL, 1993a, b; RIBEIRO NETO *et al.*, 2012; CARDOSO *et al.*, 2014). A norma EN 1994-1-1:2004 menciona que para os ensaios de cisalhamento padrão, a interface entre os componentes perfil e concreto deve ser lubrificada minimizando a aderência natural. A aderência natural, se elevada, poderia dificultar a análise de qual parcela de força transferida seria transferida somente pelos conectores de cisalhamento.

Para medir com uma maior facilidade o deslizamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, alguns autores consideraram uma região de sobressalto do núcleo de concreto. Com esse sobressalto encostado na chapa de aplicação da força, permite-se que os DT fixados lateralmente no tubo realizem a leitura do deslizamento relativo. Essa estratégia evita o uso de dispositivos auxiliares, como os suportes metálicos fixados no núcleo de concreto utilizados por Cardoso *et al.* (2014). Contudo, a consideração dos sobressaltos de concreto pode tornar a fabricação dos modelos bastante laboriosa.

3 – DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO PROPOSTO

O método de ensaio de cisalhamento foi desenvolvido considerando os diferentes procedimentos encontrados na literatura, tendo como base o método padronizado pela norma europeia EN 1994-1-1:2004. Deve-se deixar uma folga de pelo menos 50 mm entre o topo do tubo de aço e a extremidade superior do núcleo de concreto, de forma que a

aplicação da força ocorra apenas no tubo de aço. Por outro lado, apenas o núcleo de concreto deve ser apoiado na base. A força deve ser aplicada inicialmente em ciclos e, posteriormente, incrementada até o fim do ensaio.

Para uma melhor caracterização da transferência de forças proporcionada pelos conectores de cisalhamento, a superfície interna do tubo deve ser pintada e lubrificada. Cardoso (2014) analisou a eficiência de três tipos de materiais lubrificantes para o tratamento da superfície interna de PMPC: graxa, óleo e cera desmoldante. A cera desmoldante foi o material que obteve uma maior eficiência em eliminar a aderência natural entre o perfil de aço e o concreto. Dessa forma, para a lubrificação, recomenda-se o uso de cera desmoldante.

Foi desenvolvido um dispositivo de aplicação da força conjugado a um dispositivo auxiliar, fixado diretamente no concreto, de forma a permitir a leitura direta do deslocamento relativo entre o núcleo de concreto e o tubo de aço com o auxílio de DT. A descrição completa do método é apresentada a seguir.

3.1 Descrição do Método de Ensaio

A configuração proposta para os ensaios de cisalhamento em PMPC é mostrada na Figura 10, com um modelo submetido a uma força centrada de compressão sobre a extremidade superior do tubo de aço e com núcleo de concreto apoiado na parte inferior. Uma folga de 50 mm deve ser deixada entre a extremidade superior do núcleo e o topo do tubo de aço, de modo a permitir a aplicação da força apenas nesse tubo. O núcleo de concreto deve ser apoiado em um cilindro com diâmetro menor que o diâmetro interno do tubo de aço para permitir o deslizamento do tubo de aço.

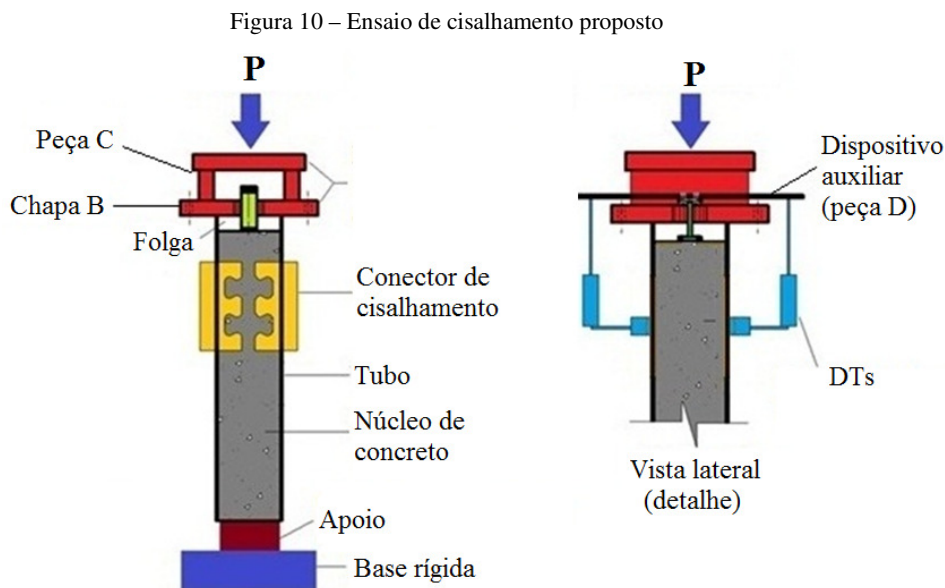


Figura 11 – Detalhes dos dispositivos para aplicação da força (dimensões em mm)

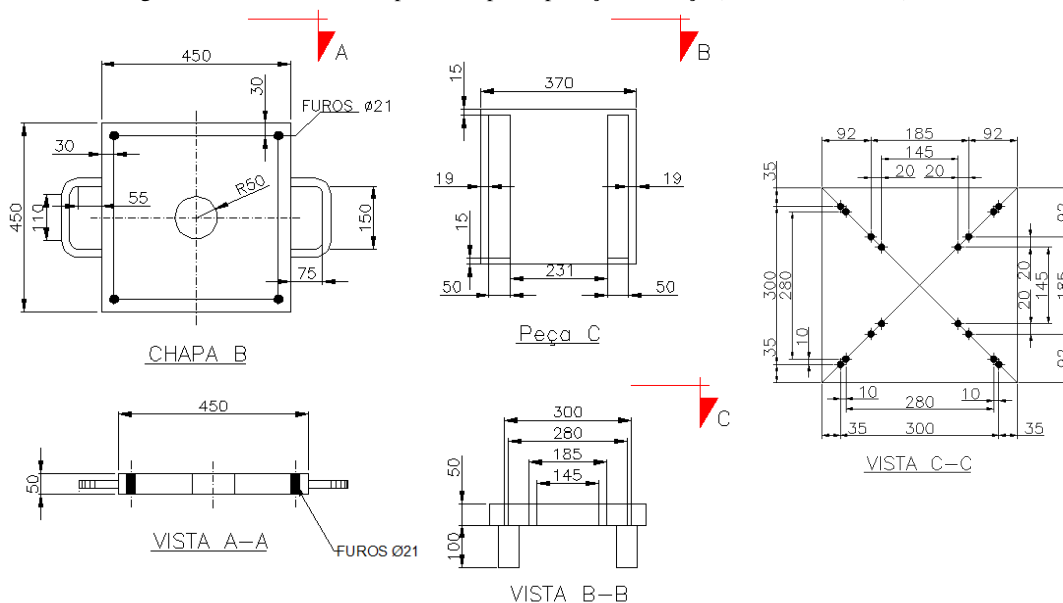
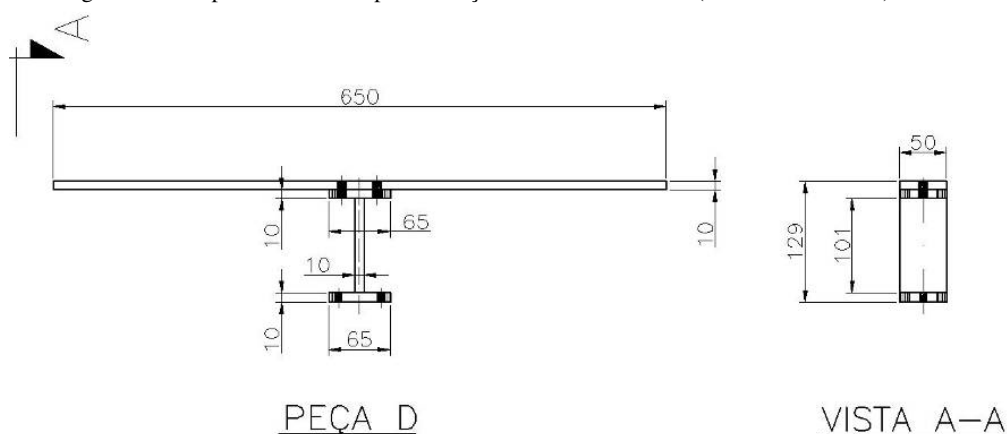


Figura 12 – Dispositivo auxiliar para medição dos deslocamentos (dimensões em mm)



Para aplicação de força no topo do tubo de aço, propõe-se utilizar um dispositivo composto por uma chapa, com espessura de 50 mm, apoiada diretamente nesse tubo (chapa B nas Figuras 10 e 11). No centro dessa chapa, tem-se uma abertura para passagem de um dispositivo auxiliar (peça D na Figura 12), de modo a possibilitar a medição direta do deslizamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto com o auxílio de DT (Figura 10). Sobre a chapa B, é colocada outra peça em forma de π (peça C nas Figuras 10 e 11), para receber a força aplicada pelo atuador. Todas as dimensões dos dispositivos citados são apresentadas nas Figuras 11 e 12.

Na Figura 13 tem-se a sequência da montagem dos dispositivos. No topo do núcleo de concreto é fixado, com o auxílio de buchas e parafusos, um apoio em forma de I (Figura 13-b), cujas dimensões podem ser vistas na Figura 12. Após essa etapa, é centrada, sobre o modelo, a chapa B para a aplicação da força (Figura 13-c). Com o apoio em I

passando pela abertura da chapa, é parafusado, sobre esse apoio, o dispositivo (peça D da Figura 12) que permite a medição dos deslocamentos relativos (Figura 13-d). Por último, é centrada sobre a chapa B, a peça C em forma de π (Figura 13-e).

Para leitura dos deslocamentos utilizam-se transdutores de deslocamentos (DT). As medidas devem ser tomadas entre a meia altura da região de instalação dos conectores e a barra horizontal do dispositivo auxiliar para medição dos deslocamentos (Figura 12). Na Figura 10 são ilustrados os DT que medem o deslizamento relativo entre o tubo de aço e a barra horizontal do dispositivo auxiliar (peça D da Figura 12), que por sua vez está fixada no núcleo de concreto. Sugere-se também a instalação de DT horizontais, em pelo menos duas direções transversais entre si, para verificar a estabilidade do modelo durante o ensaio. Na Figura 14 é ilustrada a disposição desses transdutores.

Figura 13 – Sequência de montagem dos dispositivos usados nos ensaios

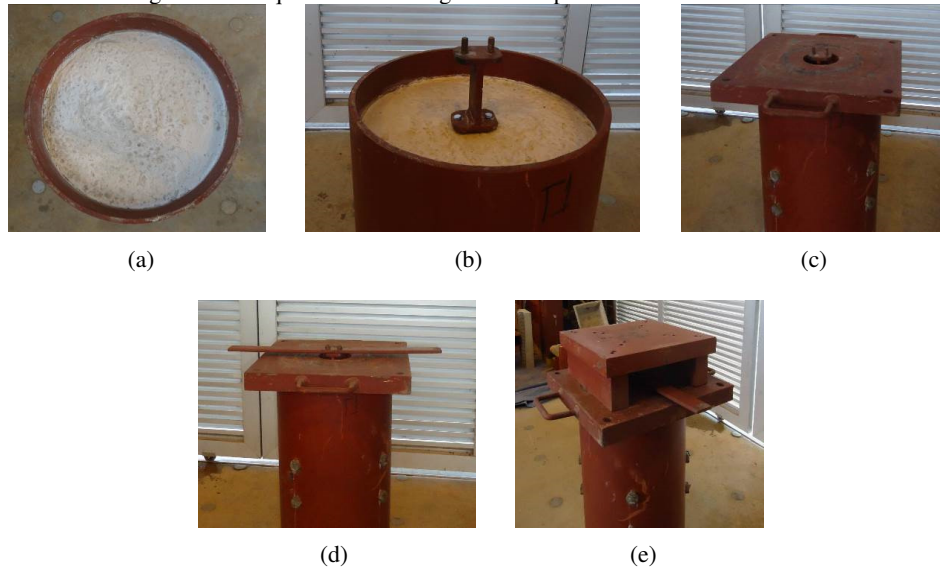
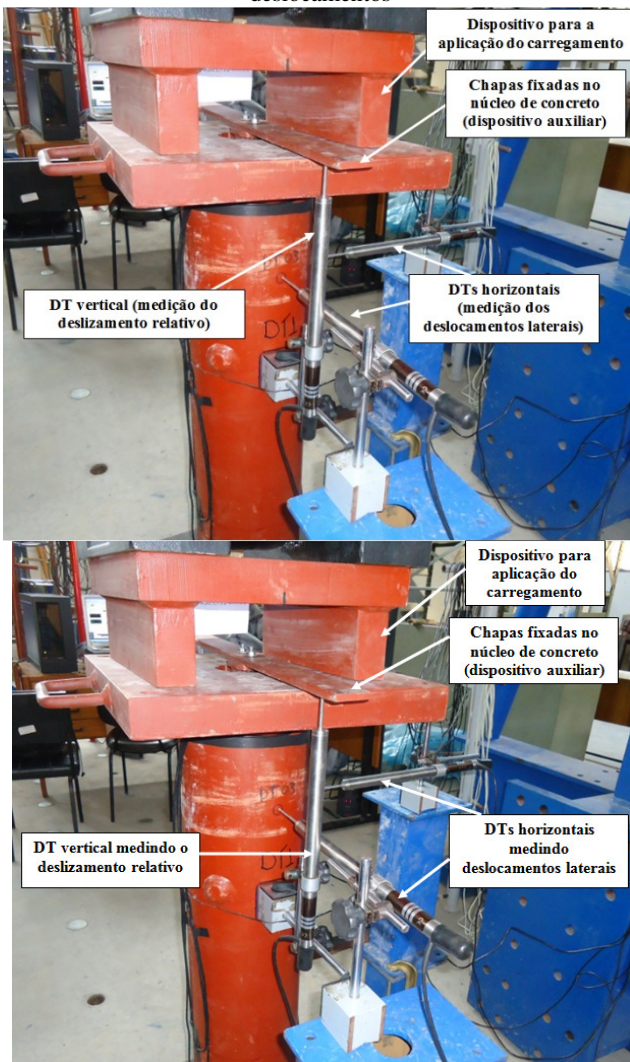


Figura 14 – Instrumentação utilizada para medir os deslocamentos

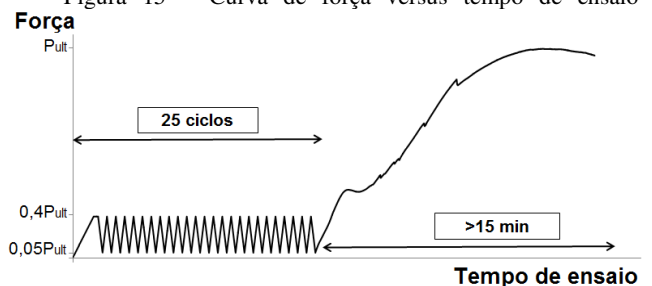


A aplicação da força deve seguir as diretrizes da norma EN 1994-1-1:2004. O carregamento deve ser imposto sob duas fases distintas: uma primeira fase de

aplicação cíclica e uma segunda fase com aplicação monotônica.

Na primeira fase, a força deve ser incrementada até 40% do valor da força máxima esperada, e em seguida deve-se aplicar 25 ciclos de carregamento e descarregamento que variam entre 5% e 40% da força máxima esperada conforme apresentado na Figura 15. Na segunda fase, a aplicação de força deve ocorrer de forma que não aconteça a falha antes de 15 minutos. É importante um controle adequado nesta fase para que a curva de força versus deslocamento possa descrever a parte de decaimento após atingir a força máxima, o que pode ser conseguido com um controle de deslocamento. O deslocamento relativo deve ser medido continuamente durante a aplicação da força ou a cada incremento de força ou deslocamento, até o fim do ensaio.

Figura 15 – Curva de força versus tempo de ensaio



3.2 Exemplo de Aplicação do Método de Ensaio

O método de ensaio de cisalhamento proposto foi utilizado no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da EE-UFGM, em modelos de PMPC com conectores de cisalhamento do tipo parafusos, pino com cabeça e Crestbond. Foi utilizado, para tanto, um atuador com capacidade de 1.500 kN (atuador hidráulico MTS – Series 201 hydraulic actuator – Modelo 70 - com controle de força e de deslocamento) e um atuador hidráulico com capacidade de 3.000 kN (atuador hidráulico Torvel com controle de força). A aplicação da força se deu conforme descrito no subitem anterior. O sistema de aquisição de

dados utilizado foi o Spider 8 da HBM. Na Figura 16 são apresentadas fotos de alguns ensaios realizados.

Um exemplo utilizando o método de ensaio proposto é apresentado na Figura 17. Dois DT são fixados abaixo do dispositivo auxiliar, para a leitura dos deslizamentos relativos. Um terceiro DT é fixado na região inferior, sob a chapa de base (Figura 17a). O modelo de PMPC analisado é composto por tubo circular de aço com as seguintes dimensões: comprimento de 1.000 mm, diâmetro externo de 355,6 mm e espessura de 9,5 mm, com dois conectores do

tipo Crestbond (VERÍSSIMO, 2007; AGUIAR, 2014). O diagrama ilustrado na Figura 17b apresenta duas curvas que descrevem o comportamento do modelo após a fase de ciclos. A curva sólida foi obtida considerando a leitura da força aplicada pelo atuador e a média dos deslocamentos dos dois DT fixados sob o dispositivo. A curva pontilhada foi obtida considerando os mesmos valores de força, porém os deslocamentos foram obtidos com o DT inferior.

Figura 16 – Atuadores hidráulicos e sistema de aquisição de dados



a) Atuador hidráulico MTS



b) Atuador hidráulico Torvel



c) Tela de controle do sistema MTS



d) Bomba manual do atuador hidráulico Torvel

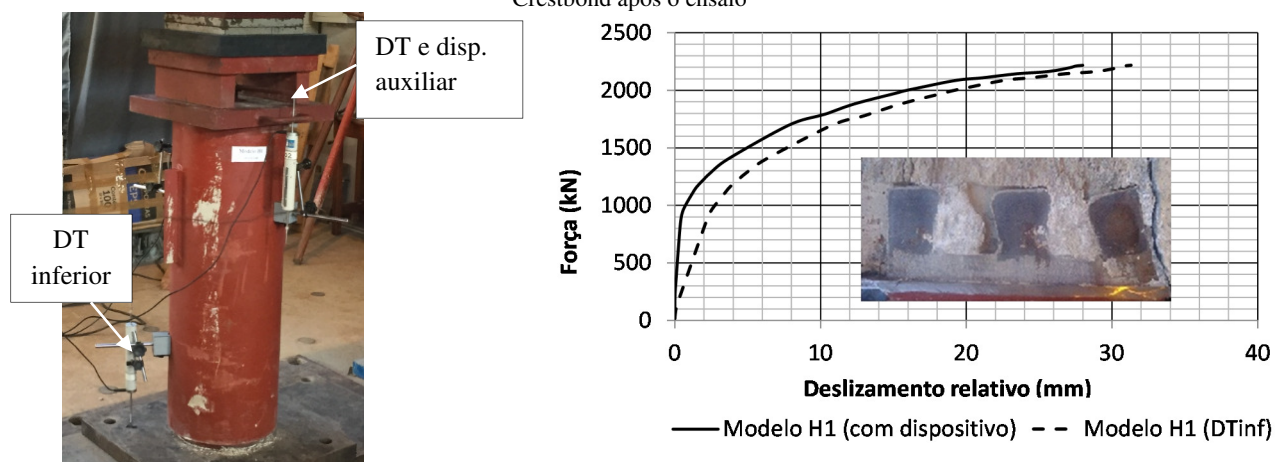


(e) Sistema de aquisição de dados Spider 8



(f) Detalhe da conexão dos cabos

Figura 17 – Exemplo de aplicação: (a) Modelo experimental, (b) Curvas força versus deslizamento e deformação final do conector Crestbond após o ensaio



Como pode se observar, a curva pontilhada, em relação à curva sólida, apresenta um comportamento mais flexível. Isso ocorre devido à presença de imperfeições no modelo e acomodações do concreto e chapas na região do apoio, tornando a rigidez da curva subestimada. Dessa forma, a curva sólida, obtida com o método de ensaio proposto, apresenta leituras mais precisas dos deslizamentos relativos.

Caso fosse adotada uma metodologia de ensaio semelhante às apresentadas nos estudos de Virdi e Dowling (1980), Shakir-Khalil (1993a, b) e Ribeiro Neto *et al.* (2012), as leituras dos deslizamentos também estariam sujeitas à incertezas, pois, nestes estudos os DT são fixados sob a chapa de topo de maneira semelhante à fixação do DT inferior usado neste exemplo.

Análises experimentais e numéricas de conectores Crestbond aplicados em PMPC, que utilizam o método de ensaio proposto neste artigo, são encontradas nos estudos de Aguiar (2015) e Aguiar *et al.* (2015).

CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se um método para ensaio de cisalhamento em pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto, com o objetivo de caracterizar o comportamento de conectores de cisalhamento na transferência de força entre o núcleo de concreto e o tubo de aço. O método tomou por base o ensaio de cisalhamento padronizado pela norma europeia EN 1994-1-1:2004 para conectores em vigas mistas de aço e concreto e levou em conta diferentes procedimentos encontrados na literatura. Para aplicação do método apresentado, foi desenvolvido um dispositivo para aplicação da força e medição do deslocamento relativo.

O método proposto se demonstrou eficiente se comparado com outros métodos descritos na literatura, pois, permite a leitura direta do deslizamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, eliminando a influência de imperfeições e acomodações que podem alterar, principalmente, a rigidez dos modelos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos brasileiros de fomento à pesquisa CNPq, CAPES e FAPEMIG e às empresas Vallourec Tubos do Brasil S.A. e Pórtico Construções Metálicas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, O. P. **Estudo do comportamento de conectores crestbond em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2015.
- AGUIAR, O. P.; CALDAS, R. B., OLIVEIRA, H. M. S.; FAKURY, R. H. Estudo de conectores crestbond em pilares mistos preenchidos com concreto. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 4, n. 3, p. 181-199, 2015.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI/AISC 360-10. Specification for structural steel buildings. Chicago, Estados Unidos da América, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8800**: Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, Brasil, 2008, 237 p.
- CALDAS, R. B.; FAKURY, R. H.; VERÍSSIMO, G. S.; RODRIGUES, F. C.; PAES, J. L. R.; CASTRO E SILVA, A. L. R. Análise teórico-experimental de dispositivos de transferência de cargas em pilares mistos formados por tubos de aço preenchidos com concreto. **Relatório de Pesquisa – Edital FAPEMIG 15/2010 Programa Primeiros Projetos – PPP**, 2014.
- CARDOSO, H. S. **Estudo teórico-experimental de parafusos utilizados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2014.
- CARDOSO, H. S.; RODRIGUES, F. C.; CALDAS, R. B.; CANDELMA, I. Conectores de cisalhamento constituídos

por parafuso e rebite tubular com rosca interna em pilares mistos de aço e concreto com perfis formados a frio. **Sexto Congresso Latino-Americano de Construção Metálica**, São Paulo, Brasil, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings. Bruxelas, Bélgica, 2004.

RIBEIRO NETO, J. G.; SARMANHO, A. M.; SOUZA JÚNIOR, J. B. M.; ARAÚJO, A. H. M. Conector mecânico de cisalhamento em pilar misto de aço e concreto. **XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

SHAKIR-KHALIL. Resistance of concrete-filled steel tubes to pushout forces. **The Structural Engineer**, v. 71, n. 13, p. 230-233, 1993a.

SHAKIR-KHALIL. Push-out strength of concrete-filled steel hollow sections. **The Structural Engineer**, v. 71, n. 13, p. 234-243, 1993b.

TAO, Z.; SONG, T. Y.; UY, B.; HAN, L. H. Bond behavior in concrete-filled steel tubes. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 120, p. 81-93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.030>.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2007. PMCID:PMC2257904.

VIRDI, K. S.; DOWLING, P. J. Bond strength in concrete filled steel tubes. **IABSE Proceedings P33/80**, Zürich, Switzerland, p. 125-139, 1980.