

Experimental evaluation on the structural behavior of truss shear connectors in composite steel-concrete beams

Avaliação experimental sobre o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento treliçados em vigas mistas de aço e concreto



W. C. S. BARBOSA ^a
wallcsb@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0516-0914>

L. M. BEZERRA ^b
lmbz@unb.br
<https://orcid.org/0000-0002-5789-9649>

L. CHATER ^b
latifchater@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5086-6852>

O. R. O. CAVALCANTE ^c
otaviorc@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8565-297X>

Abstract

The composite structures have great advantages in terms of structural and constructive aspects, with the shear connectors being decisive for obtaining the interaction between the structural elements and for the distribution of the stresses in the structure, taking advantage of the potentiality of each constituent material of the composite structure (steel and concrete). This work, through experimental studies, presents the development of a shear connector (Truss connector) proposed for use in a concrete-steel composite beam. The proposed connector is easy to implement and can serve as a viable alternative to the use of stud or U connectors. It was idealized a connector geometry that would provide low production cost, ease of execution, higher values of resistant load, efficiency as regards the relative sliding resistance between the metal profile and the concrete slab, as well as the efficiency regarding the resistance to the spacing of the slabs in relation to the metal profile (uplift). In order to evaluate the behavior of Truss connectors, 6 experimental models were constructed for push-out tests, 3 with 12.5 mm diameter Truss connectors and 3 with 19.0 mm diameter stud bolt connectors. The behavior of the models was investigated with respect to the loads of rupture, the transversal displacements between the concrete slabs and the relative vertical slide between the reinforced concrete slabs and the metallic profiles of the models. The results of the experimental analyzes provided an overview of the operation of the Truss and stud bolt connectors, with significant results that showed advantages of the Truss connector in relation to the stud connector considering the parameters analyzed in this work.

Keywords: composite structures, steel, concrete, shear connectors.

Resumo

As estruturas mistas apresentam grandes vantagens quanto a aspectos estruturais e construtivos, sendo os conectores de cisalhamento determinantes para a obtenção da interação entre os elementos estruturais e para a distribuição dos esforços na estrutura, aproveitando-se de forma efetiva da potencialidade de cada material constituinte da estrutura mista (aço e concreto). Este trabalho, por meio de estudos experimentais, apresenta o desenvolvimento de um conector de cisalhamento (conector Treliçado) proposto para uso em viga mista de aço e concreto. O conector proposto é de fácil execução e pode servir como alternativa viável ao uso dos conectores stud ou U. Foi idealizada uma geometria para o conector que propiciasse baixo custo de produção, facilidade de execução, maiores valores de carga resistente, eficiência quanto a resistência aos deslizamentos relativos entre o perfil metálico e a laje de concreto, bem como a eficiência quanto a resistência ao afastamento das lajes em relação ao perfil metálico (uplift). A fim de avaliar o comportamento dos conectores Treliçados foram construídos 6 modelos experimentais, para ensaios de push-out, 3 com conectores Treliçados de 12,5 mm de diâmetro e 3 com conectores stud bolt de 19,0 mm de diâmetro. Investigou-se o comportamento dos modelos quanto às cargas de ruptura, os afastamentos transversais entre as lajes de concreto armado (uplift) e os deslizamentos verticais relativos entre as lajes de concreto armado e os perfis metálicos dos modelos. Os resultados das análises experimentais proporcionaram uma visão global do funcionamento dos conectores Treliçados e stud bolt, com resultados significativos que evidenciaram vantagens do conector Treliçado em relação ao conector stud considerando os parâmetros analisados neste trabalho.

Palavras-chave: estruturas mistas, aço, concreto, conectores de cisalhamento.

^a Universidade Federal do Piauí, Departamento de Estruturas, Teresina, PI, Brasil;

^b Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, Brasil;

^c Universidade Federal do Ceará; Departamento de Engenharia Civil, Fortaleza, CE, Brasil.

Received: 03 Oct 2016 • Accepted: 16 Mar 2018 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

O desenvolvimento econômico, técnico e científico tem proporcionado o surgimento de grande número de sistemas estruturais, dentre eles tem-se as estruturas mistas de aço e concreto, que demonstram ser eficientes do ponto de vista estrutural e construtivo. Quanto ao aspecto estrutural, pode-se ressaltar o melhor aproveitamento das propriedades de resistência dos materiais, explorando-se de forma efetiva as potencialidades dos materiais constituintes da estrutura mista (Cavalcante, 2010 [1]), obtendo-se desta forma estruturas leves e otimizadas.

Para que a laje e o perfil metálico atuem como uma estrutura mista, é necessária a ligação entre o concreto e o perfil metálico. Para isso são utilizados elementos metálicos, chamados de conectores de cisalhamento, que ficam imersos no concreto e ligados ao perfil metálico. A escolha do tipo de conectores e o seu correto dimensionamento são de grande importância, pois é por meio deles que se determina o grau de interação e a maneira como os esforços são transmitidos entre os materiais (aço e concreto), sendo os estudos experimentais e numéricos de grande valia para a melhor compreensão do comportamento desses conectores e do funcionamento das estruturas mistas que envolvem aço e concreto.

O conector de cisalhamento mais largamente utilizado em vigas mistas é o *stud bolt*, com os critérios de dimensionamento apresentados na ABNT NBR 8800:2008 [2], que mostra também a metodologia de dimensionamento de conectores do tipo “U” para estruturas mistas de aço e concreto. No decorrer do tempo vários conectores de cisalhamento foram desenvolvidos com o intuito de aprimorar a interação entre aço e concreto das estruturas mistas. Os estudos a respeito de conectores de cisalhamento iniciaram-se em 1933 na Suíça, *Swiss Federal Institute for Testing Materials*, em parceria com o projeto chamado Sistema Alpha. O conector analisado era formado por meio de barras circulares com formato helicoidal, denominado conector espiral (Chaves, 2009 [3]).

No Brasil alguns tipos de conectores alternativos têm sido estudados, como é o caso do conector do tipo Crestbond, derivado do conector Perforbond e avaliado experimentalmente por Veríssimo (2007) [4] e do conector de cisalhamento do tipo “V”, desenvolvido e avaliado experimentalmente por Cavalcante (2010) [1].

Pesquisas recentes mostram esforços no meio científico direcionados à compreensão do comportamento de conectores não soldados, como apresentado nos trabalhos de Rehman *et al.* (2016) [5], Dai *et al.* (2015) [6] e Pathirana *et al.* (2015) [7]. Trabalhos recentes também veem abordando o estudo de conectores alternativos desenvolvidos com materiais conhecidos da construção civil, como pode ser observado na pesquisa desenvolvida por Barbosa (2016) [8], onde foram utilizados vergalhões de aço CA50-A no desenvolvimento de novos tipos de conectores de cisalhamento. Na Figura 1 são apresentados os conectores de cisalhamento avaliados nas pesquisas realizadas por Cavalcante (2010) [1], Veríssimo (2007) [4], Rehman *et al.* (2016) [5] e Dai *et al.* (2015) [6].

2. Materiais e programa experimental

Para a avaliação do comportamento dos conectores de cisalhamento Trelçados desenvolvidos neste trabalho foram realizados

Tabela 1

Resultados dos ensaios de resistência do concreto à compressão (ABNT NBR 5739:2007 [10])

Local dos ensaios	Resistência à compressão (fcj)		
	Idade (dias)	Resultados individuais (MPa)	Média (MPa)
UnB - Laboratório de ensaio de materiais (LEM)	28	33,6	34,0
	28	34,2	
	28	34,8	
	28	33,4	

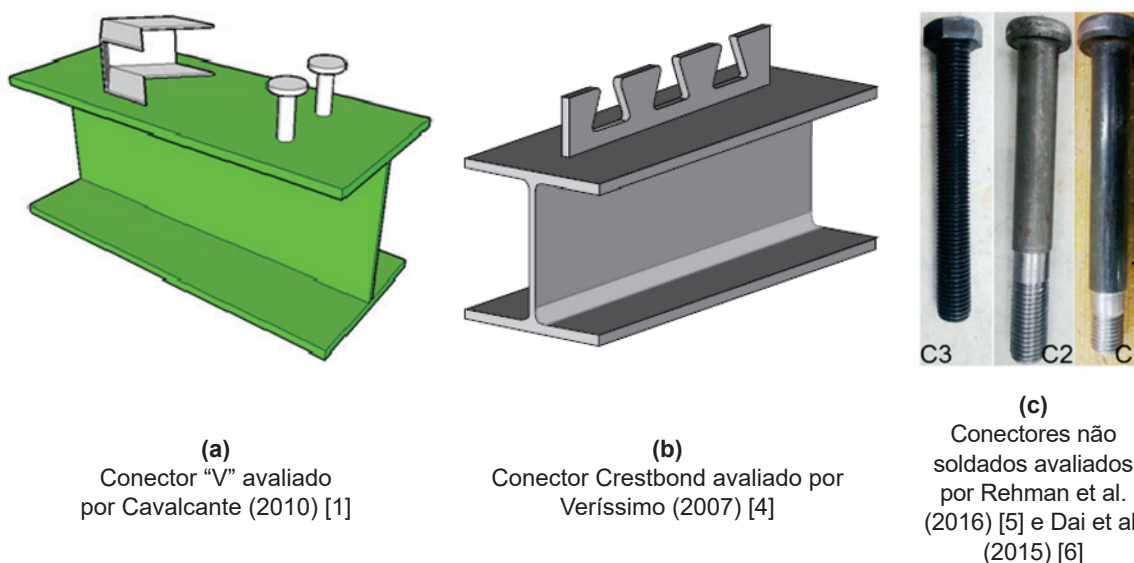


Figura 1

Conectores de cisalhamento alternativos avaliados experimentalmente

Tabela 2

Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto (ABNT NBR 522:2008[11])

Local da moldagem	Idades (dias)	Resultados individuais (GPa)	Média (GPa)
UnB – Laboratório de ensaio de materiais (LEM)	28	26,4	26,0
	28	26,8	
	28	24,8	

Tabela 3

Propriedades mecânicas do aço utilizado nos modelos experimentais (ABNT NBR 6892:2013 [12] e ABNT NBR 7480:2007 [13])

Ø (mm)	f _{ys} (MPa)	ε _{ys} (‰)	f _u (MPa)	E _s (GPa)
10,0	591,6	2,83	663,2	198,4
12,5	595,3	3,07	716,6	195,3
16,0	558,3	2,91	700,6	192,0

ensaios experimentais de *push-out*, de acordo com as prescrições da norma europeia EN 1994-1:2004 [9].

Nos ensaios experimentais de cisalhamento direto (*push-out tests*) foram monitorados os deslocamentos relativos verticais entre o perfil e as lajes de concreto dos modelos, o carregamento aplicado e o afastamento entre as lajes de concreto dos modelos experimentais. Foram realizados também ensaios de caracterização das propriedades dos materiais empregados na construção dos modelos experimentais, como pode ser observado nas tabelas 1, 2 e 3. O conector de cisalhamento proposto nesta pesquisa foi testado por meio de ensaios experimentais de *push-out* realizados na Universidade de Brasília.

2.1 Concepção do conector de cisalhamento treliçado

Os conectores de cisalhamento idealizados nesta pesquisa (conectores Treliçados) são constituídos de vergalhões de aço para

concreto armado, CA-50, dobrado em formato triangular, conforme ilustrado na Figura 2.

Os conectores Treliçados abordados neste trabalho foram idealizados com o objetivo de constituírem uma alternativa viável aos conectores *stud bolt* e “U” preconizados pela ABNT NBR 8800:2008. O potencial inovador dos conectores Treliçados reside na praticidade de construção, na larga disponibilidade de seu material constituinte (Aço CA-50), na resistência mecânica e no atendimento aos parâmetros de deslizamento e *uplift* (separação transversal entre laje e perfil metálico) descritos na EN 1994-1-1:2004 [9].

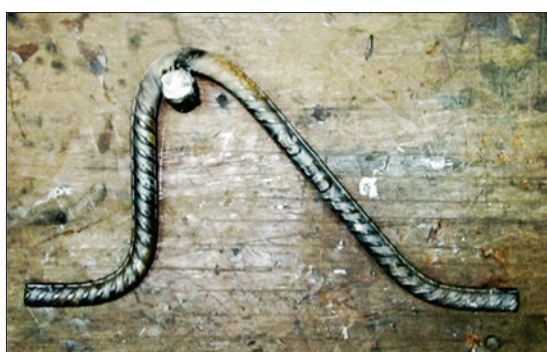
O objetivo foi obter um conector com comportamento análogo ao de um *stud bolt*, apresentado na ABNT NBR 8800:2008 [2], como alternativa para o dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto, tendo, para o conector do tipo Treliçado, uma parte vertical em sua disposição geométrica, posicionada no lugar onde estaria o *stud bolt*. Foram utilizados conectores *stud bolt* de 19,0 mm de diâmetro e ambos os tipos de conectores, Treliçado e *stud*, foram executados com 130 mm de altura.

Para os conectores Treliçados foram soldadas barras de aço CA-50 com 40 mm de comprimento na parte superior de cada conector, para auxílio no combater ao *uplift* (separação entre as lajes e os perfis metálico dos modelos experimentais), assim como a “cabeça” do *stud bolt* faz. A ligação do conector com o perfil metálico foi feita com solda de filete no contato da região curva da barra com a mesa do perfil metálico, conforme as prescrições da Tabela 6 da ABNT NBR 8800:2008 [2], nos trechos horizontais anterior e posterior do conector, paralelos ao eixo do perfil. Foi utilizada solda de arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) e eletrodos do tipo E70, cada cordão de solda foi executado com 35 mm de comprimento.

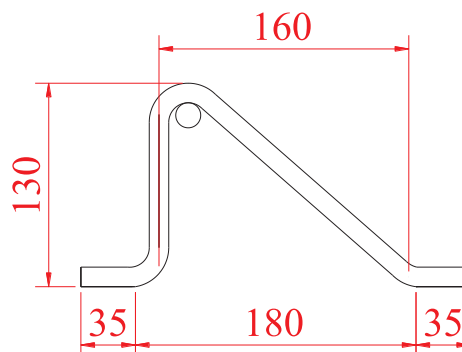
Foram posicionados 8 conectores para cada modelo experimental, sendo cada conector fixado, portanto, de forma independente dos demais.

2.2 Ensaio experimental de push-out

O programa experimental constituiu-se da realização de ensaios de *push-out* de modelos locais. Os modelos são compostos por



(a) Conector treliçado – Ø 12,5 mm



(b) Conector treliçado (dimensões em milímetros)

Figura 2

Detalhes dos conectores de cisalhamento

duas lajes de concreto armado, com f_{cj} igual a 34 MPa (conforme Tabela 1), e um perfil metálico de aço ASTM A 572 grau 50, onde são soldados os 8 conectores de cisalhamento. Foram ensaiados seis modelos de acordo com as prescrições da norma europeia EN 1994-1-1:2004 [9]. Neste trabalho será analisado o comportamento dos conectores Trelçados e *stud bolt* por meio da relação entre as cargas aplicadas com os deslizamentos verticais relativos entre o perfil metálico e as lajes e o *uplift*, além

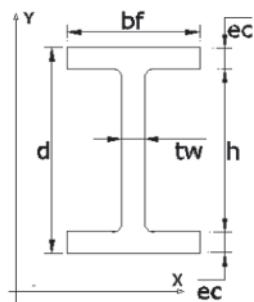
da avaliação da capacidade resistente associada ao emprego dos conectores Trelçados e *stud bolt* estudados nesta pesquisa.

2.2.1 Modelos experimentais

Foram executados 3 modelos experimentais com conectores Trelçados e 3 modelos com conectores *stud bolt*. Para todos os modelos, foram empregadas seções do perfil W250x73, equivalente ao

Medidas	Und
$b_f = 254$	mm
$d = 253$	mm
$h = 225$	mm
$e_c = 14,2$	mm
$t_w = 8,6$	mm

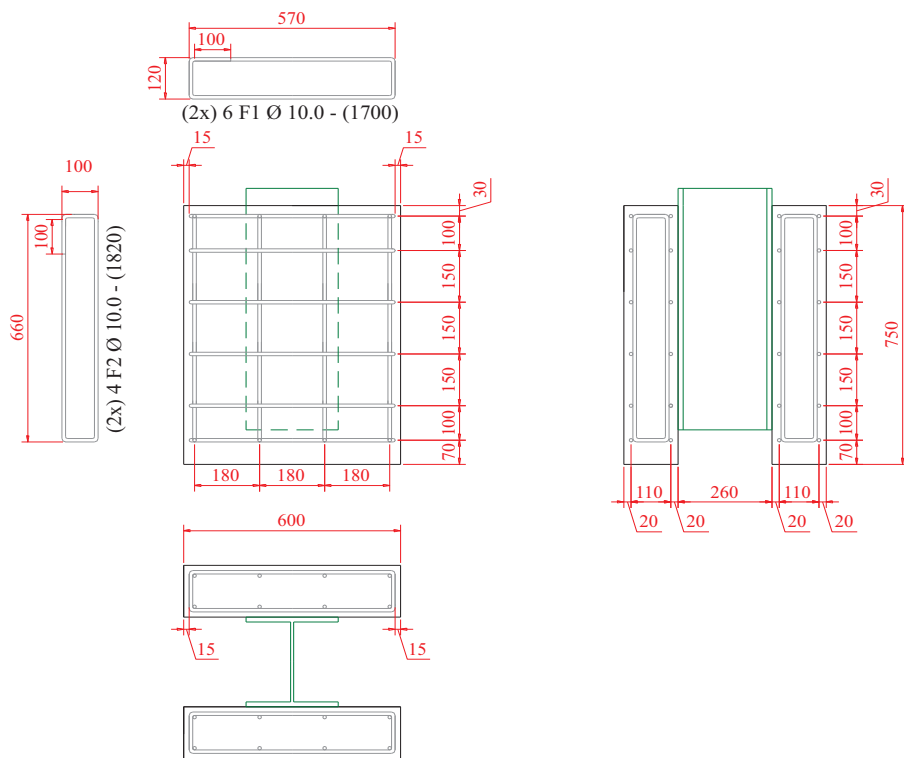
Seção transversal



(a) Dimensões da seção transversal

(b) Perfil utilizado para os modelos experimentais

Figura 3 Perfil metálico W 250x73 adotado para o ensaio *push-out*



(a) Projeto das armaduras das lajes dos modelos



(b) Detalhe das armaduras das lajes dos modelos

Figura 4 Armadura das lajes dos modelos experimentais

Tabela 4
Características dos modelos para ensaios de *push-out*

Tipos de modelos	Nomenclatura dos modelos	Quantidade de modelos	Tipo de conector	Diâmetro (ϕ)
S	S19	3	Stud bolt	19,0 mm
R	R12,5	3	TR - Rectangular triangle truss	12,5 mm

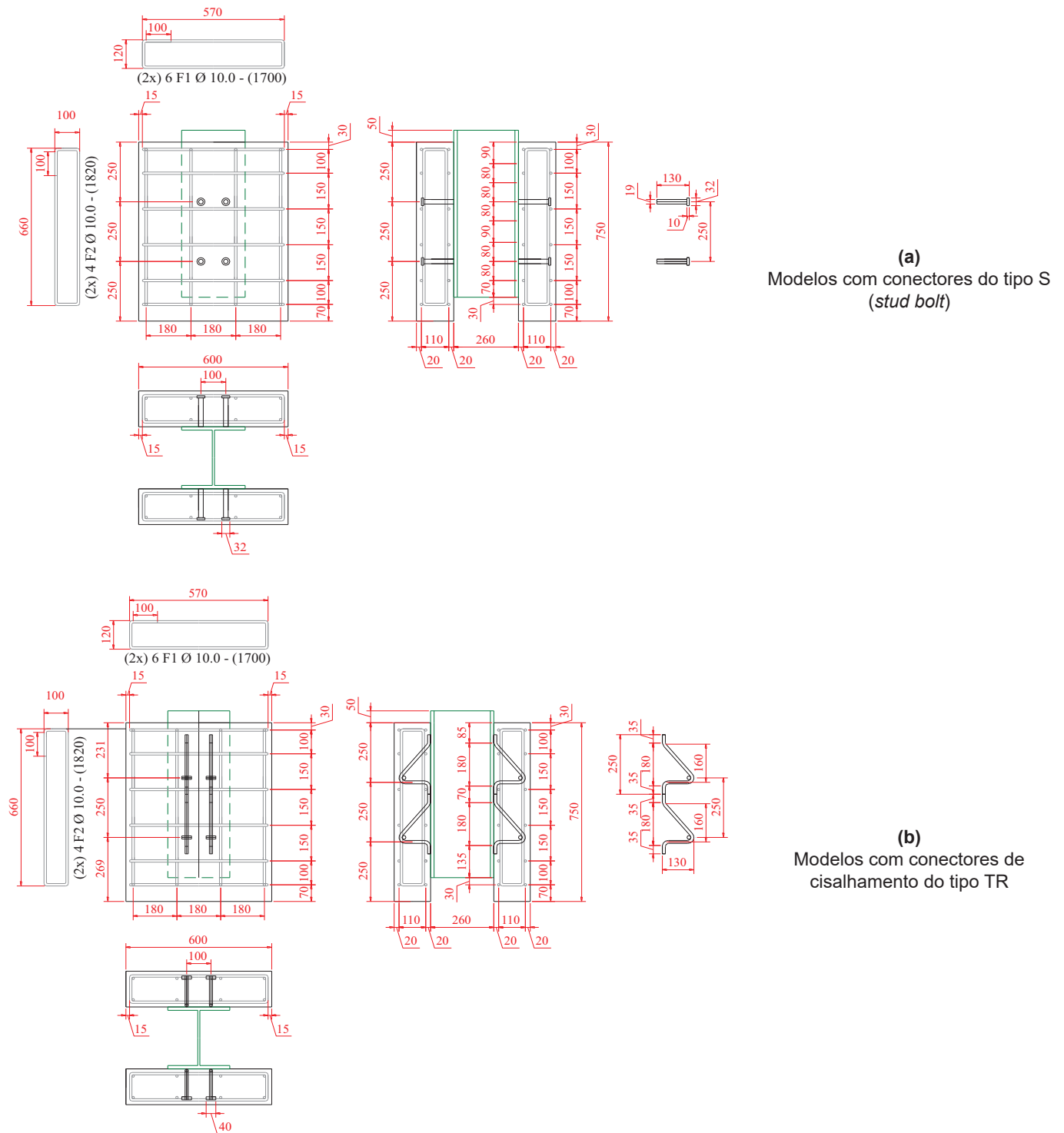


Figura 5
Posicionamento dos conectores de cisalhamento e das armaduras das lajes dos modelos experimentais da segunda concretagem (dimensões em milímetros)

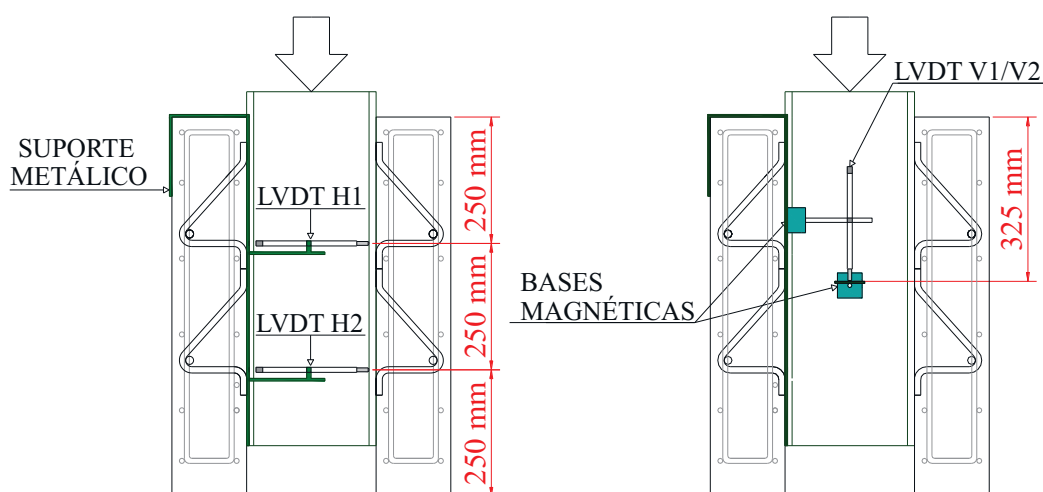


Figura 6
Posicionamento dos LVDTs

HEB 260, o perfil europeu indicado pela norma EN 1994-1-1:2004 [9], conforme ilustrado na Figura 3.

A Tabela 4 apresenta a nomenclatura e detalhes dos modelos locais analisados neste trabalho.

Todos os modelos que constituem o programa experimental desta pesquisa possuem as armaduras das lajes constituídas de barras de aço CA 50 com diâmetro igual a 10,0 mm. A Figura 4 apresenta detalhes das armaduras das lajes para os modelos experimentais avaliados.

Na Figura 5 são apresentados detalhes das dimensões dos modelos e da disposição das armaduras das lajes e dos conectores de cisalhamento. Em relação a norma EN 1994-1-1:2004 [9], pode-se notar que foi feito um acréscimo de 10 cm na altura das lajes dos modelos, para comportar toda a extensão dos conectores.



Figura 7
Posicionamento dos LVDTs horizontais e dos LVDTs verticais nos modelos experimentais

2.2.2 Deslocamentos verticais e horizontais

Os deslocamentos verticais das lajes em relação ao perfil metálico e os afastamentos transversais entre as lajes foram monitorados por meio de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). Os LVDTs foram posicionados conforme a Figura 6. Foram empregados dois horizontais para obtenção do *uplift*, e dois verticais para monitoramento dos deslizamentos dos perfis metálicos em relação às lajes de concreto. Os horizontais foram fixados com auxílio de dispositivos mecânicos (“sargentos”) e bases magnéticas e os verticais foram posicionados por meio de bases magnéticas. As pontas dos dois LVDTs verticais encostavam em chapas metálicas fixadas às bases magnéticas, que por sua vez foram engastadas aos perfis metálicos dos modelos, as pontas dos LVDTs horizontais foram postas em contato direto com a superfície de concreto da laje em posição perpendicular ao eixo vertical dos modelos.

Os LVDTs horizontais foram posicionados na altura dos vértices superiores dos conectores, o superior a uma distância de 25 centímetros da extremidade superior das lajes e o inferior distando 25 centímetros do eixo longitudinal do LVDT horizontal superior dos modelos. Os LVDTs verticais foram posicionados para acompanhar o deslocamento vertical dos perfis metálicos em relação às lajes dos modelos e foram posicionados a uma distância de 325 mm em relação à extremidade superior das lajes de cada modelo. Na Figuras 7 são apresentados detalhes do posicionamento dos LVDTs nos modelos experimentais.

2.2.3 Cargas

Os carregamentos foram aplicados nos perfis metálicos dos modelos experimentais e transmitidos para as lajes pelos conectores de cisalhamento. Os valores das cargas aplicadas nos modelos foram obtidos por meio de uma célula de carga posicionada em linha e acima do atuador hidráulico. As cargas aplicadas foram registradas manualmente para todos os passos de carga aplicados e depois relacionadas com os valores de deslocamentos verticais e *uplift* para cada modelo ensaiado.

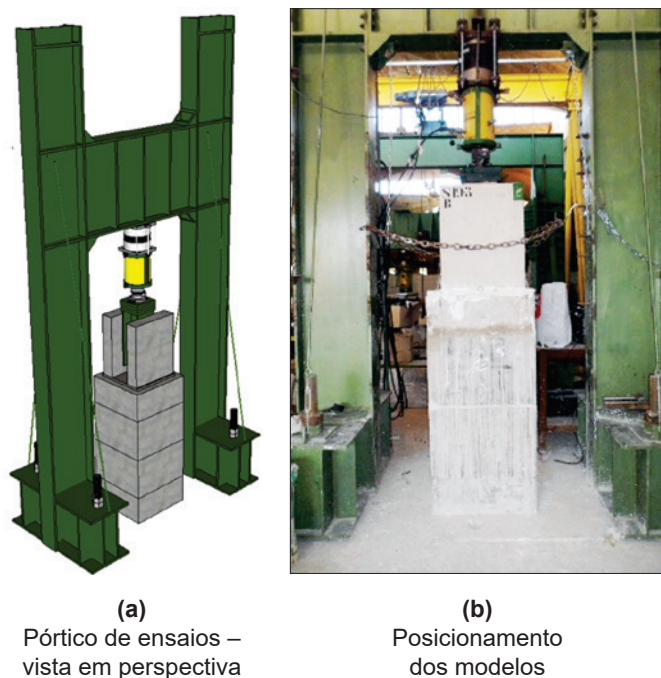


Figura 8
Sistema de ensaios utilizado para os modelos de *push-out*

2.2.4 Montagem do ensaio

O pórtico de ensaios do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília com capacidade de carga compatível com o experimento *push-out* tem altura de 3,55 metros, enquanto os modelos possuem 80 cm de altura. Para

possibilitar a aplicação de carga nos modelos, foram empilhados blocos de concreto, assentados sobre camadas de gesso, para promover um contato uniforme entre as superfícies, além de corrigir eventuais diferenças de nível (Cavalcante, 2010 [1]). Sobre o último bloco foi posicionada uma chapa de aço e sobre esta o modelo a ser ensaiado, sendo ambos posicionados também sobre camadas de gesso pelo mesmo motivo citado anteriormente. Foram utilizadas correntes envolvendo as lajes dos modelos com o objetivo de impedir a queda das lajes no momento da ruptura. Na Figura 8 são apresentados detalhes do sistema de ensaios utilizado, com o posicionamento dos modelos, do atuador hidráulico e da célula de carga na estrutura de reação.

2.2.5 Sistema de aquisição de dados

Os valores de deslocamentos obtidos através dos LVDTs foram registrados para cada passo de carga com o auxílio de módulos de aquisição de dados Spyder-8, e o *software* de aquisição de dados utilizado foi o Catman versão 4.5. O fabricante é a empresa alemã HBM (hottinger Baldwin Messtechnik GmbH). Os dados foram armazenados no computador mostrado na Figura 9(a), que também mostra os módulos Spyder-8. Dos módulos constantes na imagem, um com 8 canais foi utilizado, para os 4 LVDTs utilizados em cada ensaio.

A aquisição de dados de carregamento foi feita com a leitura direta dos valores em um painel digital e anotação manual; foram registrados os valores de carga na ruptura e imediatamente depois por meio de filmagens realizadas para todos os ensaios de *push-out*. O painel apresenta os valores de carregamento obtidos com a célula de carga a que está conectado, com capacidade de registros de carga de até 2000 kN. A célula de carga foi posicionada entre o atuador hidráulico, que transfere a carga para o modelo, e a viga do pórtico de ensaios, que fornece a reação à força gerada pelo atuador. A Figura 9(b) ilustra essa montagem.

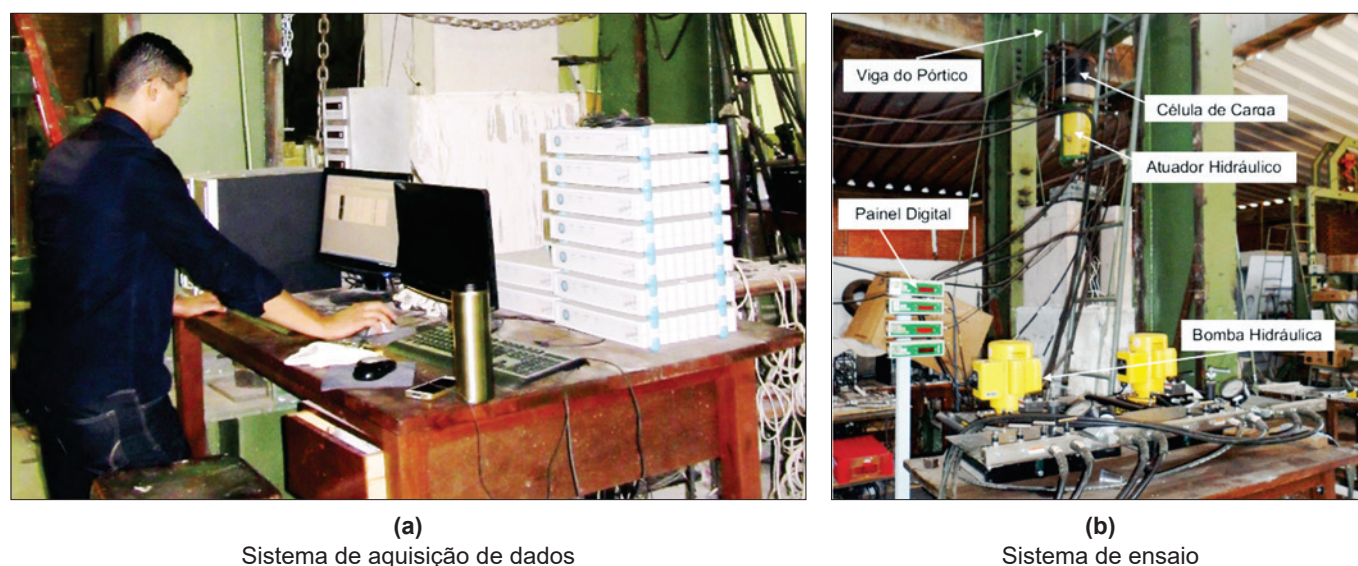


Figura 9
Sistema de aquisição dos dados e bombas hidráulicas para aplicação da carga

O carregamento foi aplicado através da bomba hidráulica elétrica mostrada na Figura 9(b). Essa bomba permite a aplicação da carga com controle de força, que é mostrada no painel digital.

3. Resultados e discussões

3.1 Ensaio de push-out

Os modelos executados com conectores de cisalhamento *stud*

bolt e Treliçados (constituídos de barras dobradas de aço CA-50 com diâmetro de 12,5 mm) foram submetidos a ensaios experimentais de *push-out*, no intuito de averiguar as potencialidades dos conectores Treliçados propostos neste estudo e estabelecer uma análise comparativa dos resultados de deslocamentos com os modelos com conectores *stud*.

Os ensaios de *push-out* foram conduzidos considerando os procedimentos descritos na norma europeia EN 1994-1-1:2004 [9], aceita como padrão internacional para avaliação de novos conectores

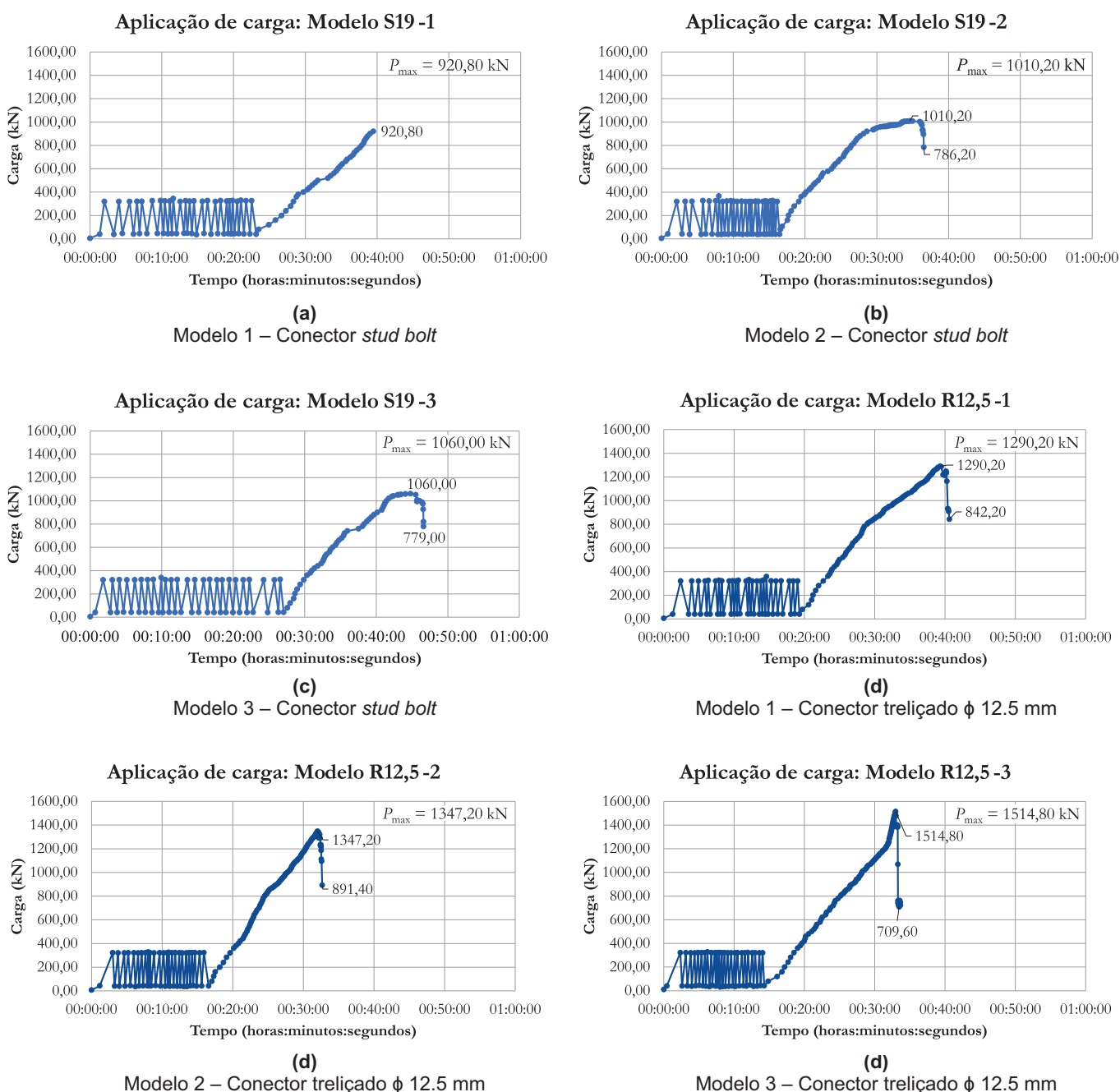


Figura 10
 Aplicação de carga pelo tempo para os modelos experimentais ensaiados

Tabela 5

Cargas de ruptura para todos os modelos ensaiados

Modelo	P_{\max} total (kN)	P_{med} total (kN)	P_{cmax} conector (kN)	P_{cmed} conector (kN)	P_d (kN)
SR19-1	920,80		115,10		
SR19-2	1010,20	997,00	126,28	124,63	58,79
SR19-3	1060,00		132,50		
R12,5-1	1290,20		161,28		
R12,5-2	1347,20	1384,07	168,40	173,01	87,50
R12,5-3	1514,80		189,35		

de cisalhamento em vigas mistas de forma econômica, rápida e confiável.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com os ensaios de *push-out* para os modelos experimentais construídos.

3.1.1 Cargas de ruptura e resistência de projeto

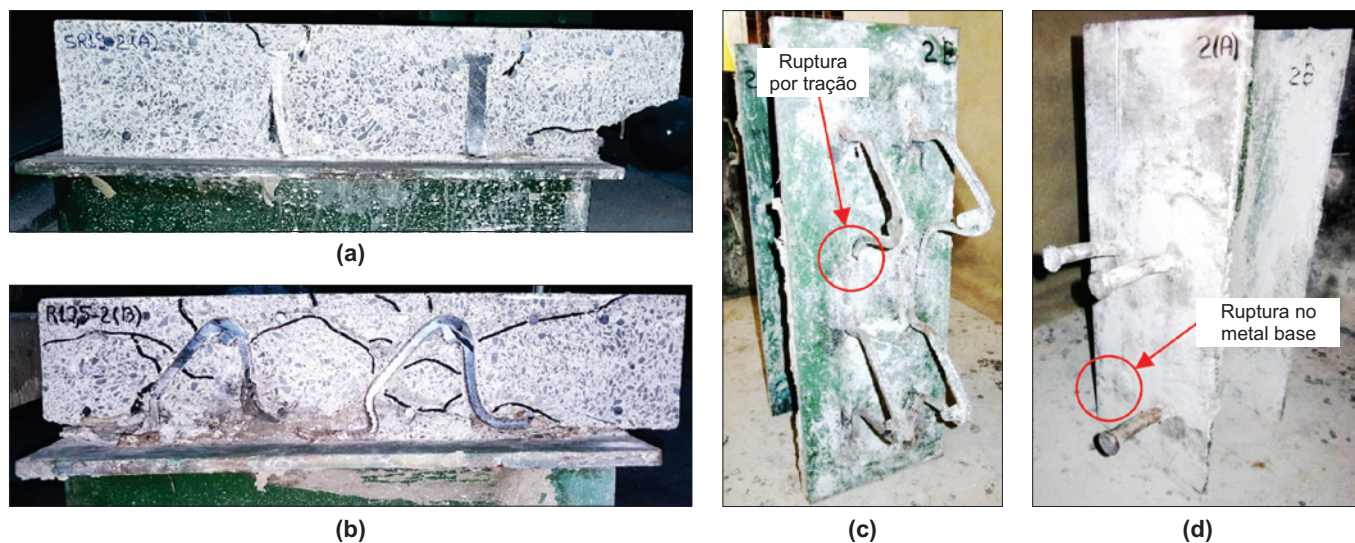
O carregamento foi aplicado nos modelos experimentais, por intermédio de um atuador hidráulico ligado a uma bomba hidráulica e posicionado em linha com uma célula de carga, seguindo-se as recomendações da norma europeia EN 1994-1-1:2004 [9]. Foram aplicados inicialmente 25 ciclos de carregamento nos modelos com carregamento variando de 40,0 kN a 320 kN para todos os modelos, o que representa 5% e 40% da carga de ruptura estimada para os modelos experimentais ensaiados que foi de 800 kN para os conectores Trelaçados e *stud bolt*, carregamentos estes obtidos em estudos numéricos realizados através do programa ANSYS versão 14.5. Na Figura 10 são apresentados detalhes da aplicação de carga nos modelos experimentais durante os ensaios, onde P_{\max} é o valor de carga máxima alcançada para cada modelo ensaiado.

De acordo com as recomendações da EN 1994-1-1:2004 [9] os modelos experimentais devem ser levados à ruptura após o 25º ciclo de carregamento, em tempo não inferior a 15 minutos, a partir do valor de 40% da carga de ruptura estimada (320 kN), o que foi realizado para os seis ensaios experimentais de *push-out*. O monitoramento dos valores de deslocamento não foi possível para a fase de decréscimo de 20% da carga máxima no modelo S19-1, com conectores *stud bolt*, conforme pode ser constatado na Figura 10(a), pois a ruptura para esse modelo foi abrupta, com queda repentina do carregamento atuante.

Na Tabela 5 são apresentados os valores das cargas de ruptura para todos os modelos ensaiados.

As cargas de ruptura obtidas nos 6 ensaios foram superiores ao valor estimado de 800 kN para a configuração de conectores adotada. Os ensaios foram considerados válidos, sem a necessidade de se ensaiar modelos adicionais, tendo em vista a exigência de que os 3 valores de carga máxima P_{\max} não difiram em mais de 10% da média dos resultados de carga de ruptura para os modelos com configuração idêntica.

A EN 1994-1-1:2004 [9] apresenta uma expressão, equação 1,


Figura 11

Análise dos modelos experimentais após a ruptura: (a) Corte longitudinal da laje A do modelo S19-2, (b) Corte longitudinal da laje B do modelo R12,5-2, (c) Modelo R12,5 – Laje B após demolição do concreto e (d) Modelos S19-2 – Laje A após a demolição do concreto

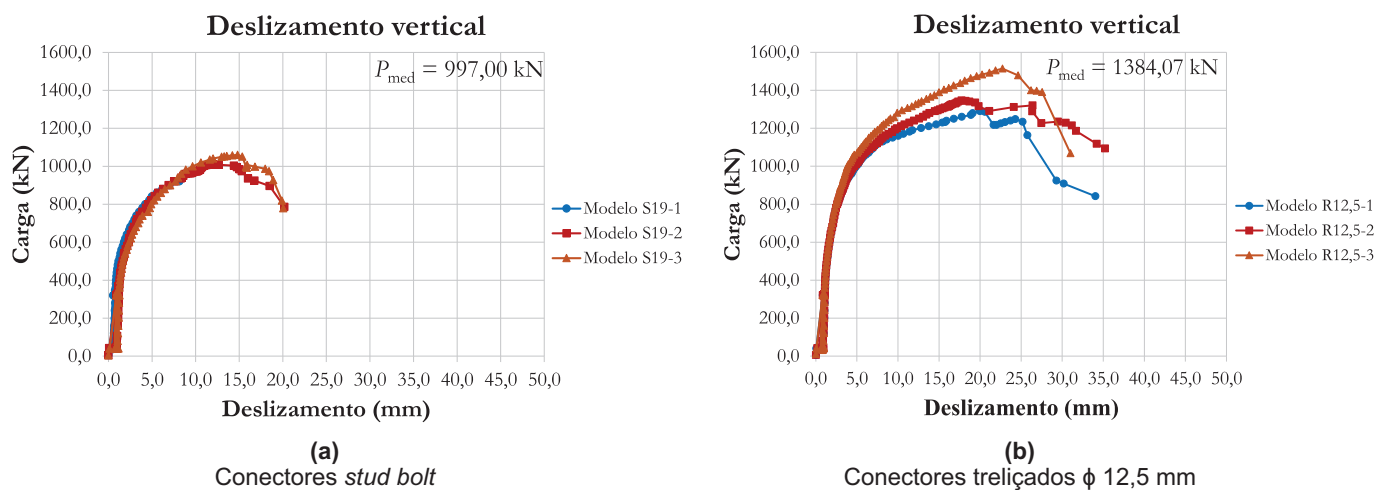
**Figura 12**

Gráfico de deslizamento vertical médio pela carga para os modelos ensaiados

para cálculo da resistência de projeto dos conectores de cisalhamento avaliados por ensaios de *push-out*.

$$P_{Rd} = \frac{f_u \cdot P_{Rk}}{f_{ut} \cdot \gamma_v} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_v} \quad (1)$$

onde:

f_u é a mínima resistência à ruptura do material constituinte do conector;

f_{ut} é a resistência real de ruptura do material constituinte do conector;

P_{Rk} é o menor valor de carga de ruptura dos modelos ensaiados (dividido pelo número de conectores) reduzido em 10%;

γ_v é o coeficiente parcial de segurança; o valor recomendado pela EN 1994-1-1:2004 [9] é igual a 1,25.

A carga resistente de projeto obtida por meio da equação 1 é para um conector de cisalhamento. Utilizando-se a equação acima, foram obtidos os valores de cargas resistentes de projeto de 58,79 kN para um conector *stud bolt* e 87,50 kN para um conector Treliçado de 12,5 mm de diâmetro. Cada modelo do ensaio de *push-out* foi executado com 8 conectores, portanto a resistência de projeto para os modelos com conectores *stud bolt* é de 470,32 kN e de 700 kN para os modelos com conectores Treliçados.

Assim como observado em Cavalcante (2010) [1], a ruptura dos conectores *stud bolt* ocorreu no metal base próximo à região

da solda, porém sem haver falha na própria solda, conforme determina a AWS D1.1/D1.1M (2015) [14], havendo o destacamento de uma das lajes de cada modelo ensaiado. Nos modelos com conectores Treliçados não foi observada falha na solda dos conectores. A ruptura dos conectores Treliçados ocorreu por tração em uma das hastes dos conectores, não havendo destacamento das lajes dos modelos. A coesão das partes dos modelos (lajes e perfis metálicos) foi garantida por uma haste de cada conector Treliçado, que permaneceu íntegra após os ensaios experimentais. Nos conectores Treliçados as rupturas se deram nas hastes verticais, na região próxima ao plano de cisalhamento entre laje e mesa dos perfis metálicos. Na Figura 11 são apresentados detalhes dos modos de ruptura observados nos modelos experimentais.

3.1.2 Deslizamento vertical

Os deslizamentos verticais relativos entre o perfil metálico e as lajes de concreto dos modelos foram acompanhados durante os ensaios experimentais de *push-out* por meio de dois LVDTs posicionados de forma simétrica em relação à alma do perfil metálico dos modelos, estes LVDTs receberam a denominação de LVDT V1 e LVDT V2. Os valores médios de deslocamentos verticais registrados pelos LVDTs V1 e V2 são apresentados na Figura 12.

Tabela 6

Classificação dos conectores de acordo com a ductilidade

Tipo de conector	Modelo	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)	Classificação EN 1994-1-1:2004 [9]	Modo de ruptura
<i>Stud bolt</i>	SR19-1	-	-	-	Ruptura na região do metal base
	SR19-2	17,50	15,75	Dúctil	
	SR19-3	18,60	16,74	Dúctil	
Treliçado ϕ 12,5 mm	R12,5-1	25,75	23,18	Dúctil	Ruptura da haste vertical dos conectores e ruptura do concreto
	R12,5-2	27,40	24,66	Dúctil	
	R12,5-3	27,90	25,11	Dúctil	

Com os dados de deslizamento entre perfil metálico e laje de concreto realizou-se o procedimento para classificação dos conectores analisados quanto a sua ductilidade, considerando os resultados do gráfico carga x deslizamento para os modelos, onde foi possível realizar a redução de carga em 20% após alcançada a

carga máxima do modelo experimental. Esse procedimento consiste em obter a carga resistente característica P_{uk} , 10% menor que a carga máxima e seu deslizamento vertical correspondente pelo gráfico, (δ_u). Segundo a EN 1994-1-1:2004 [9] os conectores dos modelos de *push-out* que conduzirem a valores de desliza-

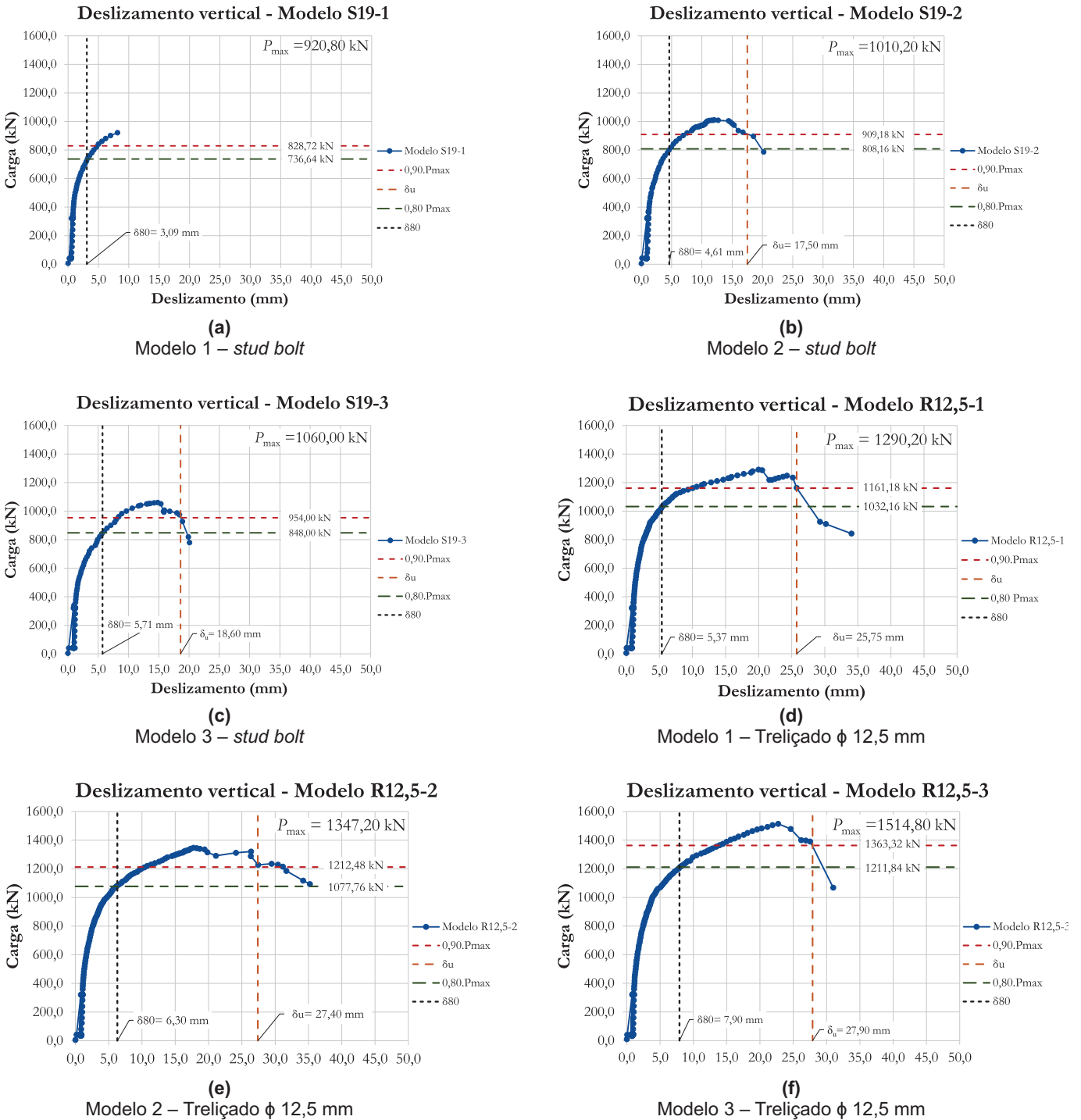


Figure 13

Average curves: vertical displacement vs applied load for the specimens tested for the calculation of the characteristic vertical-displacements (slip)

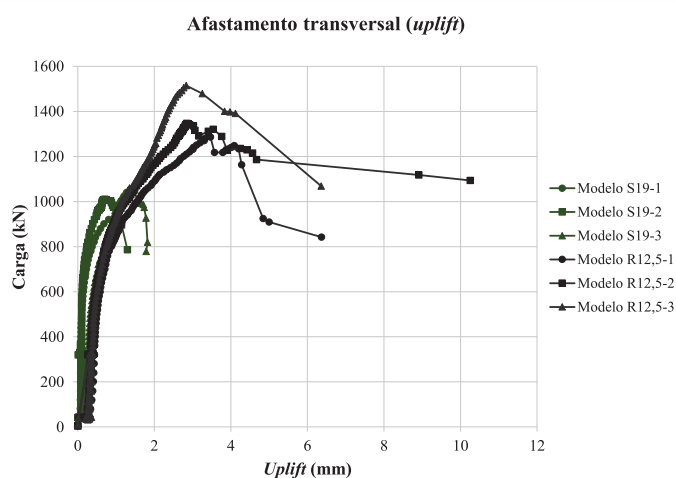


Figura 14
Gráfico de separação transversal (*uplift*) média pela carga para os seis modelos ensaiados

mento característico ($\delta_{uk} = 0,9 \cdot \delta_u$) maiores que 6,0 mm são classificados como dúcteis, se os valores de δ_{uk} forem menores que 6,0 mm os conectores ensaiados são classificados como não dúcteis. Os conectores *stud bolt* e Trelaçados de 12,5 mm de diâmetro apresentaram valores de δ_{uk} maiores que 6,0 mm e podem ser classificados como dúcteis. Segundo a norma EN 1994-1-1:2004 [9] os conectores dúcteis podem ser considerados com comportamento plástico ideal, com deformação plástica e boa distribuição de esforços entre os conectores para cargas de serviço. Na Figura 13 são mostrados os valores de δ_u e δ_{80} obtidos, respectivamente, para 90% e 80% da carga de ruptura de cada modelo e na Tabela 6 são mostrados os valores calculados de δ_{uk} e a classificação dos conectores quanto a ductilidade de acordo com os critérios da EN 1994-1-1:2004 [9].

3.1.3 Afastamento transversal – *uplift*

Para o monitoramento do afastamento horizontal das lajes (*uplift*), utilizou-se dois LVDTs fixados numa laje e apoiados na outra, em duas alturas, de forma a permitir o cálculo do deslocamento médio na posição do centroide dos conectores. A Figura 14 traz um comparativo entre os valores médios dos dois LVDTs horizontais para cada modelo ensaiado.

Com os ensaios pode ser observado que os LVDTs H1 e H2 registraram resultados similares de afastamento entre as lajes com a progressão do carregamento, permitindo concluir que o afastamento horizontal entre as lajes dos modelos ocorreu de forma semelhante para as duas posições avaliadas. Nos modelos com conectores Trelaçados de 12,5 mm houve maiores valores de *uplift* na parte inferior das lajes para valores de carga próximos a P_{max} (carga máxima de ensaio) e na fase de declínio do carregamento no final dos ensaios.

Na Figura 14 observa-se que os conectores Trelaçados conduziram a maiores valores de carga máxima para os modelos experimentais e maiores valores de *uplift*. Em algumas aplicações estruturais, como no caso das vigas mistas, além das forças de

cisalhamento longitudinais os conectores estão sujeitos também a forças transversais ao eixo da peça, que tendem a causar a separação entre a laje de concreto e o perfil metálico. Em geral, as forças transversais que surgem são bem menores do que as forças de cisalhamento longitudinais, e na prática não é necessário calculá-las (Johnson, 1994 [15]).

4. Conclusões

Os ensaios de *push-out* realizados nesta pesquisa de acordo com as prescrições da EN 1994-1-1:2004 [9] são internacionalmente conhecidos, aceitos e largamente utilizados para a avaliação de novos tipos de conectores de cisalhamento.

Os resultados dos ensaios de *push-out* com conectores *stud bolt* (19,0 mm de diâmetro) e Trelaçados do tipo R12,5 (12,5 mm de diâmetro) mostraram que, além da praticidade de fabricação – material de fácil aquisição e processo de fabricação largamente conhecido –, os conectores Trelaçados apresentaram maior capacidade resistente, atendendo aos parâmetros de deslizamento longitudinal entre laje e perfil e *uplift* preconizados pela EN 1994-1-1:2004 [9].

Os ensaios de *push-out* foram conduzidos no intuito de se realizar a caracterização dos conectores de cisalhamento estudados quanto a sua capacidade de carga de projeto e quanto a sua ductilidade, levando em consideração as prescrições da norma europeia EN 1994-1-1:2004 [9]. Assim, podem ser listadas as seguintes conclusões acerca dos ensaios realizados:

- A resistência última dos modelos de *push-out* com os 8 conectores Trelaçados de 12,5 mm foi em média de 1384,07 kN, o que corresponde a 173 kN por conector de cisalhamento e para os modelos com conectores *stud bolt* a resistência máxima foi em média de 997,0 kN, sendo 124,63 kN por conector;
- O procedimento de cálculo da resistência de projeto para cada conector de cisalhamento (P_{Rd}), pela norma EN 1994-1-1:2004 [9], levou ao resultado de 62,45 kN por conector *stud bolt* e 87,50 kN por conector Trelaçado de 12,5 mm de diâmetro;
- Foi realizado o alívio de carga de 20% no final dos ensaios para cinco modelos submetidos aos ensaios de *push-out*, 3 modelos com conectores Trelaçados e 2 modelos com conectores *stud bolt*, possibilitando a classificação dos conectores *stud bolt* e Trelaçados de 12,5 mm como dúcteis, portanto, com comportamento de deformação plástica ideal na ruptura, com distribuição dos esforços entre os conectores para valores de carga de serviço;
- Os conectores Trelaçados de 12,5 mm proporcionam maior capacidade de carga e maiores valores de *uplift* em relação aos conectores *stud bolt*.
- Os conectores Trelaçados submetidos aos ensaios de cisalhamento direto apresentaram ruptura por tração na haste vertical, com a solda suficientemente resistente aos carregamentos aplicados, enquanto que os modelos com conectores *stud bolt* apresentaram ruptura de todos os conectores em uma das lajes na região da solda com o perfil metálico, com ruptura no metal base.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de manifestar seu agradecimento ao apoio concedido pela empresa CONCRECON, com a doação de todo o

concreto utilizado nesta pesquisa e pela empresa CPC ESTRUTURAS pela doação de todos os perfis metálicos e conectores *stud bolts* utilizados nos ensaios experimentais desta pesquisa. Fica o agradecimento também ao CNPQ pelo fomento à pesquisa e à Universidade de Brasília (UnB), que por meio dos seus diversos laboratórios e da prefeitura universitária possibilitou a construção e ensaio de todos os modelos experimentais estudados neste trabalho.

6. Referências bibliográficas

- [1] CAVALCANTE, O. R. O. (2010). Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo 'V' em Vigas Mistas. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 006/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). ABNT NBR 8800. Projeto e execução de estruturas de aço e de mistas aço e concreto de edifícios.
- [3] CHAVES, I. A., (2009). Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.
- [4] VERÍSSIMO, G. S., (2007). Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Tese de Doutorado em Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, 290p.
- [5] REHMAN N., D. LAM, X. DAI, A.F. ASHOUR., (2016). Experimental study on demountable shear connectors in composite slabs with profiled decking. *Journal of Constructional Steel Research*, 122. pp. 178–189.
- [6] DAI X.H., D. LAM, E. SAVERI; (2015). Effect of concrete strength and stud collar size to shear capacity of demountable shear connectors. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 141.
- [7] PATHIRANA S.W., B. UY, O. MIRZA, X. ZHU., (2015). Strengthening of existing composite steel concrete beams utilizing bolted connectors and welded studs. *Journal of Constructional Steel Research*, 114. pp. 417–430.
- [8] BARBOSA, W. C. S., (2016). Estudo de Conectores de Cisalhamento em Barras de Aço para Vigas Mistas de Aço e Concreto. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 008A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 511p.
- [9] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004). 1994-1-1: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures; Part 1.1: General rules and rules for buildings.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2007). ABNT NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). ABNT NBR 8522. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). ABNT NBR ISO 6892-1. Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2007). ABNT NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação.
- [14] AWS D1.1/D1.1M (2015). Structural Welding Code – Steel. American Welding Society (AWS) D1 Committee on Structural Welding.
- [15] JOHNSON, R. P. (1994). Composite Structures of Steel and Concrete – Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings. Vol. 1, 2nd edition, Oxford (UK): Blackwell Science Ltd.