



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISSALHAMENTO DO TIPO STUD BOLD EM VIGAS MISTAS

Wellington Vital da Silva

Brunno Emidio Sobrinho

João Paulo de Almeida Siqueira

Thiago Araujo Macedo

Marco Aurelio Souza Bessa

Juliana Cardoso Santos

welington.vital@gmail.com

br_emidio@yahoo.com.br

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

joaopaulodealmeida@outlook.com

UDF- Centro Universitário do Distrito Federal-Departamento de Civil 70390-045, Brasília, Brazil

thiagoramac@gmail.com

bessamarco@yahoo.com.br

julianasaaantos@gmail.com

UniCEUB Centro universitário de Brasília- FATECS 70.790-075, Brasília, Brazil

Resumo. *As estruturas em aço-concreto são extremamente utilizadas na construção civil no Brasil devido às vantagens que são obtidas com o aproveitamento das propriedades desses materiais. Nessas estruturas o perfil de aço trabalha em conjunto com o concreto e a interação entre eles é garantida com o uso de conectores de cisalhamento. Os conectores são elementos metálicos cujas funções são transferir o fluxo de cisalhamento e restringir a separação vertical do conjunto misto. É de grande importância a escolha e o dimensionamento desses elementos uma vez que determinam o grau de interação do aço e do concreto. Com objetivo avaliar a utilização dos conectores de cisalhamento Stud Bolt em vigas mistas aço-concreto foram analisados dados três modelos do ensaio de push-out, sendo,*

cada modelo composto por um perfil metálico e duas lajes de concreto, seguindo os padrões estabelecidos pelo EUROCODE 4 (2004). Através destes ensaios experimentais, foi possível analisar o efeito de separação das lajes de concreto em relação à viga metálica provocado pelos carregamentos aplicados aos modelos, bem como fazer a modelagem através do Método dos Elementos Finitos- MEF, utilizando o software ANSYS afim de se obter as tensões máximas nos conectores de cisalhamento.

Palavras-chave: Vigas mistas, conector de cisalhamento, ANSYS, conector Stud Bold.

1 INTRODUÇÃO

As vigas mistas de aço e concreto vêm sendo muito utilizadas na construção de edifícios e pontes nos últimos anos devido a rapidez e a redução no peso das estruturas. Esse sistema estrutural é composto pelo concreto e o aço trabalhando em conjunto. As vigas mistas foram regulamentadas na primeira edição da (ABNT NBR 8800, 1986). Exemplos desse sistema incluem estruturas de aço de um edifício com as lajes de concreto, pontes com tabuleiro em concreto e vigas metálicas.

É de conhecimento comum que o concreto possui boa resistência quando submetido à compressão, mas sua resistência à tração é apenas uma pequena fração da resistência à compressão (Veríssimo 2007). Já o aço é um material com grande resistência à tração, contudo tem problemas na instabilidade para elementos muito esbeltos. Nas estruturas mistas são aproveitadas as vantagens dos dois materiais.

Latif (2015) esse sistema busca aproveitar de maneira otimizada seus materiais componentes: o concreto é solicitado principalmente à compressão e o aço à tração, diminui-se a necessidade de emprego do concreto na zona tracionada de uma viga, onde sua resistência seria desprezada.

Estas estruturas contam com a transferência de forças de cisalhamento entre os dois materiais, a fim de aproveitar os benefícios da ação mista. Dentre os benefícios podem incluir aumento da força e rigidez como também na contenção de instabilidades de flambagem.

A junção natural do aço e do concreto não é suficiente para que os dois materiais interajam de maneira satisfatória e também está sujeita ao colapso (ROCHA 2015). Na região de interface aço – concreto surgem forças de cisalhamento, normalmente a ligação mecânica é realizada com conectores.

A transferência de cisalhamento entre o aço e concreto através do conector permite que os dois materiais possam funcionar como um elemento único. A eficácia dessa transferência é determinada pela força resistente do conector, a integridade e resistência da solda, a resistência ao esmagamento ou fissuras do concreto em torno do conector parafuso e o deslizamento dos dois materiais (aço e concreto).

A escolha do tipo de conector e o seu correto dimensionamento são de grande importância, porque é por meio deles que se determina o grau de interação entre o aço e concreto. (Calvacate 2010).

Existem vários conectores disponíveis no mercado o mais utilizado na prática é o stud bold – tipo pino com cabeça normatizado pela NBR 8800, de fácil produção. Na figura 1 está ilustrado o conector Stud.

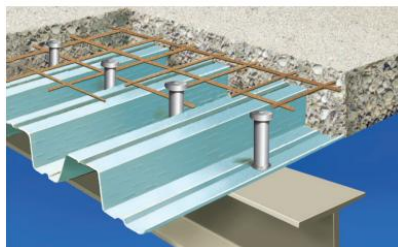


Figura 1 - Instalação do conector stud bold em laje steel desk (catálogo ciser)

Dentre os objetivos do presente trabalho, busca-se analisar o conector de cisalhamento stud bold, através de dados experimentais do ensaio tipo push-out realizados de acordo com a norma europeia EN 1994-1-1:2004 e posteriormente a simulação numérica através Abaqus. Espera-se ao final obter resultados da força x deslocamento do conector, avaliar os níveis de tensões através dos modelos numéricos.

2 VIGAS MISTAS

Os primeiros estudos sobre vigas mistas aconteceram na década de 1920. Mas somente após a II Guerra Mundial vigas mistas tiveram grande utilização. Antes, eram usadas vigas metálicas com lajes em concreto, sem levar em conta a participação da laje. Após a guerra, levou os engenheiros europeus a utilizar a laje de concreto como parte componente do vigamento, iniciando-se as pesquisas sistemáticas que esclareceram o comportamento da viga mista para esforços estáticos e repetidos (PFEIL,2009).

Segundo Tristão (2002), somente a partir da década de 1950 que foram executadas estruturas mistas para alguns prédios e pequenas pontes. Nas décadas de 70 e 80, devido à crise econômica no país, praticamente não há registro de estruturas mistas no Brasil (PULIDO 2012). Após o período de crise e com o aumento da produção de aço geram um contexto para busca de novos métodos construtivos mais eficazes. Mas só em 1986 foi regulamentado o cálculo de vigas mistas com a publicação da norma NBR 8800.

Uma estrutura mista é formada pela combinação de um perfil de aço juntamente com elemento de concreto. Os perfis metálicos podem ser laminados, soldados ou formados a frio e concreto geralmente armado. Da junção desses dois materiais surgem pilares mistos, vigas mistas, lajes mistas ou ligações mistas. Pfeil (2009), define vigas mistas como sendo a formada pela associação de viga metálica com uma laje de concreto, sendo os elementos ligados por conectores metálicos. Os conectores absorvem que as solicitações cisalhantes e impedem a separação entre a laje de concreto e a viga metálica.

A figura 2 apresenta um exemplo de viga mista com perfis I soldados interligados por meio de conectores U.



Figura 2 - Vigas mista (CBCA, 2012)

Nas estruturas mistas deve ser garantida a interação entre o concreto e o perfil de aço. Essa interação pode ser dada por meios mecânicos (conectores, mochas, ressalto etc), por atrito (no caso de fôrmas de aço com cantos reentrantes) ou, em alguns casos, por simples aderência

ou repartição de cargas (como em pilares mistos sujeitos apenas a força normal de compressão) (QUEIROZ 2012).

A utilização de estruturas mistas amplia consideravelmente a solução em concreto armado e aço. Conforme com a NBR 8800, em pilares mistos, a contribuição do aço pode chegar em 90% já em comparação com pilares de concreto armado essa contribuição fica em torno de 40%.

Segundo VERÍSSIMO (2007, p. 2)

Os elementos estruturais mistos oferecem uma série de vantagens sobre os não-mistos. A seção de aço, por exemplo, pode ser reduzida em relação a uma peça equivalente de aço apenas, já que o concreto resiste a uma parcela do carregamento atuante. Geralmente esse artifício implica na redução das dimensões da seção. No caso específico das vigas mistas, por exemplo, ocorre redução da altura total da viga e diminuição do peso de aço demandado. Essa solução promove redução da altura total do edifício e do consumo de aço na estrutura, com reflexos diretos na diminuição do custo final da construção. Além disso, um elemento misto é, em geral, mais rígido do que um não-misto de mesma dimensão e, em consequência disso, sofre menos deformação e vibração.

Além da variedade de opções disponíveis e benefícios arquitetônico e econômicos pode-se citar outras vantagens das estruturas mistas (CBCA, 2012):

- Redução do prazo da obra;
- Eliminação de escoramentos;
- Redução do efetivo da obra: redução de despesas indiretas, de potencial risco trabalhista e de acidentes;
- Obra sustentável, com menor geração de resíduos;
- Logística otimizada;
- Maior parte dos elementos produzidos fora do canteiro.

2.1 Comportamento da ligação ao cisalhamento

A aderência natural entre o concreto armado e perfil de aço embora possa atingir valores elevados muitas vezes não é levado na conta do cálculo devido à sua baixa ductilidade. Na ligação entres eles a força é principalmente, mas não exclusivamente, forças longitudinais de cisalhamento. Sendo assim a NBR 8800 prevê o uso de conectores de cisalhamento. Esses dispositivos metálicos fazem a ligação entre os dois materiais, que permitem a transferência de forças longitudinais do aço para o concreto, além de resistir às forças transversais ao eixo do elemento, que tendem a causar a separação dos materiais na interface entre ambos.

Latif (2015, pag. 7) explica sobre as solicitações de uma viga:

Em uma viga mista, de modo geral, a parte superior da laje é solicitada a compressão e a base do perfil metálico é solicitada a tração. Além disso, o concreto da laje e o aço do perfil tem propriedades mecânicas e geométricas distintas, como o módulo de elasticidade e a seção. Por conta destas diferenças, a resposta dos materiais ao carregamento é diferente, havendo a tendência de um deslizamento relativo entre eles. Quando não há conectores de cisalhamento entre os dois materiais, este deslizamento ocorre livremente, e a viga é híbrida, sem ação mista, com cada material agindo separadamente.

Portanto a ação mista é desenvolvida quando os dois elementos se deformam como um único elemento. Na figura 3, apresentam duas vigas de aço biapoiada, suportando uma laje de concreto. Na primeira viga sem ação mista como não há qualquer ligação na interface (aço-concreto), os dois elementos se deformam independente. Já na segunda viga com ação mista pode-se observar que as fibras de concreto tendem a se expandir enquanto as fibras de aço tendem a se contrair, portanto se deformam como um único elemento.

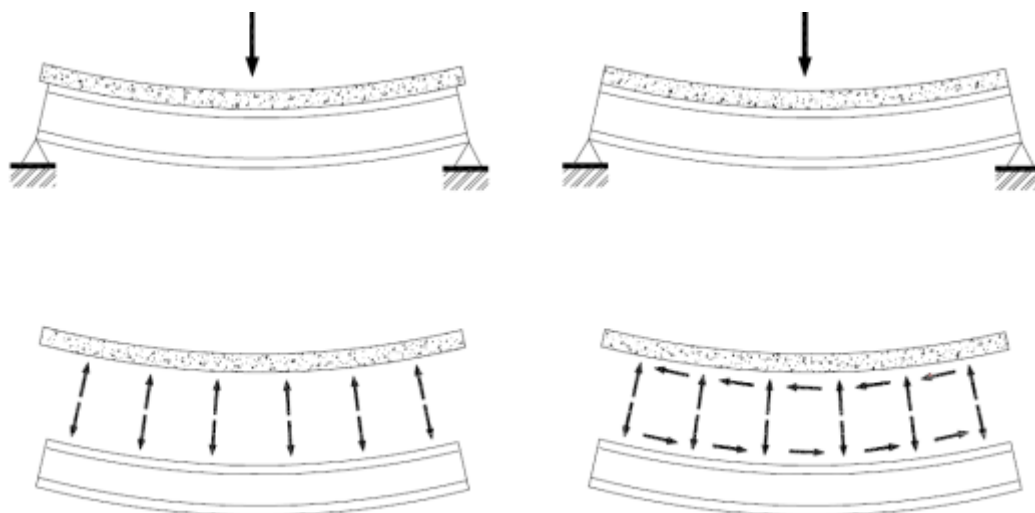


Figura 3 – Vigas fletidas sem ação mista e com ação mista (David, 2007)

A região de interface laje e perfil apresenta um comportamento complexo e de grande relevância para o estudo e dimensionamento das estruturas mistas. A ligação entre a laje e o perfil está relacionada a dois fenômenos distintos, o grau de conexão e o grau de interação (CALVACANTE, 2010).

O grau da conexão como sendo a relação entre a somatória da resistência individual dos conectores e a resultante do fluxo de cisalhamento da interação completa (HIGAKI, 2009). O grau da conexão pode ser dividido em total e parcial.

De acordo com o NBR 8800:2008 o grau de conexão de uma viga mista pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{F_{sh}}{F_{sh,\min}} \quad (1)$$

Onde:

η é o grau de conexão de cisalhamento;

F_{sh} é a resistência da conexão ao cisalhamento;

$F_{sh,\min}$ é a resistência mínima de cisalhamento em situação de conexão completa.

A NBR 8800:2008 admite valores entre 0.4 e 1, sendo 0,4 o valor mínimo e 1 o valor para conexão completa.

O grau de interação relaciona-se com o escorregamento entre a laje em relação ao perfil metálico. Podendo ser nula, parcial ou total. Na interação nula não existe na interface então os dois elementos se deformaram independente e formam-se duas linhas neutras. Na interação

parcial apesar de observa- se a formação de duas linhas neutras, o escorregamento relativo inferior ao caso da interação nula. Por fim, na interação total os elementos se deformam como um único elemento e ocorre a formação de apenas uma linha neutra como ilustrado na figura 4.

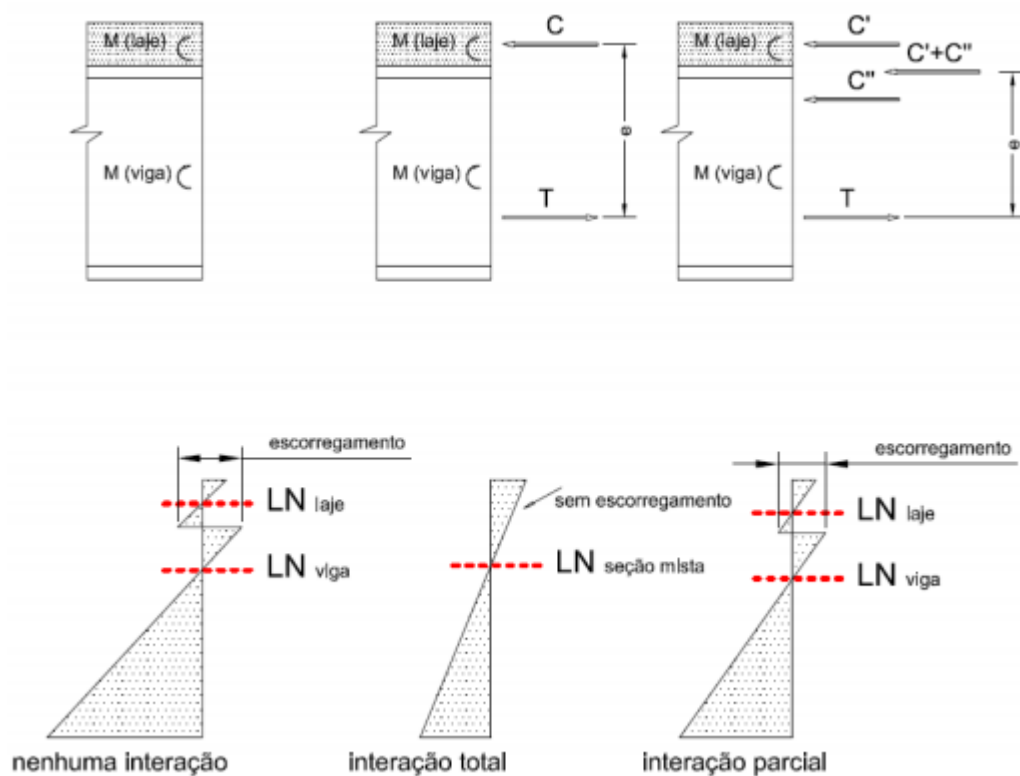


Figura 4 – Variação de deformação no sistema mista (CBCA,2012)

3 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Conectores de cisalhantes são dispositivos mecânicos cujo finalidade é de conectar o aço e concreto de uma estrutura mista. Existem inúmeros tipos de conectores, os mais utilizados são stud bold , perfil U, perfobond. Os conectores podem ser flexíveis ou rígidos. Os conectores rígidos apresentam pouca deformação, conforme mostra a figura 5, e proporcionam uma conexão com pouco deslizamento entre o perfil metálico e a laje de concreto. O conector rígido sofre apenas deformações elásticas de pequena magnitude em estado de serviço. Os conectores flexíveis apresentam maior deformação sob carregamento, e logo um maior deslizamento entre o perfil e a laje.

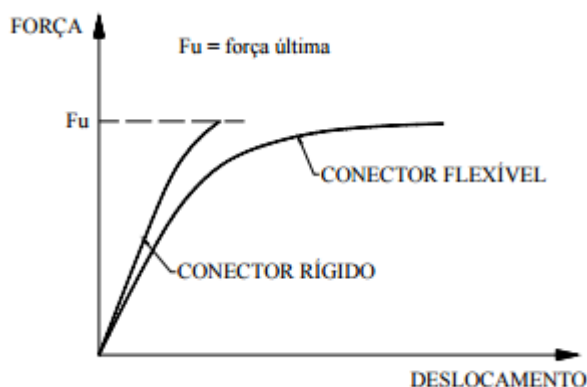


Figura 5 – Relação força-deslocamento para conectores de cisalhamento. (Tristão & Neto, 2005)

A ruptura dos conectores rígidos é de maneira frágil com esmagamento ou cisalhamento do concreto, portanto procura-se evitar este tipo conector por questões de segurança estrutural. Um conector flexível não é propriamente o ideal em algumas situações por conta da fadiga (CALVACANTE, 2009).

Um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizada por deslizamento nulo (ou quase nulo) para cargas de serviço e ductilidade em estado limite último. Portanto, as características de um conector rígido são desejáveis em condições de serviço e as características de um conector flexível são desejáveis em estado limite último. (VERÍSSIMO, 2007, p.14).

Seguindo as recomendações da EM 1994-1-1 (2004), um conector de cisalhamento só pode ser classificado como dúctil se apresentar deslizamento característico superior a 6,0 mm. A análise da ductilidade dos conectores pode ser realizada por meio do ensaio de cisalhamento, também conhecido como push-out.

3.1 Conector Stud bold

O conector stud bold ou também conhecido como pino com cabeça é o mais utilizado na prática, foi desenvolvido na Inglaterra década 1940 pela Nelson Stud Welding. Ele consiste de um pino projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico e após a soldagem como conector de cisalhamento. Em estruturas de edificações são utilizados o diâmetro de 19 mm.

3.2 Características mecânicas do Stud Bold

O aço utilizado na fabricação do conector stud é o ASTM A- 108 graus 1020. Deve-se especifica – ló para ser produzido com resistência mínima a tração de 450 MPa e limite de escoamento superior a 350 MPa conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Características mecânicas do Stud bold (Catálogo ciser)

Propriedades mecânicas	Aço baixo carbono
Limite de escoamento (0,2%)	350 MPa mín.
Limite de resistência	450 MPa mín.
Alongamento (% em 50 mm)	20% mín.
Redução de área	50% mín.

Para a redução do pino após a soldagem são admitidos os seguintes valores conforme catálogo da ciser:

$\Delta L1 = 5$ mm, para solda direta na viga;

$\Delta L2 = 9$ mm, para solda na forma incorporada (steel deck).

3.3 Dimensionamento do conector Stud Bold

De acordo com a NBR 8800(2008), a força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento tipo pino com cabeça, embutido em laje de concreto com face inferior diretamente apoiada sobre viga de aço, é dada pelo menor dos valores seguintes.

$$Q_{Rr} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (2)$$

$$Q_{Rr} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (3)$$

Onde:

Q_{Rr} é a força resistente de cálculo;

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

A_{cs} é a área da seção transversal do conector;

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

R_g é o coeficiente para a consideração do efeito de atuação de grupo de conectores;

R_p é o coeficiente para a consideração da posição do conector.

A Equação (2) refere-se ao apoio do pino no concreto, enquanto Equação (3) trata da resistência a flexão do pino.

A norma EN 1994-1-1:2004 considera a resistência de cálculo dos conectores studs ao cisalhamento como sendo o menor dos valores:

$$Q_{Rr} = \frac{0.8A_{cs}f_{ck}}{\gamma_{cs}} \quad (4)$$

$$Q_{Rr} = \frac{0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (5)$$

Onde:

Q_{Rr} é a força resistente de cálculo;

d é o diâmetro do conector stud ($d \leq 25$ mm);

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

h é a altura total do conector;

γ_{cs} é coeficiente de segurança;

α é fator de correção, valendo:

1 se $h/d > 4$

0,2 [(h/d) + 1] se $3 \leq h/d \leq 4$

3.4 Ensaio de cisalhamento direto *push-out*

O ensaio de cisalhamento direto, o push-out padronizado pela EN 1994-1-1:2004 consiste de duas lajes 60x60x15cm ligadas a um perfil de aço I por meio de conectores de cisalhamento, conforme a figura 6. No ensaio é aplicada uma carga vertical P no perfil, que produz a força de cisalhamento na ligação entre o concreto e o aço. Neste ensaio é possível determinar o deslizamento relativo do perfil em relação a laje e a ductilidade da conexão.

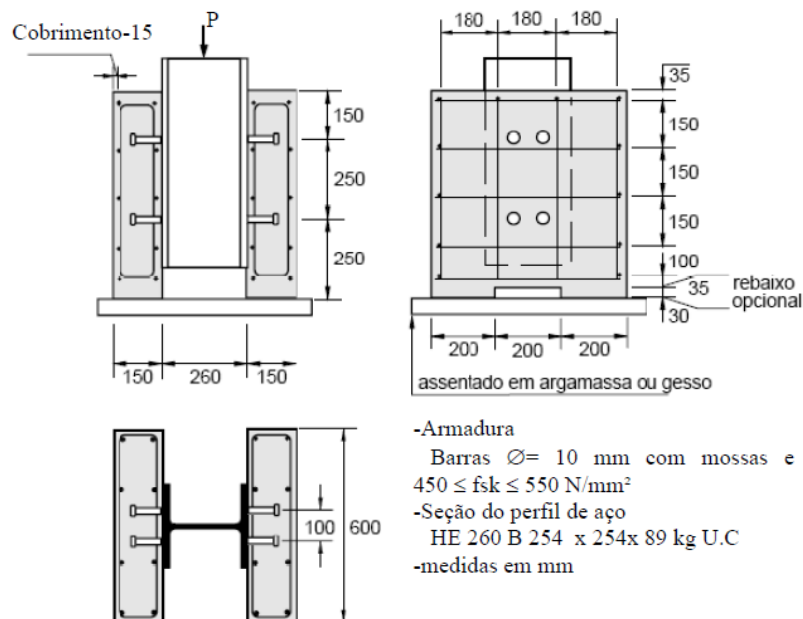


Figura 6 - Modelo do ensaio de push-out (EUROCODE 4, 2004)

Antes de realizar o ensaio devem tomar algumas medidas recomendadas pela norma europeia. Primeiramente eliminar a aderência do perfil metálico com a laje de concreto através da lubrificação ou por outros meios adequados. As amostras devem ser curadas ao ar. Durante a concretagem dos modelos, devem ser preparados 4 corpos de prova para determinação da resistência à compressão (f_{cm}). A resistência à compressão do concreto no momento do teste deve ser $70\% \pm 10\%$ da resistência (f_{ck}).

Procedimentos do ensaio, EUROCODE 4:

- (1) A carga deve primeiro ser aplicada em incrementos até 40% da carga de ruptura e, em seguida são realizados 25 ciclos de carga/ descarga entre 5% e 40% da carga esperada de ruptura;
- (2) Os incrementos de carga subsequentes devem, então, ser aplicadas de tal forma que a falha não ocorra em menos de 15 minutos;
- (3) O deslizamento longitudinal entre cada laje de concreto e o aço da seção deve ser monitorado continuamente durante todo ensaio. O deslizamento deve ser medido até que a carga aplicada decresça em 20% em relação à carga máxima.
- (4) Deve ser medir a separação transversal entre o aço e concreto na região próxima aos conectores.

Para avaliar os resultados são realizados três ensaios idênticos, cujo desvio padrão não exceda 10% da média de todos os ensaios. A resistência de cálculo do conector pode ser obtida pela equação:

$$Q_{Rr} = \frac{f_u}{f_{ut}} \frac{P_{rk}}{\gamma} \leq \frac{P_{rk}}{\gamma} \quad (6)$$

Onde:

f_u é a resistência à ruptura especificada para o material do conector;

f_{ut} é a resistência à ruptura do conector obtida no ensaio experimental;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,25;

P_{rk} é a menor resistência encontrada dos três ensaios de modelos idênticos reduzida em 10%.

Para que o desempenho do conector seja considerado favorável, este deve resistir à separação transversal que tende a ocorrer entre a laje e o perfil, de modo que o afastamento transversal não deva superar 50% do deslizamento longitudinal verificado para $0,8 P_{max}$ (CALVACANTE,2010). A capacidade de deslizamento de um modelo, denominada δ_u , deve ser considerada como a menor dos valores obtidos nos ensaio, de acordo com a figura 7.

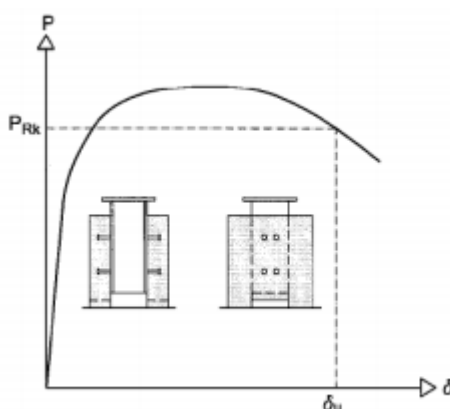


Figura 7 – Determinação da capacidade de deslizamento (EUROCODE 4, 2004)

Vianna (2009), explica que o valor da capacidade de deslizamento δ_u deve ser tomado como o maior valor medido no nível de carga característica (P_{rk}). A carga característica é tomada como a menor carga de colapso, dividida pelo número de conectores, reduzida de 10%. O deslizamento característico δ_{uk} considerado foi igual a $0,9 \delta_u$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados e a discussão referentes ao estudo do ensaio de push-out descrito anteriormente, bem como o resultado da sua modelagem numérica.

4.1 Estudo experimental

O estudo experimental baseou-se em dados de três modelos do ensaio de push-out realizados no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília. Cada modelo é composto por um perfil metálico e duas lajes de concreto seguindo os padrões estabelecidos pelo EUROCODE 4 (1994). Os três modelos ensaiados foram instrumentados com oito extensômetros nos conectores (EC1 a EC8), três extensômetros na armadura das lajes (EL1 a EL3) e dois defletômetros tipo LVDT tanto vertical entre o perfil e as lajes (LVDT-V1 e LVDT-V2) como na horizontal entre as duas lajes (LVDT-H1 e LVDT-H2). Os defletômetros empregados na horizontal tem como objetivo medir a separação vertical da laje em relação ao perfil, o chamado uplift, e os verticais para medir o deslizamento da laje relativamente ao perfil metálico.

4.1.1 Avaliação do ensaio

A carga foi aplicada seguindo recomendações da EN 1994-1-1:2004. Sendo dividida em duas fases: a realização de 25 ciclos de carregamento variando entre 4 tf e 32 tf e a aplicação de carga até a ruptura do modelo. A figura 8 apresenta a relação carga (kN) x tempo (s) aplicada nos ensaios do projeto.

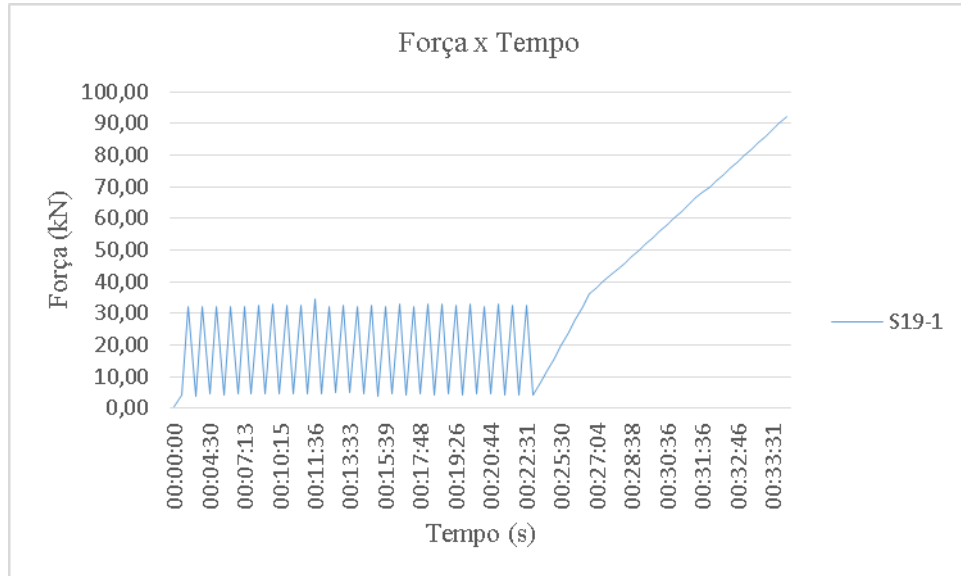


Figura 8– Gráfico Força x tempo

As cargas de ruptura obtidas nos três ensaios são mostradas na tabela abaixo:

Tabela 2 - Carga de ruptura dos modelos

Modelo	Carga de ruptura (tf)
S19-1	92,08
S19-2	101,02
S19-3	106
Média	99,7

Pelos critérios da norma europeia EN 1994-1-1:2004, o ensaio não precisa ser refeito, uma vez que os 3 valores não diferem em mais de 10% da média dos resultados, uma vez que os limites de 90% e 110% da média são respectivamente 90,05 tf e 110,06 tf.

4.1.2 Deslizamento vertical

O deslizamento vertical entre as lajes e o perfil foi medido a partir das leituras de 2 defletômetros tipo LVTD. O estudo da relação carga aplicada pelo deslizamento do perfil em relação a laje é apresentado na figura 9 que mostra os resultados das leituras médias entre os dois defletômetros verticais em cada modelo. Os 3 modelos tiveram um deslizamento vertical uniforme.

O deslizamento vertical entre as lajes e o perfil foi medido dos dois lados da alma do perfil metálico, pelos defletômetros denominados 'DEF 1' e 'DEF 2', em cada um dos 3 modelos ensaiado

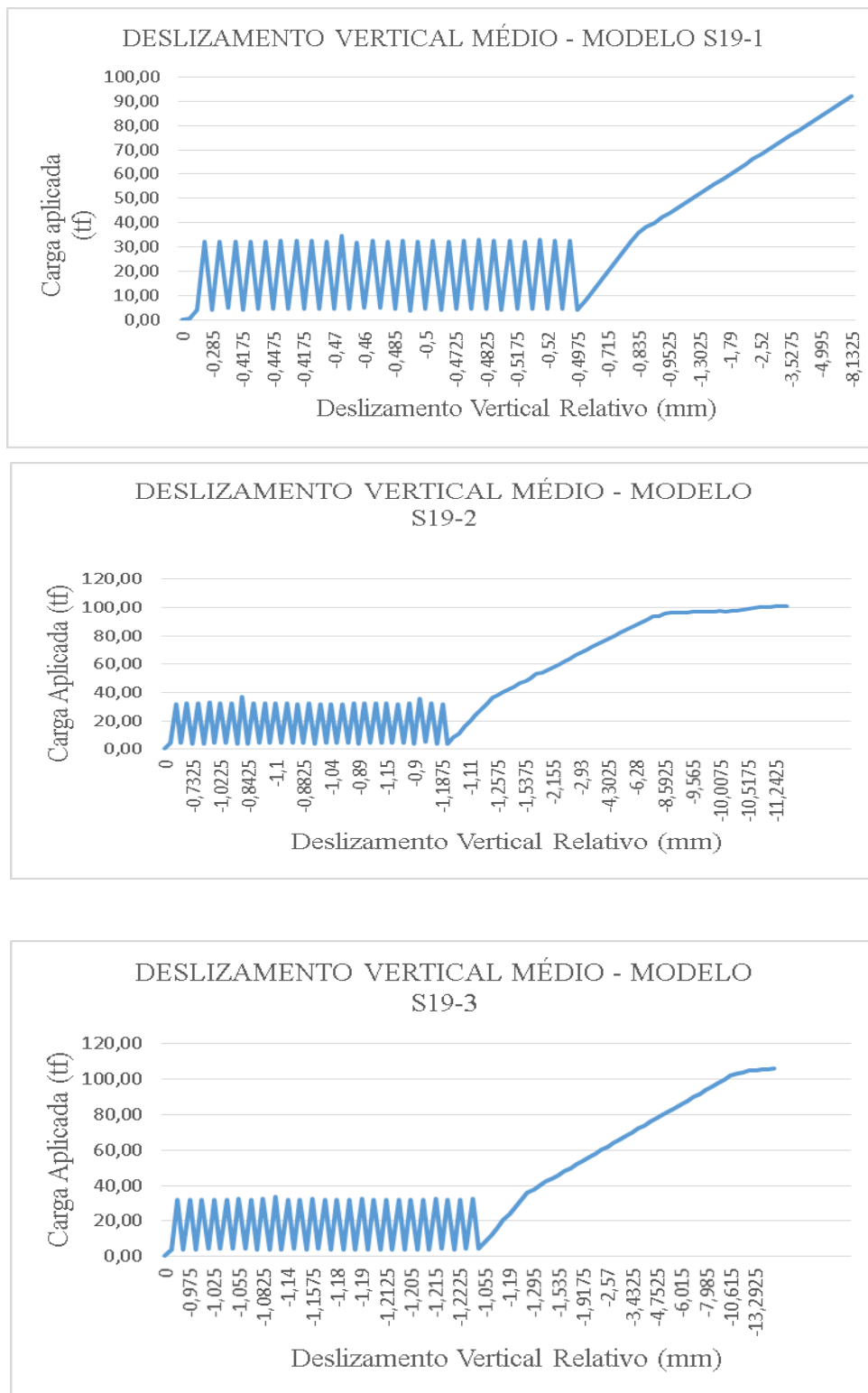


Figura 9 – Deslizamento do perfil em relação à laje .

Na tabela 3, foram relacionados os resultados das cargas máximas e os correspondentes deslizamentos do perfil em relação a laje. Observa-se que apenas os modelos S19-2 e S19-3 atendem a norma europeia EN 1994-1-1:2004, que para um conector possa ser tomado como dúctil se a capacidade característica de deslizamento (δ_{uk}) for pelo menos de 6 mm. O estudo modelo S19-1 apresentou um comportamento mais frágil em comparação com os demais ensaiados.

Tabela 3 - Cargas e deslizamentos máximos dos ensaios

Modelo do conector	Q_{max}	Q_{max} por conector	P_k	δ_u	δ_{uk}
	kN	kN	kN	mm	mm
S19-1	902,4	112,8	804,93	4,82	4,34
S19-2	990	123,75	883,78	7,88	7,01
S19-3	1038,8	129,85	922,8	9,52	8,62

Onde:

Q_{max} - carga máxima lida

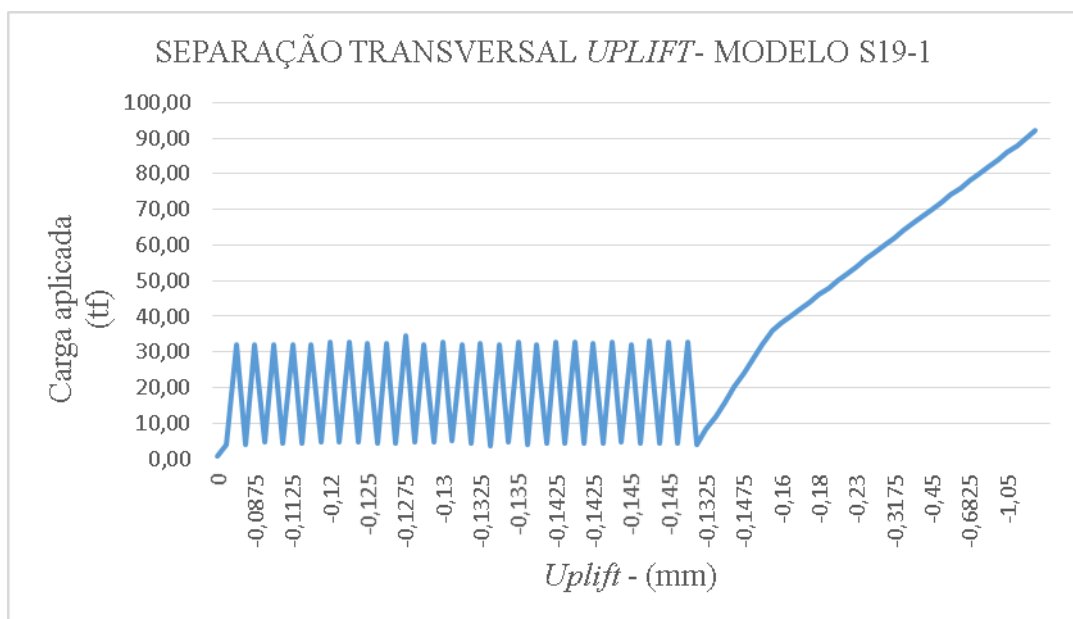
P_k - resistência característica ($P_k = 0,9 Q_{max}$)

δ_u - Deslizamento referente a P_k

δ_{uk} - Capacidade de deslizamento característica ($\delta_{uk} = \delta_u$)

4.1.3 Separação transversal – uplift

O estudo do uplift, a separação transversal entre as duas lajes, foi medido com o emprego de dois defletômetros tipo LVDT posicionados na horizontal. Na figura 10, mostra-se os resultados das leituras médias entre os dois defletômetros horizontais de cada modelo. Podemos observar que as lajes do modelo 2 e 3 se afastaram de maneira mais uniforme. Comparando os resultados podemos observar que o modelo 2 apresentou menores valores de uplift para as mesmas cargas.



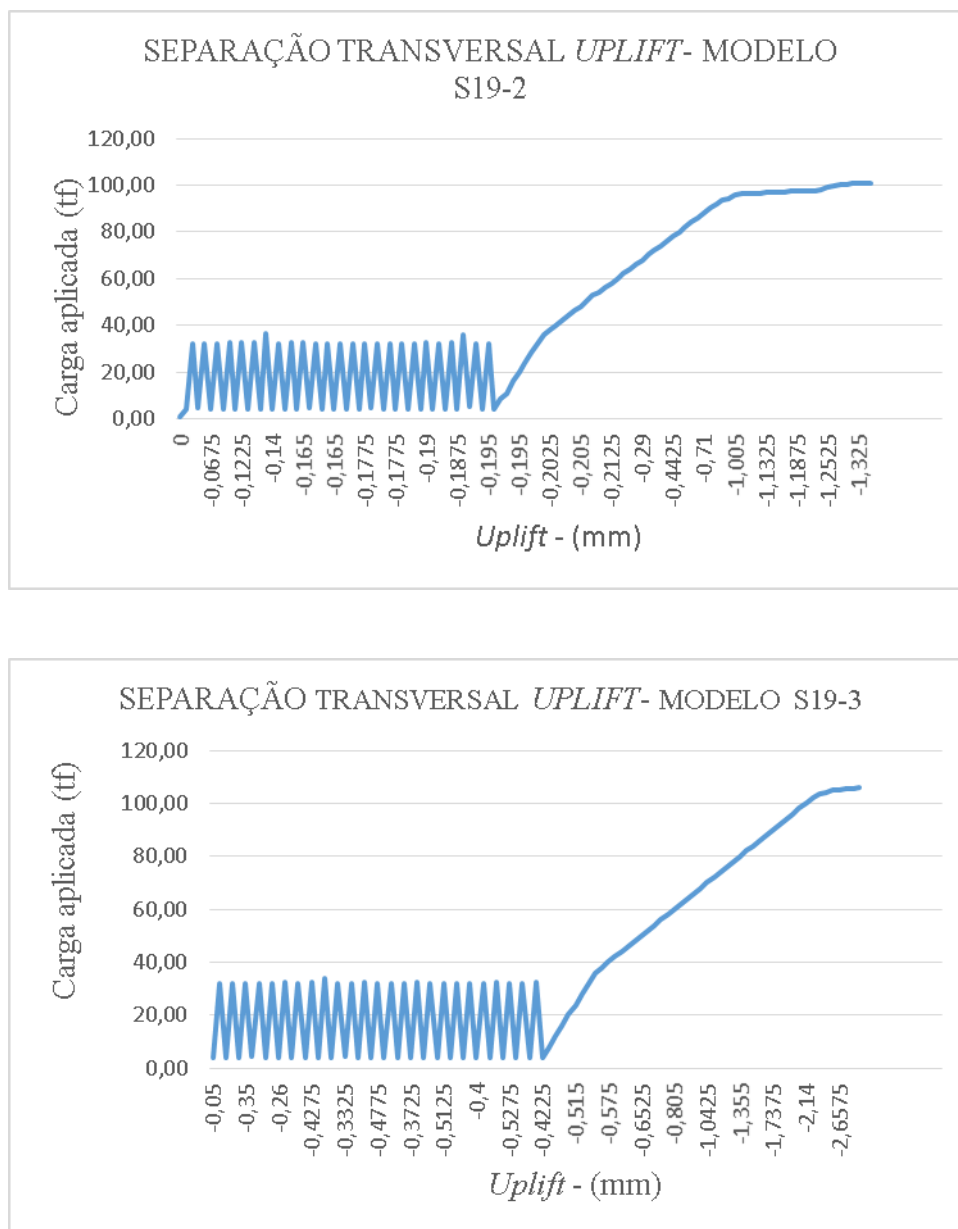


Figura 10 – Estudo da separação entre lajes no ensaio de *push-out*

Quanto a verificação do uplift todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios apenas o modelo S19-3 detoou dos demais com uma capacidade menor de unir o perfil e as lajes. A relação $uplift_{80}$ e o deslizamento (δ_{80}), medidos a 80% da carga máxima, apresentou valores abaixo do limite de 50% conforme item 3.4.

Tabela 4 - Verificação do uplift

Modelo do conector	Q_{\max}	$0,8 \times Q_{\max}$	δ_{80}	$Uplift_{80}$	$Uplift_{80}/\delta_{80}$
	kN	kN	mm	mm	%
S19-1	902,4	706,08	3,13	0,740	23,64
S19-2	990	784,73	5,41	0,565	10,44
S19-3	1038,8	823,95	6,77	1,695	25,04

Onde:

δ_{80} – deslizamento relativo a $0,8 \times Q_{\max}$

$Uplift_{80}$ – $Uplift$ correspondente a $0,8 \times Q_{\max}$

4.2 Estudo numérico no ANSYS

Para investigar o comportamento complexo das estruturas mistas aço-concreto ao estudo experimental é um recurso fundamental. Além do estudo experimental, avaliação numérica também desempenha um papel significativo examinar as propriedades mecânicas dessas estruturas. As vantagens do estudo numérico são as seguinte: enquanto a base do conector é submetida a maiores deformações, nesse trecho não é fácil medir a tensão experimentalmente devido a soldagem e a necessidade da proteção dos extensômetros durante o ensaio de push-out. O modelo numérico desenvolvido, figura 11, por meio da utilização do ANSYS 17.0. O elemento utilizado foi SOLID187 e malha trapezoidal. A malha possui 77533 nós, distribuídos em 42125 elementos.

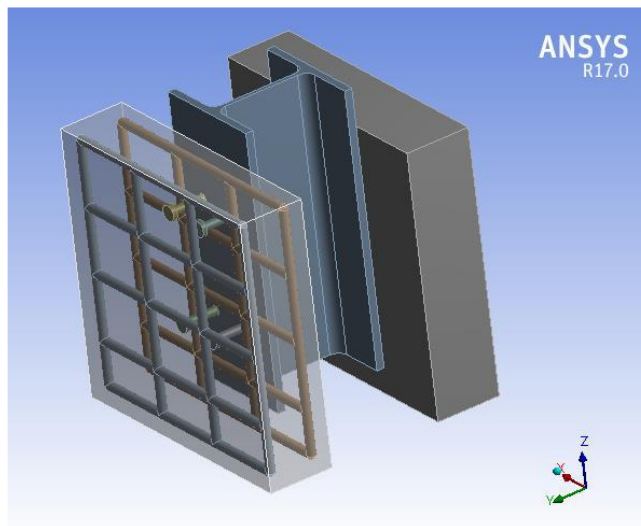


Figura 11– Modelo em elementos finitos ANSYS

Na figura 12, é apresentado o gráfico da carga (N) x tempo (s) gerado no Ansys.

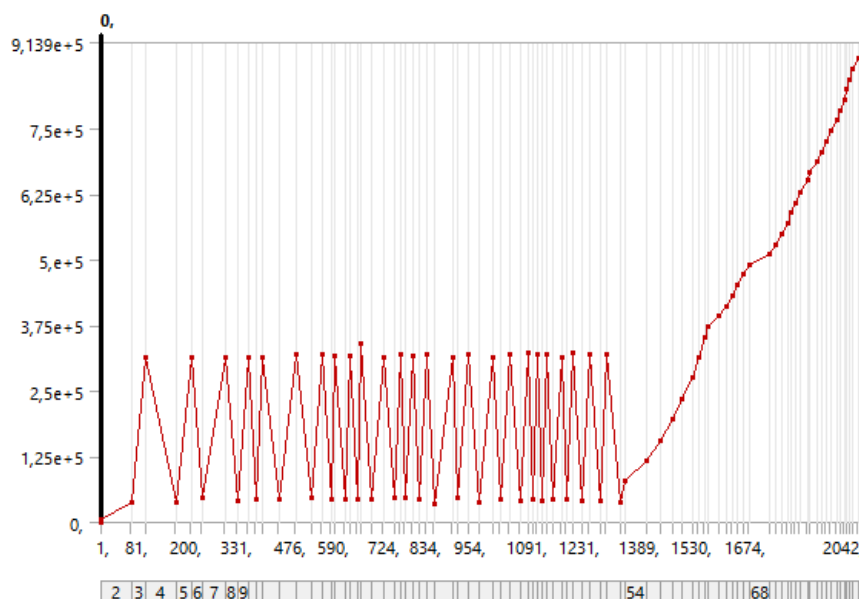


Figura 12 – Estudo da separação entre lajes no ensaio de *push-out*

Percebe-se que a carga de ruptura do modelo numérico, 903,3 kN, valor bem próximo da carga de ruptura do modelo S19-1; em relação aos modelos S19-2 e S19-3 o modelo numérico está abaixo 8,76% e 13,04% respectivamente das cargas de rupturas. Na tabela 5, tem-se as cargas de cada modelo em kN.

Tabela 5 - Comparação das cargas de ruptura dos modelos experimentais e numéricos

Modelo	Carga de ruptura (kN)
S19-1	902,4
S19-2	990,0
S19-3	1038,8
Modelo Numérico	903,8

Na tabela 6, são apresentados um resumo dos resultados da modelagem numéricas:

Tabela 6- Comparação das cargas de ruptura dos modelos experimentais e numéricos

Deformação total	Deformação elástica equivalente	Deformação na direção x	Deformação na direção y	Deformação na direção z	Tensão equivalente de von-Mises
4,69x10 ⁻² mm	7,0578x10 ⁻³ mm/mm	0,12772 mm	5,8876x10 ⁻² mm	1,4319x10 ⁻² mm	793,81 MPa

5 CONCLUSÃO

O presente artigo teve como avaliar o comportamento dos conectores cisalhamento do tipo stud bold. Foram obtidos resultados positivos tanto na análise experimental quanto na numérica com os quais chega-se as seguintes conclusões:

- Os modelos experimentais apresentaram resultados satisfatórios quanto ao deslizamento do perfil em relação à laje e a separação transversal.
- Modelo numérico do conector de cisalhamento numérica resultados obtidos foram comparados com o experimental respostas para validar o método numérico.
- Os resultados numéricos concordam com o experimentais quanto a carga de ruptura.

No que se diz respeito ao estudo de estruturas mistas, verifica-se que a modelagem numérica é uma alternativa para o estudo do comportamento estrutural. Para a continuidade dessa pesquisa, deixa-se como sugestões: realizar novas modelagens numéricas variando quantidades e posições dos conectores; bem como outros parâmetros dimensões da seção, resistência do concreto, posição da armadura.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio a esta e a outras pesquisas à: Universidade de Brasília e às Agências de fomento CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). NBR 8800. Projeto e execução de estruturas de aço e de mistas aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro. s. 2008. 237p.

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.

CHATER, L. (2015). Estudo Numérico e Experimental de Conectores de Cisalhamento Feitos de Vergalhão CA-50 para Uso em Estrutura Mista de Aço-Concreto. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-013^a/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177p.

CATÁLOGO, Ciser. Folheto Stud Bold. Disponível em: <<http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/folheto-stud-bolts.pdf>>. Acesso em: 18 de abr. 2016

DAVID, D. L.; (2007). Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. São Carlos. 250p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

QUEIROZ, Gilson. Manual de Construção em Aço - Estruturas Mistas. Volume 1. Rio de Janeiro. 68p. Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.

QUEIROZ, Gilson. Manual de Construção em Aço - Estruturas Mistadas. Volume 2. Rio de Janeiro. 75p. Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012

HIGAKI, Bruno Eizo. (2009). Análise teórica e experimental de vigas mistas de aço e concreto e laje com vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas em um pavimento tipo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION (2004). ENV 2004-1-1: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1. Bruxelas. 2004.

WALTER, Pfeil; MICHELE, Pfeil. Estruturas de aço dimensionamento Prático. 8 . ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PULIDO, Antonio Carlos; DE NARDIN, Silvana. (2012) Sistematização do dimensionamento a flexo-compressão de pilares mistos preenchidos de seção retangular. 19p.

TRISTÃO, Gustavo A.; (2002). Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço concreto com análise da resposta numérica. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

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.