

# USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM CONECTORES *HILTI X-HVB*

## *Use of the Finite Element Method for analysis of steel and concrete composite beams with Hilti X-HVB connectors*

Elaine Ferreira de Oliveira <sup>1</sup>, Flávio Teixeira de Souza <sup>2</sup>, Geraldo Donizetti de Paula<sup>3</sup>



### PALAVRAS-CHAVE:

Vigas mistas de aço e concreto;  
Conector *Hilti X-HVB*;  
Método dos Elementos Finitos.

### KEYWORDS:

Steel and concrete composite beams;  
*Hilti X-HVB* connector;  
Finite Element Method.

**RESUMO:** Os sistemas estruturais mistos de aço e concreto visam aproveitar as vantagens de cada material, tanto em termos estruturais como construtivos, sendo utilizados na construção civil desde o início da década de 1930 e normatizados no Brasil em 1986. Para que o aço e o concreto trabalhem de forma conjunta, precisam estar ligados entre si por meio de dispositivos de transferência de esforços, os conectores de cisalhamento, que garantem a interação entre os materiais. Assim, este trabalho analisa um sistema misto por meio da simulação do ensaio *push-out*, utilizando modelos numéricos via Método dos Elementos Finitos, pelo *software* ANSYS. Utilizou-se inicialmente o conector *stud bolt* e os resultados foram comparados com resultados encontrados na literatura e, a partir desse modelo, foram estudadas variações com o conector *Hilti X-HVB 80*. Observou-se que o comportamento dos dois tipos de conectores foi similar, sendo que o conector *Hilti* sofreu menores deslocamentos do que o conector *stud bolt* quando submetido aos mesmos carregamentos. Além disso, quando aumentada a rigidez do sistema, os valores de tensões nos conectores foram reduzidos devido à melhor distribuição destas. Portanto, os resultados obtidos foram coerentes às referências, indicando a viabilidade da análise numérica por meio dos modelos elaborados e a possibilidade de estudos paramétricos sobre este sistema.

**ABSTRACT:** *The steel and concrete composite structural system aims to better use the properties of each material, both in structural and constructive terms, they have been used in civil construction since the beginning of the 1930s and standardized in Brazil in 1986. For steel and concrete to work together, they need to be connected through effort transfer devices, called shear connectors, which provide interaction between the materials. Therefore, this work analyzes a composite system by simulating the push-out test using Finite Element Method models using ANSYS software. Initially, the stud bolt connector was used, and their results were compared with literature data, based on this model, variations were studied with the Hilti X-HVB 80 connector. It was observed that the behavior of the two types of connectors was similar, with the Hilti connector suffering smaller displacements than the stud bolt connector when subjected to the same loads. Furthermore, when increased in these systems rigidity leads to smaller values of stress in the connectors, due to better redistribution of these. So, the results obtained were consistent with the references, indicating the feasibility of using numerical analysis through the models developed and the possibility of parametric studies on this system.*

Publicado em 17 de dezembro de 2024.

### \* Contato dos autores:

<sup>1</sup> [elaineefo@gmail.com](mailto:elaineefo@gmail.com) (Oliveira, E. F. de)

Engenheira Civil, Mestre em Engenharia das Construções, Universidade Federal de Ouro Preto

<sup>2</sup> [flavio.souza@ifmg.edu.br](mailto:flavio.souza@ifmg.edu.br) (Souza, F. T. de)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Instituto Federal de Minas Gerais/Campus Ouro Preto

<sup>3</sup> [geraldopaula@ufop.edu.br](mailto:geraldopaula@ufop.edu.br) (Paula, G. D. de)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Universidade Federal de Ouro Preto

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas mistos de aço e concreto na concepção e execução de estruturas tem aumentado ao longo do tempo na busca por metodologias de construção mais limpas, com menos desperdícios e execuções mais ágeis. O aço é um material altamente resistente, de grande durabilidade e versatilidade, sendo resistente a solicitações de tração e compressão nas estruturas. Já o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção, desde moldado *in loco* até peças e estruturas pré-fabricadas, resistente principalmente à solicitação de compressão. Segundo Soares (2019), na utilização de estruturas mistas procura-se obter o máximo desempenho de cada material e a redução de suas desvantagens em termos estruturais, favorecendo aspectos construtivos, funcionais, econômicos e estéticos.

Malite (1993) destaca que em 1914 foram desenvolvidos os primeiros estudos sobre vigas mistas na Inglaterra quando a empresa Redpath Brow and Company realizou vários ensaios sobre sistemas compostos para pisos e em 1930 já estavam definidos os métodos de dimensionamento. No Brasil, as primeiras construções utilizando esta metodologia foram pequenas pontes construídas nas décadas de 1950 e 1960, porém as estruturas mistas somente foram normatizadas em 1986 pela NBR 8800, que aborda o dimensionamento e execução dos elementos mistos submetidos à flexão (Silva, 2018).

Tal sistema amplia as possibilidades de soluções estruturais para os problemas de engenharia civil. No caso de pilares mistos, a contribuição do aço na resistência aos esforços normais de compressão pode chegar a 90%, sendo que, nos pilares de concreto armado, essa contribuição não chega a 40% (Barbosa, 2016).

Pesquisas de Alva (2000), Cruz (2011), Chater (2015), Silva (2018) e Souza, Soares e Paula (2021) foram desenvolvidas sobre sistemas mistos considerando aspectos teóricos e experimentais, alguns deles abordando a análise numérica. Sabe-se que, para um comportamento estrutural adequado deste sistema, deve-se analisar a interação entre os materiais, que frequentemente inclui conectores com a principal função de transferir forças de cisalhamento, assim como impedir a separação vertical entre o perfil metálico e o concreto, movimento conhecido como *uplift* (Tristão, 2002).

A relação da força aplicada e tensão de cisalhamento no conector, assim como o deslocamento relativo entre o aço e o concreto, são aspectos de grande importância para o dimensionamento estrutural e pode ser obtida por meio de ensaios experimentais denominados *push-out*. Esse ensaio é normatizado pela EN 1994-1-1 (2004) e é a referência para as modelagens realizadas neste estudo.

De acordo com Soares (2019), ensaios experimentais requerem um alto investimento financeiro, profissionais qualificados e laboratórios bem equipados. Assim, trabalhos numéricos via métodos computacionais se tornam uma opção vantajosa para se realizar a simulação de sistemas e suas respectivas análises. Uma vez definida a modelagem, pode-se trabalhar com variações de materiais, geometrias e carregamentos de forma mais viável quando comparada aos ensaios experimentais, resultando em economia de tempo e de recursos financeiros.

Neste trabalho são analisados comportamentos de modelos considerando dois tipos de conectores de cisalhamento disponíveis no mercado. De interesse de calculistas e construtores, possuem formas distintas de instalação que possibilitam ampliar as estratégias de projeto e se adaptar às necessidades construtivas.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a resistência ao cisalhamento e o comportamento de conectores do tipo Hilti X-HVB em vigas mistas de aço e concreto via Método dos Elementos Finitos, a partir de um modelo utilizando conectores do tipo *stud bolt*.

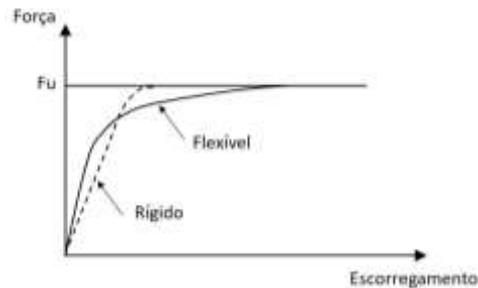
## 3. CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), uma ligação é denominada mista quando a laje de concreto participa da transmissão do momento fletor de uma viga mista para um pilar ou para outra viga, também mista, no vão adjacente. Esta norma define a aplicação de conectores de cisalhamento dos tipos

*stud bolt* e perfil U laminado ou formado a frio com os comprimentos mínimos e premissas para ligação assim como os requisitos para solda.

Crisinel e Clénin (1985) descrevem a construção do primeiro grande edifício de estrutura metálica na Suíça: com 3 pisos mistos e conectores Hilti HVB 105, foi montada em 45 dias em condições climáticas desfavoráveis que não prejudicaram a fixação dos conectores, considerado um marco de economia de tempo à época.

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados como rígidos ou flexíveis em função de sua resposta ao cisalhamento longitudinal. Tal informação é considerada em estudos como Alva (2000), Kotinda (2006) e Assunção (2018) para avaliação do comportamento do sistema diante da aplicação do carregamento. A Figura 1 ilustra o comportamento dos conectores.

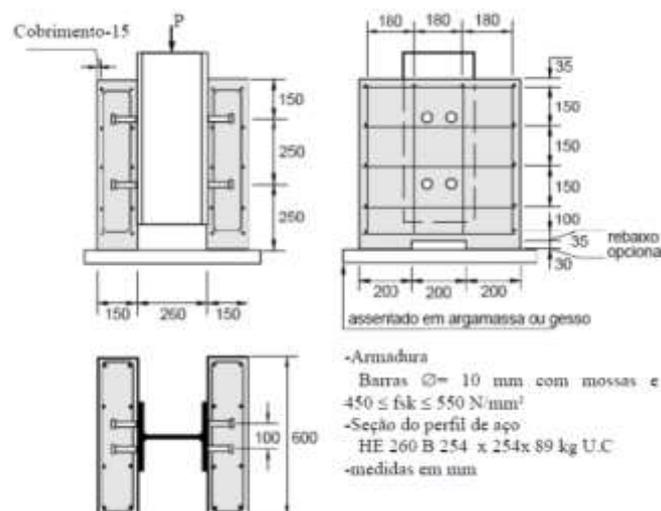


**FIGURA 1:** Diagrama força x deslocamento por escorregamento relativo aço-concreto.

**FONTE:** Adaptado de Kotinda (2006).

### 3.1 ENSAIO PUSH-OUT

O ensaio de cisalhamento direto é padronizado na norma europeia para cálculo de estruturas mistas de aço e concreto, a EN 1994-1-1 (2004). Ainda conforme tal norma, para cada incremento de carga é medida a relação força x deslocamento relativo entre o perfil e a laje e, a partir desses dados, traça-se um gráfico que ilustra o comportamento do modelo e a ductilidade dos conectores. Neste ensaio, também pode-se verificar o afastamento entre a laje e o perfil de aço, o chamado movimento *uplift*, como apresentado nos estudos de Barbosa (2016) e Assunção (2018). O detalhamento desse ensaio está representado na Figura 2.



**FIGURA 2:** Detalhamento do ensaio *push-out*.

**FONTE:** Adaptada de EN 1994-1-1 (2004).

Na literatura encontram-se trabalhos com tipos de conectores, quantidades, posições e geometrias diferentes, como para o conector do tipo *crestbond* por Silva (2013), *perfobond* por Assunção (2018), *stud bolt* por Tristão (2002) e barras circulares por Barbosa (2016).

### 3.2 CONECTORES

O primeiro modelo de conector utilizado foi o *stud bolt*, que possui as vantagens de alta produtividade, boa ancoragem e facilidade para disposição da armadura de flexão (Mahdi *et al.*, 2012). Porém, possui baixa resistência à fadiga e requer um gerador de alta potência para execução da solda (Barbosa, 2016).

O segundo modelo de conector, Hilti X-HVB, é fixado com prego zincado. Pode ser usado em quaisquer condições climáticas e não precisa de energia na obra para sua montagem, reduzindo, assim, os custos de instalação, conforme indicado no catálogo de produtos (Hilti, 2022). Na Figura 3 verifica-se os dois tipos de conectores.



[a] tipo *stud bolt*



[b] tipo Hilti X-HVB

**FIGURA 3:** Uso dos conectores.

**FONTE:** [a] Stud Bolt System (2022); [b] Hilti (2022).

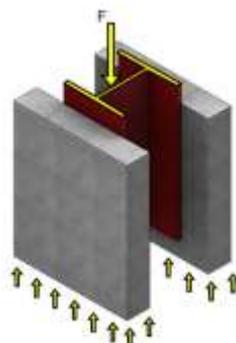
Segundo Chater (2015), o conector não soldado Hilti foi ensaiado pela primeira vez em 1985 por Michel Crisinel, quando sua utilização era incipiente e visava superar dificuldades na soldagem do *stud bolt* e de suprimento de energia elétrica nas obras. Ainda conforme o autor, os resultados dos ensaios indicaram que o comportamento desse conector é muito similar ao do *stud bolt*.

### 4. METODOLOGIA

Foi utilizado o *software* ANSYS: um programa de elementos finitos que permite realizar simulações de produtos e processos que envolvem diversos ramos da Engenharia. Trabalhos como os elaborados por Silva (2013), Chater (2015) e Tristão (2002) serviram como referência para definição da estratégia de análise e comparação de resultados. Para definição dos elementos finitos, foram consultados os estudos de Tristão (2002), David (2007), Cruz (2011), Silva (2013) e Soares (2019).

#### 4.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A Figura 4 mostra o modelo *push-out* e a área de aplicação do carregamento destacada em amarelo no topo do perfil metálico.



**FIGURA 4:** Imagem 3D do modelo *push-out* com aplicação da carga.

A Figura 5 ilustra a posição dos conectores para os modelos estudados, que foram nomeados como Stud Eixo, Hilti Eixo e Hilti Mesa, respectivamente. Os volumes do perfil metálico, conectores e laje de concreto foram criados separadamente por meio de blocos, de acordo com seus respectivos materiais, a partir das coordenadas dos vértices de cada volume.

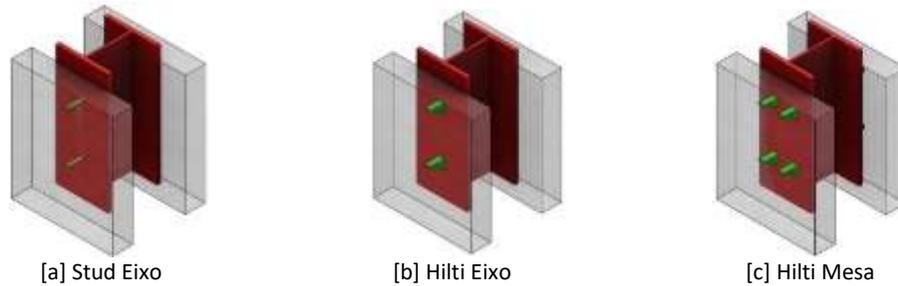


FIGURA 5: Modelos estudados.

O primeiro modelo, Stud Eixo, foi elaborado com o objetivo de verificar as configurações e parâmetros do modelo numérico desenvolvido a partir da comparação com os resultados encontrados e analisados por Tristão (2002). A estratégia de utilizar um modelo como referência para comparação de resultados entre diferentes conectores também foi utilizada por Chater (2015), que estudou o conector do tipo treliçado. No segundo modelo desenvolvido, Hilti Eixo, foram utilizados dois conectores em cada mesa do tipo X-HVB 80, na mesma posição do *stud bolt*. Desta forma, é possível comparar o comportamento do conector Hilti ao do *stud bolt*, modelo mais amplamente utilizado na indústria (Chater, 2015 e Kotinda, 2006). No terceiro modelo, Hilti Mesa, foram usados quatro conectores em cada mesa para verificar o comportamento do sistema diante do aumento de rigidez devido ao número duplicado de conectores. Na Figura 6 estão ilustradas as dimensões e posicionamento dos conectores nos modelos. Para o modelo Hilti Eixo, foram mantidas as mesmas posições dos conectores do modelo Stud Eixo.

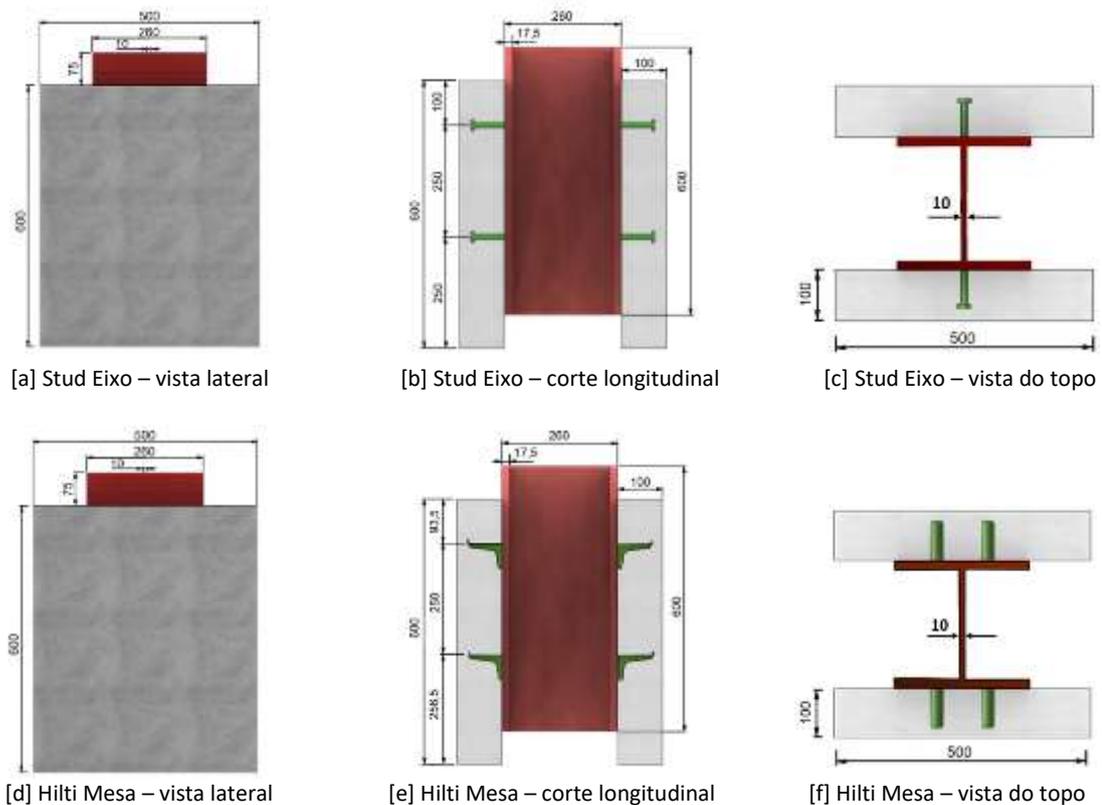


FIGURA 6: Detalhes de cada modelo (dimensões em mm).

A modelagem foi elaborada com apenas um quarto do sistema, aproveitando-se da simetria em dois eixos perpendiculares entre si, utilizando o comando de simetria do ANSYS, assim como no trabalho realizado por Silva (2013), estratégia que simplifica a modelagem e reduz o tempo de processamento.

Pode-se verificar na Figura 7 os volumes referentes a um quarto das modelagens que foram lançados no ANSYS para as análises numéricas.

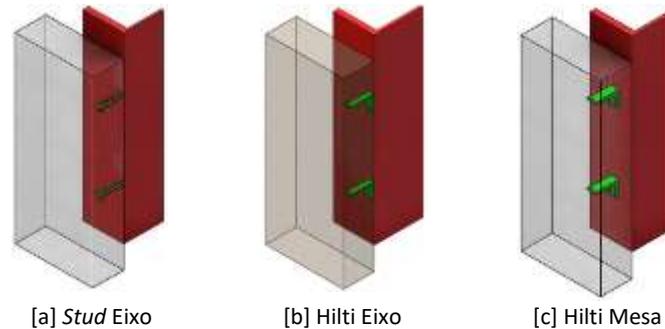


FIGURA 7: Volumes modelados.

#### 4.2 ELEMENTOS FINITOS

Foram utilizados quatro diferentes elementos nos modelos numéricos, que estão disponíveis na biblioteca interna do ANSYS (2023), sendo o Solid185 aplicado nos volumes do perfil metálico e conectores, o Solid65 no volume do concreto, o par de contato Targe170 e Conta174 na interface do concreto com a mesa do perfil metálico e o elemento de mola Combin39 na região de ligação entre conectores e o concreto.

#### 4.3 DADOS DOS MATERIAIS

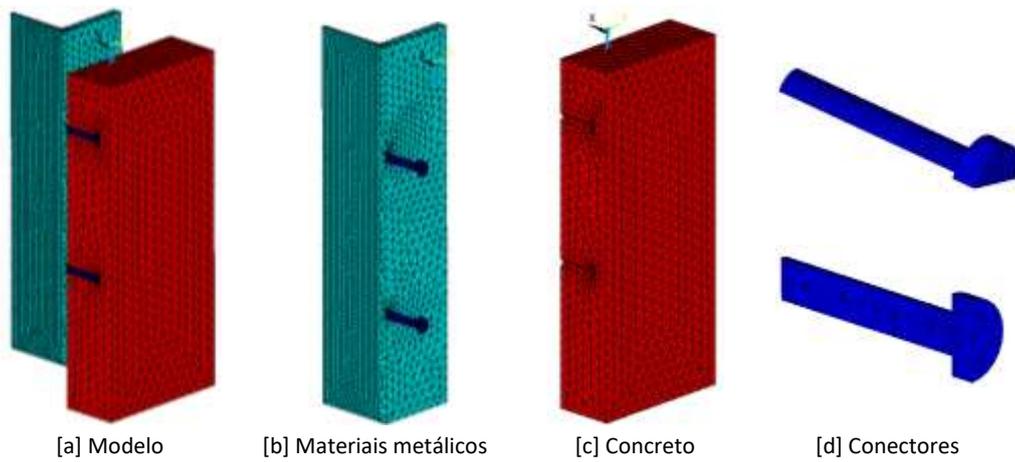
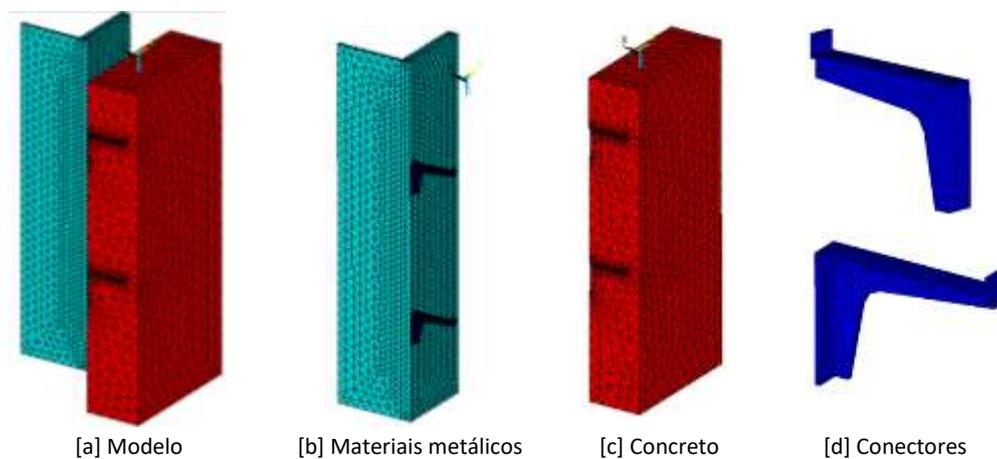
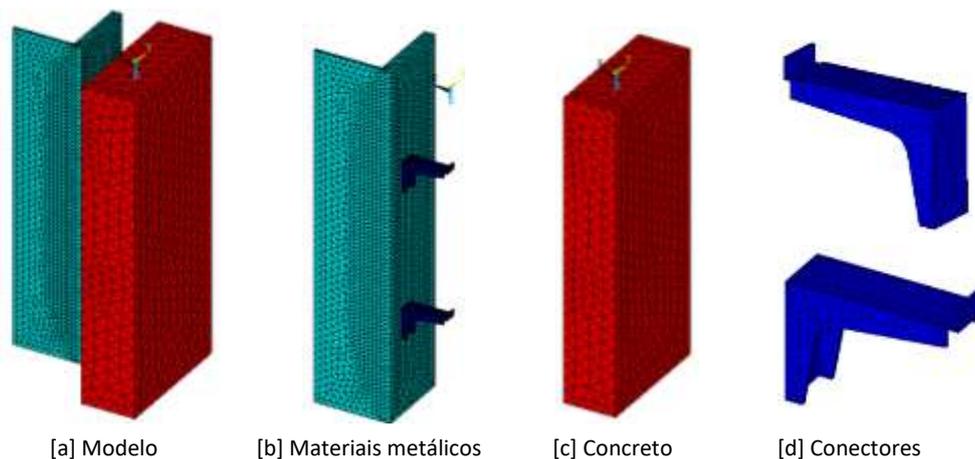
As características de cada material foram lançadas no ANSYS conforme propriedades dos materiais adotados. A armadura foi simulada por meio de taxas, calculadas de acordo com a relação entre a área de aço e a área de concreto. As propriedades dos materiais metálicos estão indicadas na Tabela 1.

TABELA 1: Propriedades dos materiais metálicos				
	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão Última (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
<i>Perfil HPM 260</i>	250	400	205000	0,3
<i>Conector Stud bolt</i>	400	496	200000	0,3
<i>Conector X-HVB</i>	345	450	200000	0,3
<i>Armadura</i>	500	550	210000	0,3

Para o concreto foi indicado o módulo de elasticidade  $E = 27820$  MPa, coeficiente de *Poisson*  $\nu = 0,2$  e resistência característica à compressão  $f_{ck} = 17,12$  MPa, conforme Tristão (2002).

#### 4.4 MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS

As malhas foram geradas de maneira automática em formato tetraédrico, inserindo-se elementos com nível de refinamento adequado para cada região dos volumes. Este processo é feito de forma criteriosa com maior densidade de elementos nas áreas de maior interesse para a análise e para melhor aproximação dos resultados da modelagem ao real. A Figura 8 ilustra as malhas do modelo Stud Eixo; a Figura 9, as do modelo Hilti Eixo; e a Figura 10, as do modelo Hilti Mesa.

**FIGURA 8:** Malhas modelo *Stud Eixo*.**FIGURA 9:** Malhas modelo *Hilti Eixo*.**FIGURA 10:** Malhas modelo *Hilti Mesa*.

Para o modelo *Stud Eixo* foi aplicado o recurso *Glue* em todos os volumes do perfil e conectores, representando-se dessa forma que estão soldados, como de fato é a conexão entre eles. Para os modelos com o conector *Hilti* essa união foi feita apenas entre os volumes que compõem o conector. A simulação da fixação do conector no perfil por meio de pregos foi feita com o acoplamento de alguns nós pertencentes aos dois materiais.

O elemento de mola foi aplicado nas principais interfaces entre o conector e o concreto, na mesma direção do carregamento, seguindo a formulação para definição da rigidez conforme Soares (2019). Na interface entre a mesa e laje de concreto, foi aplicado o elemento de contato de comportamento tipo superfície-superfície, Targe170 e Conta174. Assim, considera-se nessa interface tensões normais de compressão quando há contato entre esses materiais e a separação entre eles em regiões tracionadas.

Quanto às restrições do modelo, foram feitos acoplamentos dos nós das duas extremidades, na parte superior do perfil metálico e na parte inferior da laje de concreto, como pode ser observado na Figura 11. Esses acoplamentos permitem que o carregamento seja aplicado apenas no nó mestre do perfil metálico e a restrição de deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  apenas no nó mestre da laje de concreto.

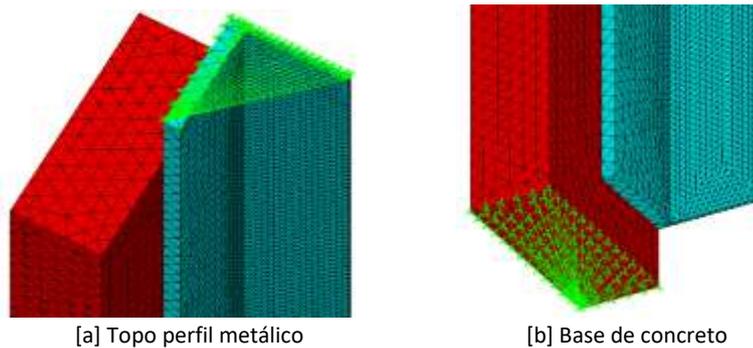


FIGURA 11: Acoplamento de nós.

Foi aplicado o carregamento de 37,75 kN no nó mestre do topo do perfil metálico, configurada em 20 passos para possibilitar a avaliação do sistema considerando não linearidade geométrica. Esse tipo de análise via elementos finitos e de não linearidade geométrica também foi considerada nos estudos de Qureshi, Lam e Ye (2010) e Paknahad *et al.* (2018).

#### 4.5 RESISTÊNCIAS NOMINAIS DOS CONECTORES

De posse dos resultados numéricos, foram feitas comparações com os valores de resistência dos conectores encontrados em referências. Para o conector *stud bolt*, Pfeil e Pfeil (2009) e Salmon, Johnson e Malhas (2009), apresentam o cálculo da resistência ao corte por meio da Equação 1:

$$Q_{Rd} = \frac{Q_n}{\gamma_{cs}} \quad \text{Eq. [1]}$$

em que:

$Q_n$  = resistência nominal (N);

$\gamma_{cs}$  = um coeficiente de valor 1,25 para combinações normais de ações.

Para o conector X-HVB foram utilizados os dados do catálogo técnico do fabricante, Hilti (2021). A Tabela 2 indica a resistência característica de 32,5 kN para o modelo utilizado na modelagem, o X-HVB 80.

TABELA 2: Informações de resistência do conector *Hilti X-HVB*

Conector de cisalhamento	Resistência característica $P_{Rk}$ (kN)	Resistência de projeto $P_{Rd}$ (kN)
X-HVB 40	29	23
X-HVB 50	29	23
X-HVB 80	32,5	26
X-HVB 95	35	28
X-HVB 110	35	28

FONTE: Adaptado de Hilti (2021).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DESLOCAMENTO DO MODELO *STUD* EIXO

Para verificação do modelo numérico desenvolvido nesse trabalho, a curva de deslocamento obtida para o modelo Stud Eixo (nomeada Stud Eixo) foi inserida no gráfico conforme Figura 12, a fim de se comparar o comportamento do sistema. As curvas nomeadas como Experimental 1, Experimental 2 e Experimental 3 se referem a dados experimentais, e a curva PSH-1, ao resultado do modelo numérico, todos utilizados no estudo de Tristão (2002). Verifica-se que a curva referente ao modelo Stud Eixo apresentou comportamento semelhante às outras curvas e assim, consideram-se válidas as análises sendo viável replicar os parâmetros nos próximos modelos deste estudo.

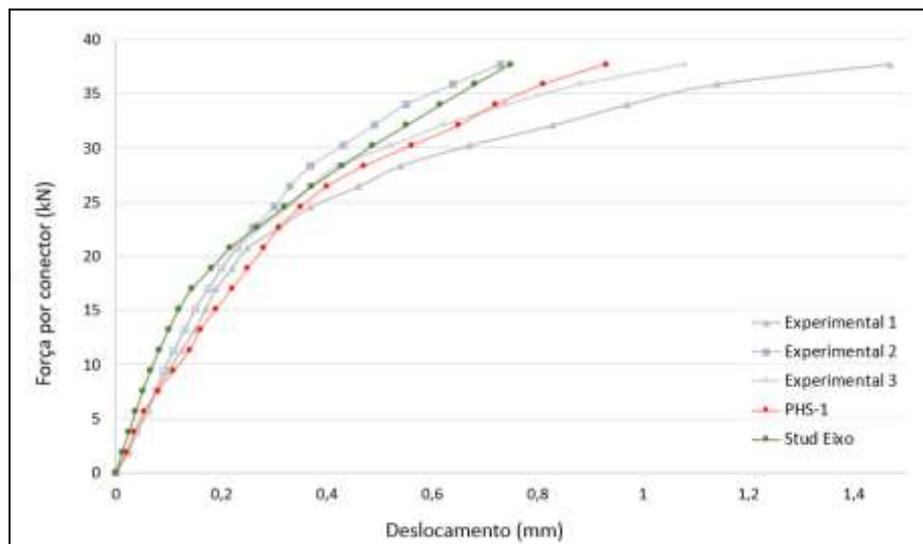


FIGURA 12: Comparação dos resultados do modelo Stud Eixo com a literatura.

### 5.2 RESULTADOS DE TENSÕES DE VON MISES NOS CONECTORES

A Figura 13 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises nos conectores dos modelos.

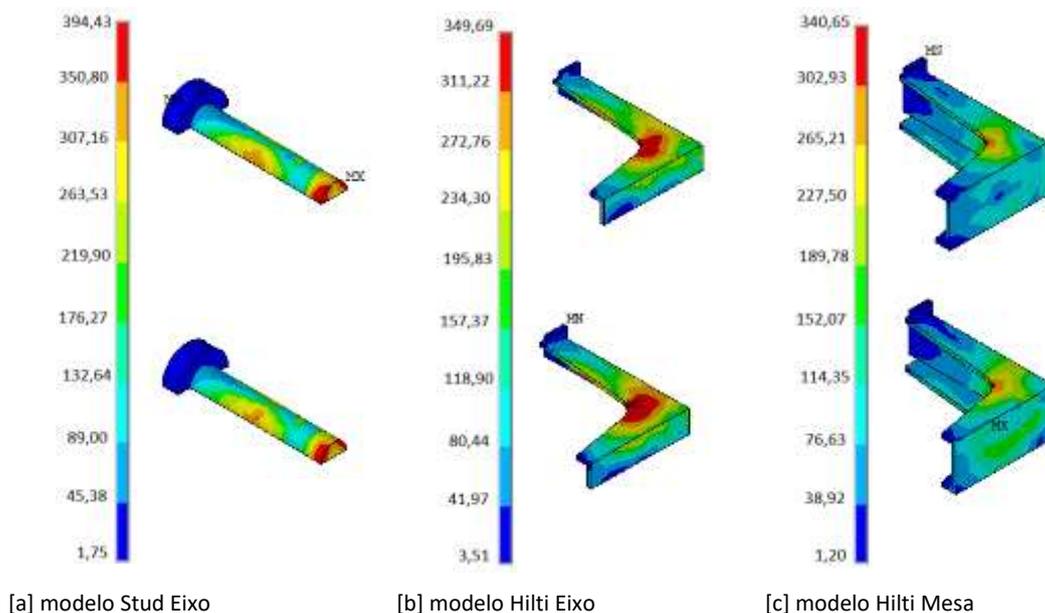
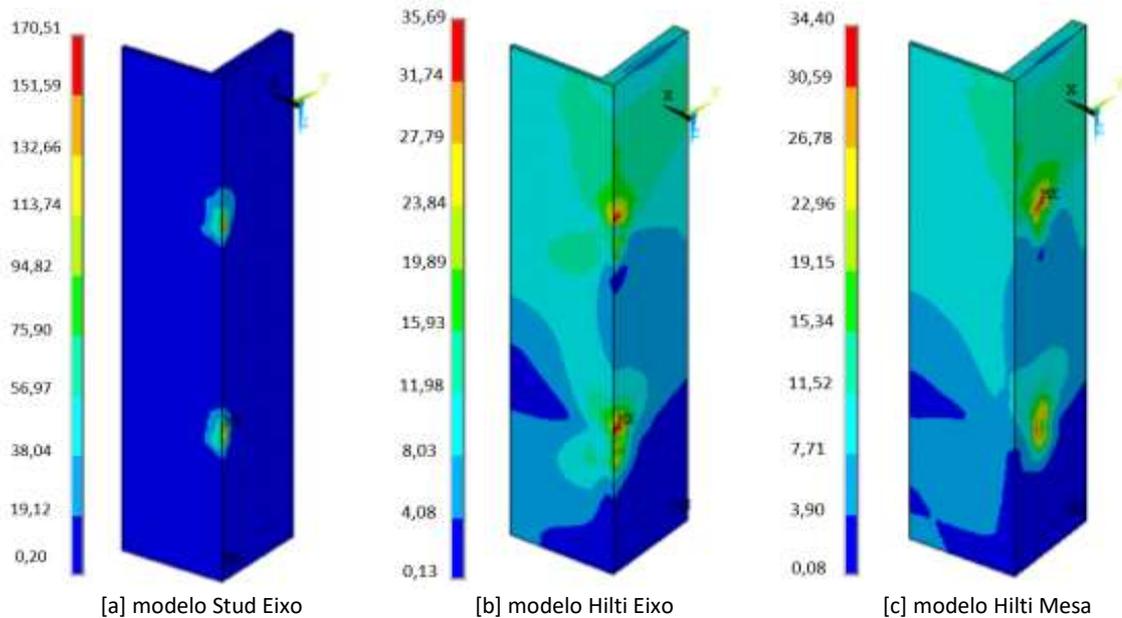


FIGURA 13: Tensões de Von Mises nos conectores (MPa).

Para o modelo Stud Eixo, a maior tensão no conector foi de 403,3 MPa, ultrapassando a tensão de escoamento de 400 MPa, indicada na Tabela 1. Para o modelo Hilti Eixo, a maior tensão no conector foi de 349,3 MPa, ultrapassando a tensão de escoamento de 345 MPa indicada por North American Product Technical Guide (Hilti, 2022). Já no modelo Hilti Mesa, a maior tensão no conector foi de 336,57 MPa, não alcançando a tensão de escoamento de 345 MPa, indicada pelo referido guia (Hilti, 2022), o que indica a manutenção do regime linear elástico dos conectores.

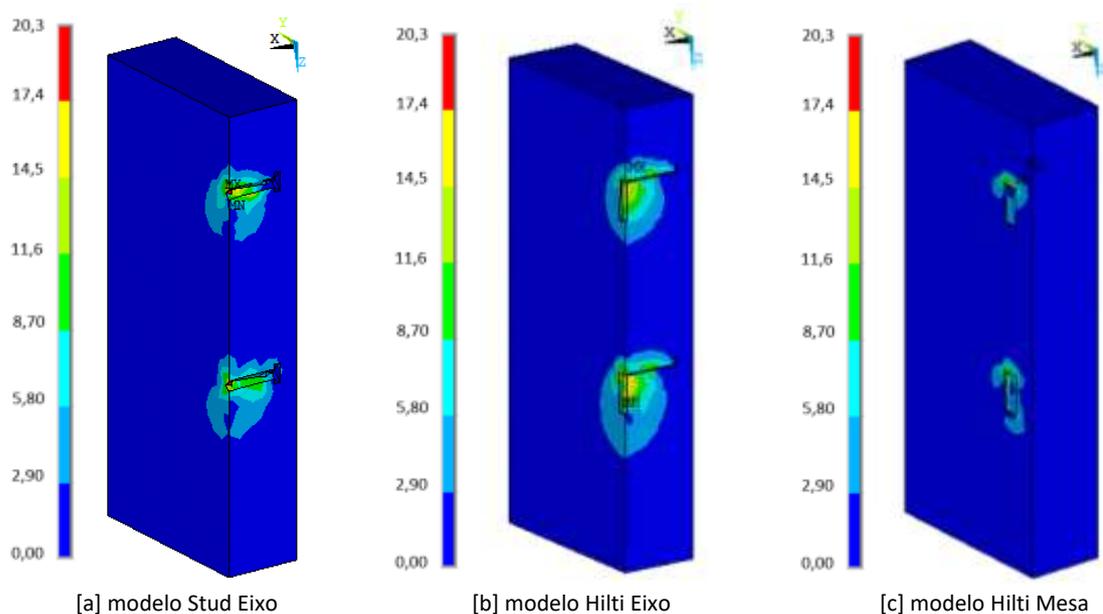
A Figura 14 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises no perfil metálico dos modelos.



**FIGURA 14:** Tensões de Von Mises no perfil metálico (MPa)

Verifica-se que em nenhum dos modelos o perfil metálico alcançou a tensão de escoamento de 250 MPa, sendo os valores máximos de 180,79 MPa para o modelo Stud Eixo, 23,66 MPa para o modelo Hilti Eixo e 19,08 MPa para o modelo Hilti Mesa, mantendo-se no regime linear elástico.

A Figura 15 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises na laje de concreto dos modelos.



**FIGURA 15:** Tensões de Von Mises no concreto (MPa)

Para o modelo Stud Eixo, a maior tensão de compressão do concreto foi de 16,07 MPa, logo não atingiu a resistência de 17,12 MPa, indicando que foi mantida a integridade do concreto. Já para o modelo Hilti Eixo, a maior tensão de compressão do concreto foi de 19,33 MPa, ultrapassando a resistência de 17,12 MPa, portanto houve uma possível ruptura do concreto. Para o modelo Hilti Mesa, a maior tensão de compressão do concreto foi de 14,26 MPa, não atingindo a resistência de 17,12 MPa, indicando que foi mantida a integridade do concreto.

Estes valores indicam que o uso de apenas dois conectores Hilti alinhados promove uma concentração de tensões potencialmente danosa à estrutura.

### 5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CONECTORES

Na Figura 16, mostra-se a comparação da relação da Força x Deslocamento para os conectores estudados. Observa-se que o modelo Stud Eixo admite maiores deslocamentos.

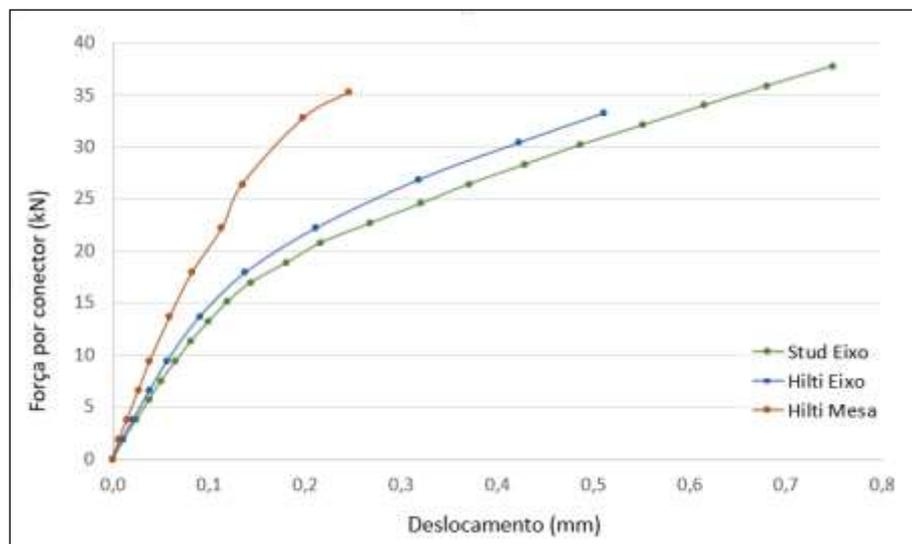


FIGURA 16: Comparação da relação Força x Deslocamento para os conectores estudados

Para o modelo Stud Eixo, houve convergência numérica de acordo com o comportamento do conector até o último passo de carregamento de 37,75 kN, representando o comportamento de um conector flexível, conforme indicado na Figura 1 e em estudos de Tristão (2002), Kotinda (2006) e Barbosa (2016). Já o modelo Hilti Eixo apresentou convergência numérica até 33,28 kN, também indicando comportamento flexível Hilti (2021). Nota-se que os deslocamentos nesses dois casos são semelhantes ao longo da curva de carregamento, o que indica a similaridade do funcionamento dos dois sistemas. O modelo Hilti Mesa, devido à sua maior rigidez, apresentou menor deslocamento e convergência até a carga de 35,27 kN, próximo ao carregamento suportado pelo modelo Hilti Eixo.

A Figura 17 mostra uma comparação da relação das tensões de Von Mises x Força aplicada para os conectores estudados. Verifica-se que as curvas dos modelos cujos conectores estão posicionados no eixo têm comportamentos semelhantes entre si. Neles, o início do escoamento acontece em grandezas de carregamento próximas a 23 kN, quando não há mais acréscimo de tensões nos conectores. Já no modelo Hilti Mesa foram geradas tensões menores para os mesmos carregamentos. Ele possui o dobro de conectores

e alcançou tensões próximas ao escoamento na carga de 35 kN devido à melhor distribuição de tensões entre eles. Um comportamento similar para o conector *stud bolt* foi observado no estudo de Tristão (2002).

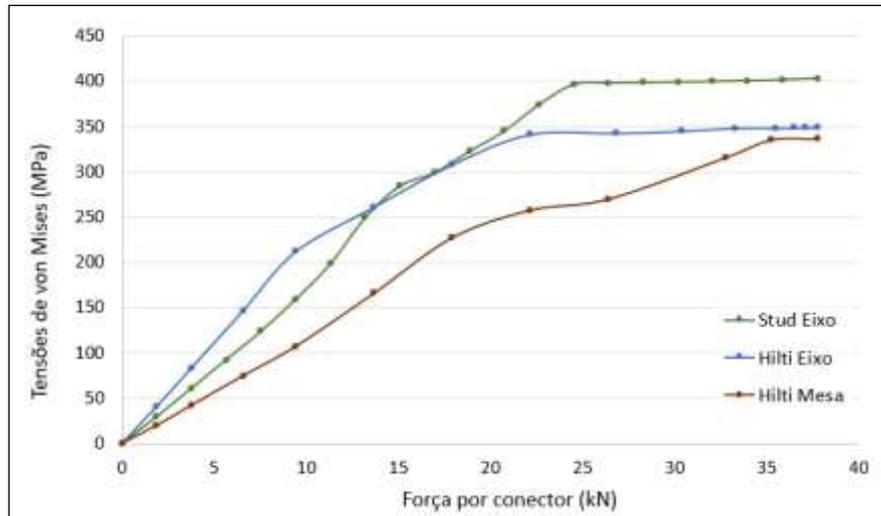


FIGURA 17: Comparação da relação Tensão x Força aplicada para os conectores estudados

Para avaliar o efeito *uplift*, foram verificados os deslocamentos no sentido transversal, que refletem o deslocamento entre laje de concreto e o perfil metálico, no sentido perpendicular à interface desses dois materiais, além dos deslocamentos do conector no sentido do carregamento. Pode-se considerar que esses deslocamentos são coerentes com os observados por Barbosa (2016), Assunção (2018) e Tristão (2002). Os valores máximos encontrados são apresentados na Tabela 3, assim como as maiores tensões de Von Mises.

TABELA 3: Valores máximos nos nós dos modelos

	Tensão de von Mises no Concreto (MPa)	Tensão de von Mises no Conector (MPa)	Deslocamento do Conector (mm)	Deslocamento transversal entre o perfil e laje (mm)
<b>Stud Eixo</b>	16,07	403,33	0,749	0,012
<b>Hilti Eixo</b>	19,33	349,25	0,539	0,009
<b>Hilti Mesa</b>	14,26	336,57	0,252	0,008

Observa-se que para o modelo Hilti Eixo foram alcançadas as tensões de resistência dos materiais concreto e aço do conector e obtiveram-se valores de deslocamentos intermediários dentre os modelos estudados. O modelo Hilti Mesa foi o único em que as solicitações foram inferiores às resistências características de todos os materiais. As resistências dos materiais metálicos estão indicadas na Tabela 1 e a resistência característica à compressão do concreto considerada é de 17,12 MPa.

#### 5.4 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS COM REFERÊNCIAS DE RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO

A partir de dados da geometria do conector e das propriedades dos materiais, tem-se a resistência ao corte do conector *stud bolt*  $Q_{Rd} = 31,07 \text{ kN}$ . Na análise numérica verifica-se que, aproximadamente a partir da carga de 32 kN, o conector alcança a tensão de escoamento de 400 MPa havendo coerência entre esses dois resultados.

Encontrou-se convergência para o modelo Hilti Mesa até a tensão de 35,27 kN. Os resultados mostraram que, na carga correspondente à resistência indicada pelo fabricante, não se alcançou o escoamento. Já no modelo Hilti Eixo, o escoamento ocorreu na carga de 30,4 kN, valor inferior à resistência

característica indicada pelo fabricante, mas coberto pelo fator de segurança, estando de acordo com a resistência de projeto.

Conclui-se então que, para o conector Hilti, os valores de resistência encontrados na análise numérica atendem a indicação do fabricante, referência utilizada na prática por projetistas e construtoras.

## 6. CONCLUSÕES

As curvas de deslocamentos para os três modelos desenvolvidos tiveram comportamentos semelhantes, sendo que para o modelo Hilti Mesa houve um menor deslocamento final, como era de se esperar de um modelo mais rígido com maior resistência.

Em termos de tensões de Von Mises, os modelos com conectores no eixo da alma do perfil metálico tiveram resultados similares e ambos alcançaram a tensão de escoamento do conector, sendo 400 MPa para o *stud bolt* e 345 MPa para o X-HVB. O modelo mais rígido apresentou menores tensões nos conectores devido à maior possibilidade de distribuição das mesmas.

Quanto ao concreto, os modelos com conectores no eixo da alma apresentaram maiores tensões de Von Mises, alcançando valores próximos ao  $f_{ck}$  de 17,12 MPa. Para o modelo mais rígido, devido à melhor distribuição das tensões, o concreto sofreu menores solicitações durante as etapas de carregamento.

Os resultados de resistência obtidos nos três modelos também foram comparados analiticamente com referências normativas, literatura e dados do fabricante, utilizadas no desenvolvimento de projetos e por construtoras, identificando coerência e conformidade em todos os valores encontrados.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Instituto Federal de Minas Gerais - campus Ouro Preto pelo suporte à pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ANSYS. **User's Manual for 2023 R2**. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA, 2023.

ABNT - 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: ABNT, 2008.

ASSUNÇÃO, B. C. **Análise experimental de conectores de cisalhamento tipo T-Perfobond modificado**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BARBOSA, W. C. S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CHATER, L. **Estudo numérico e experimental de conectores de cisalhamento feitos de vergalhão Ca-50 para uso em estrutura mista aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CRISINEL, M.; CLÉNIN, D. Connecteurs pour construction mixte acier-béton. **Revista Ingénierus et Architectes Suisses**, n. 22, p. 419-423, 1985.

CRUZ, B. C. **Avaliação numérica de ensaios *push-out* com conectores de cisalhamento tipo pino e perfobond**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

DAVID, D. L. **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**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EN 1994-1-1: **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. Brussels: EN 1994-1-1, 2004.

HILTI. **Hilti X-HVB Data Sheet. Shear connector**. p. 9. 2021.

HILTI. **Produtos**. Disponível em <<https://www.hilti.com.br/products>>. Acesso em: 06 mai. 2022.

\_\_\_\_\_. **North American Product Technical guide**. Hilti, Inc. p. 242. 2022.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MAHDI S.; SHARIATI, A.; RAMLISULONG, N. H.; MELDISUHATRIL. **Various types of shear connectors in composite structures: a review**. Department of Civil Engineering - University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, 2012.

MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

PAKNAHAD M.; SHARIATI M.; SEDGHI Y.; BAZZAZ M.; KHORAMI M. Shear capacity equation for channel shear connectors in steel-concrete composite beams. **Steel and Composite Structures**, n. 4, p. 483-494, 2018.

PFEIL, W., PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Livros LTC (Técnicos e Científicos Editora Ltda), 2009.

QURESHI J.; LAM D.; YE J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 67, p. 706-719, 2010.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. **Steel structures: design and behavior**. Fifth edition. New Jersey. Pearson Education, Inc., 2009.

SILVA, M. A. **Análise experimental da resistência ao cisalhamento do conector Hilti X-HVB em vigas mistas de aço e concreto**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SILVA, H. P. **Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento do tipo crestbond**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOARES, L. C. **Análise via método dos Elementos Finitos de pisos mistos de pequena altura – SLIM FLOOR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Construções) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SOUZA, F. T.; SOARES, L. C.; PAULA, G. D. Análise via elementos finitos da interface aço-concreto em pisos mistos de pequena altura. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v.6, n. 1, p. 84-92, 2021.

Stud Bolt System. **Serviços de aplicação**. Disponível em <https://studbolt.com.br/servicos-de-aplicacao>>. Acesso em: 05 mai. 2022.

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