

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLEXURAL BEHAVIOR OF DELTABEAM® IN THE SLIM FLOOR SYSTEM

Tainá M. Borghi

Ana Lúcia H. C. El Debs

tainaborghi@usp.br

analucia@sc.usp.br

*University of São Paulo (USP) – São Carlos School of Engineering (Dept. of Structural Engineering)
Av. Trabalhador Saocarlense, 400, 13566-590, São Carlos/ São Paulo, Brasil*

Abstract. The composite structures take the advantages of steel and concrete, creating a more resistant system and with an easier assembly. These structures comply the current demands of civil construction, saving time and consequently reducing costs. Therefore, new composite structures have being studied and established worldwide, such as the slim floor beam. This system consists in steel beams and concrete or composite slabs, reducing the total height of the floor by introducing the slab at the height of the beam. It is a system that provides a range of possibilities, it may vary the type of steel profile employed, can be the Deltabeam®. Thus, a numerical study of this slim floor typology was carried out, aiming to compare its flexural behavior with the most usual typology, the Asymmetric Slimflor Beam. The study is part of an extensive theoretical-numerical research in development at the University of São Paulo (USP), which aims to elaborate a study of slim floor typologies. The finite element modeling is presented as an alternative to conducting experimental investigations, due to its lower demand for financial, human and time resources. The ABAQUS® was the software employed in the simulations, and were used experimental and numerical studies to calibrate the model, carried out by the National Technical University of Athens in partnership with Peikko, which holds the patent of Deltabeam®. From the results of the simulations, it was possible to conclude that the characteristics of Deltabeam® contribute to a greater rigidity and flexural strength of the system.

Keywords: Composite Structures. Slim floor. Finite element modeling. Deltabeam®.

1 Introdução

As estruturas mistas de aço e concreto se caracterizam pela união entre perfis metálicos e o concreto através de conectores de cisalhamento, beneficiando-se com as qualidades desses materiais, tanto relativas à capacidade resistente, quanto à aspectos construtivos, funcionais e estéticos. Essas estruturas conseguem atender à demanda atual da indústria da construção civil, que busca alternativas para deixar as obras mais eficientes, com tempo reduzido de montagem e atrativas economicamente. Assim, além de aproveitar a resistência do aço à tração e do concreto à compressão, as estruturas mistas também proporcionam a redução do peso próprio do sistema estrutural, capacidade de vencer grandes vãos sem a necessidade de escoramento, atenuação da flambagem e a maior proteção contra o fogo e corrosão.

A construção mista em geral, como vigas, lajes e pilares, já está bem consolidada no Brasil, o que abre espaço para novas pesquisas em elementos estruturais. Nesse contexto, se encaixa o piso misto de pequena altura, também conhecido como *slim floor*, que tem o intuito de reduzir a altura total do sistema, através do acoplamento da laje de concreto na altura da viga metálica. Na “Figura 1” fica evidente a diferença construtiva entre o sistema de piso misto convencional e o piso misto de pequena altura.

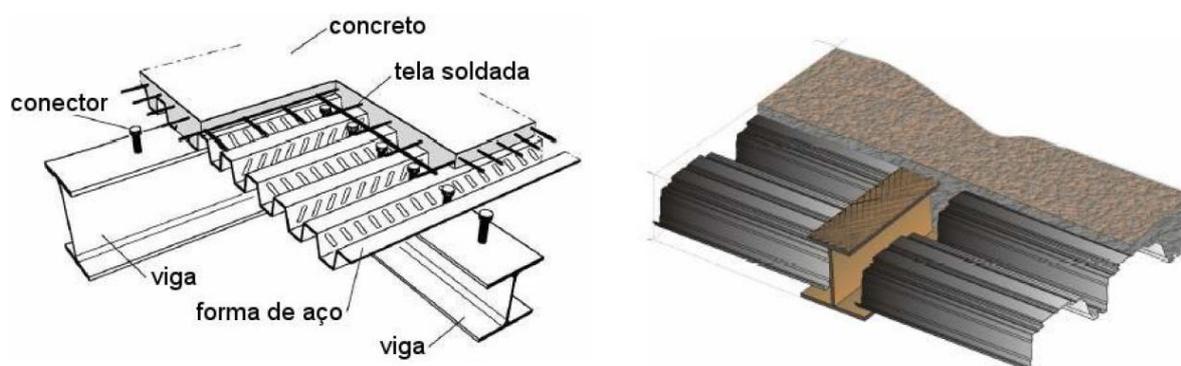


Figura 1. Piso misto (a) convencional e (b) de pequena altura [1]

Além das características já conhecidas das estruturas mistas, o *slim floor* possui vantagens únicas. A principal delas é o fato da viga metálica estar revestida pelo concreto, o que confere ao sistema um aumento da resistência ao fogo, da rigidez e diminuição das instabilidades locais [2]. Outras vantagens também podem ser citadas, como o aumento da capacidade resistente, velocidade de construção, maior segurança e economia de material, redução da mão de obra e do número de vigas secundárias, além de atender às demandas modernas [3].

Apesar de se mostrar bastante atrativo devido às suas vantagens, o piso misto de pequena altura possui estudos incipientes no Brasil, sem normatização no país, e por isso não é muito utilizado. Além disso, a maioria dos perfis metálicos utilizados nesse sistema ainda não são fabricados no Brasil, o que torna a montagem cara e demorada. Assim, esse estudo também tem como objetivo colaborar com a divulgação do conhecimento do *slim floor*, para que futuramente possa ser mais utilizado.

Esse sistema proporciona um grande leque de possibilidades, podendo variar o tipo de laje e viga empregadas ou a posição dos conectores de cisalhamento [2]. Quanto à configuração da laje de concreto, é possível ser do tipo maciça, pré-fabricada alveolar ou com forma de aço incorporada. Dentre as opções de perfis metálicos, os mais utilizados historicamente são as *hat beams*, vigas fechadas com vazios internos, “Fig. 2(a)”; a *Asymmetric Slimflor Beam (ASB)*, composta por uma viga I assimétrica, “Fig. 2(b)”; a *Slimflor Fabricated Beam (SFB)*, formada por uma seção I soldada à uma chapa de aço, “Fig. 2(c)”; e a *Deltabeam®*, viga em formato de delta com aberturas circulares na alma, “Fig. 2(d)”. No presente estudo, as seções metálicas em foco são a *Deltabeam®* e a *ASB*.

A *Asymmetric Slimflor Beam* é um perfil em que a mesa inferior é maior que a superior e que contém ranhuras na face externa da mesa superior, a fim de melhorar a aderência entre o aço e o concreto. A *Deltabeam®* é uma viga com 4 chapas metálicas soldadas entre si e com aberturas na alma. Além disso, as barras de aço passam entre as aberturas, conferindo um comportamento misto mais eficiente quando em contato com o concreto. Assim, o presente trabalho pretende realizar um estudo da

Deltabeam®, e avaliá-la numericamente quanto a flexão, comparando os resultados com os da *Asymmetric Slimflor Beam*.

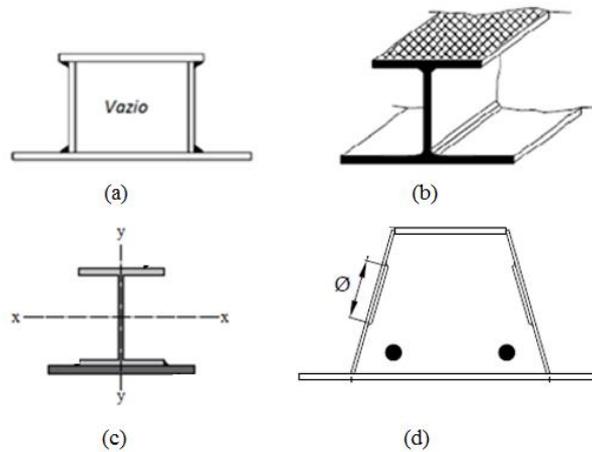


Figura 2. Tipos de perfis metálicos: (a) *hat beams*; (b) ASB; (c) SFB; (d) Deltabeam®

A simulação numérica se apresenta como uma alternativa à realização de testes experimentais, principalmente quando existe a necessidade da confecção de muitos modelos ou de modelos muito refinados. A modelagem exige menor demanda por recursos financeiros, humanos e de tempo, entretanto, para a calibração, se faz necessária a utilização de resultados experimentais realizados previamente. Assim, o programa utilizado nesse estudo foi o ABAQUS® e, no processo de calibração do modelo, foi empregado o trabalho de Peltonen et al. [4].

2 Deltabeam®

A Deltabeam® foi desenvolvida na Finlândia pela empresa Peikko [5], e consiste em uma viga com 4 chapas metálicas soldadas entre si, sendo duas na horizontal e duas inclinadas com aberturas circulares, “Fig. 3”. Além de ser capaz de alcançar até 12 m de vão livre, a Deltabeam® se mostra muito resistente à ação do fogo, sem qualquer proteção adicional e, por ter um ótimo acabamento, não existe conflito com a passagem de tubos de serviços [6]. Além disso, o fato de estar completamente preenchida pelo concreto, inclusive no seu interior, confere à viga uma resistência à flexão maior que nos sistemas *slim floor* convencionais.

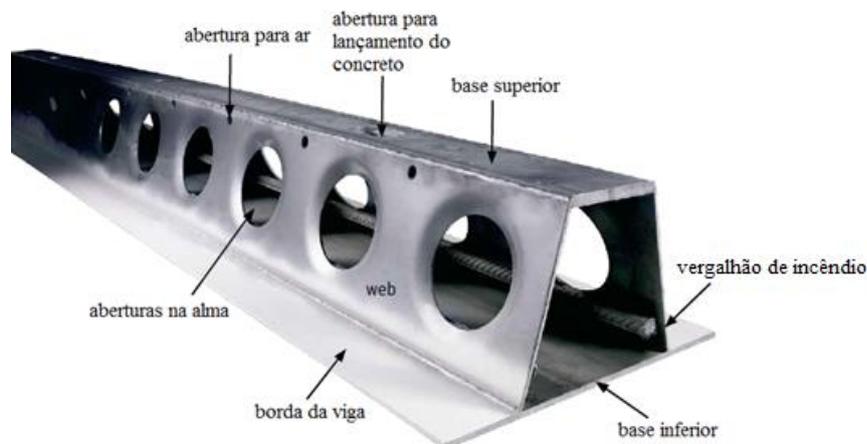
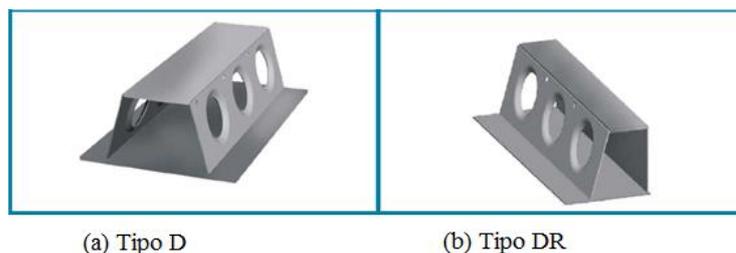


Figura 3. Deltabeam® [6]

A Deltabeam® apresenta duas tipologias, o tipo D e o tipo DR. A viga tipo D é utilizada como viga intermediária, tendo bordas dos dois lados para apoiar as lajes. Já a viga do tipo DR tem uma das almas

vertical e sem aberturas, para ser usada como viga de borda [5]. A “Figura 4” ilustra as duas tipologias, porém o presente trabalho focará a análise na viga do tipo D.



(a) Tipo D

(b) Tipo DR

Figura 4. Tipos de Deltabeam® [6]

Os estudos do perfil metálico Deltabeam® são ainda bastante recentes, e por isso ainda existem muitas lacunas nas pesquisas sobre esse perfil. Em 2012, foi publicado o primeiro trabalho sobre a Deltabeam® com autoria de Nádaský [5], em que foram apresentados requisitos específicos, nos estados limites últimos e de serviço, para a concepção adequada deste sistema. Além disso, foram fornecidas condições de aceitação para vibrações e princípios sobre como alcançar a resistência ao fogo.

Um trabalho para avaliar a resistência ao cisalhamento de perfis Deltabeams® foi elaborado por Leskela et al. [7], comparando testes de cisalhamento realizados no *Technical Research Center of Finland* com um modelo numérico 3D desenvolvido em elementos finitos. A partir desse estudo, chegou-se à conclusão que o modelo numérico está de acordo com o experimental e prediz a resistência ao cisalhamento com bastante precisão [7].

Em continuação ao trabalho anterior, o grupo Peikko, em parceria com a *National Technical University of Athens*, realizou um estudo experimental e numérico sobre o comportamento à flexão do sistema estrutural composto pela Deltabeam®. A partir desse estudo foi possível obter as curvas de deslocamento, valores de deslizamento e padrões de danos das amostras ensaiadas. Percebe-se que os deslizamentos entre o aço e o concreto foram muito pequenos e a resposta estrutural foi bastante benéfica, indicando que tais vigas podem ser implementadas pelos projetistas [4].

Um estudo mais recente sobre a *Deltabeam®* foi realizado por Derkowski e Skalski [8]. Através de uma análise computacional discutiu-se requisitos de projeto, mostrando que todas as condições básicas foram atendidas. Foram apontadas vantagens, como aumentar significativamente o vão e limitar a deformação do elemento durante a montagem, e desvantagens, como redistribuição do momento fletor ao longo do comprimento da viga e a necessidade de grande precisão na montagem [8].

3 Simulação numérica

A simulação numérica é iniciada com a definição de um problema e a criação de um modelo físico, definido em uma geometria. A partir daí são definidas as propriedades dos materiais, a malha e as condições de contorno e carregamento, simplificando e aproximando o modelo por métodos como o de elementos finitos, gerando o modelo numérico final. Essas simplificações são necessárias porque não é possível inserir fielmente todas as características do modelo experimental, adotando-as para reduzir seu custo computacional e não comprometer a precisão do modelo numérico.

A modelagem acontece seguindo três etapas. A primeira é o pré-processamento, definição dos parâmetros necessários para a execução da análise, gerando o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno e de carregamento e a malha de elementos finitos. Posteriormente, tem-se o processamento, a execução em si, através de análises que podem ser lineares, não-lineares físicas ou geométricas, dinâmica, térmica, entre outras. Por fim, o pós-processamento possibilita a visualização gráfica dos resultados, para a comparação com os resultados experimentais.

O desenvolvimento da simulação numérica do presente trabalho foi dividido em duas fases. A primeira foi destinada à realização da calibração do modelo Deltabeam®, ou seja, representar o comportamento de um modelo físico já ensaiado, para que sejam obtidos resultados mais próximos do

real. O estudo utilizado na calibração foi o de Peltonen et al. [4], com geometria mostrada na “Fig. 5”. Em seguida, foi realizada a comparação entre a Deltabeam® e a *Asymmetric Slimflor Beam*, com geometrias padronizadas, “Fig. 6”, e propriedades dos materiais obtidas na fase anterior.

O programa utilizado na simulação numérica foi o ABAQUS®, no qual foram inseridas as características do estudo experimental utilizado na calibração do modelo.

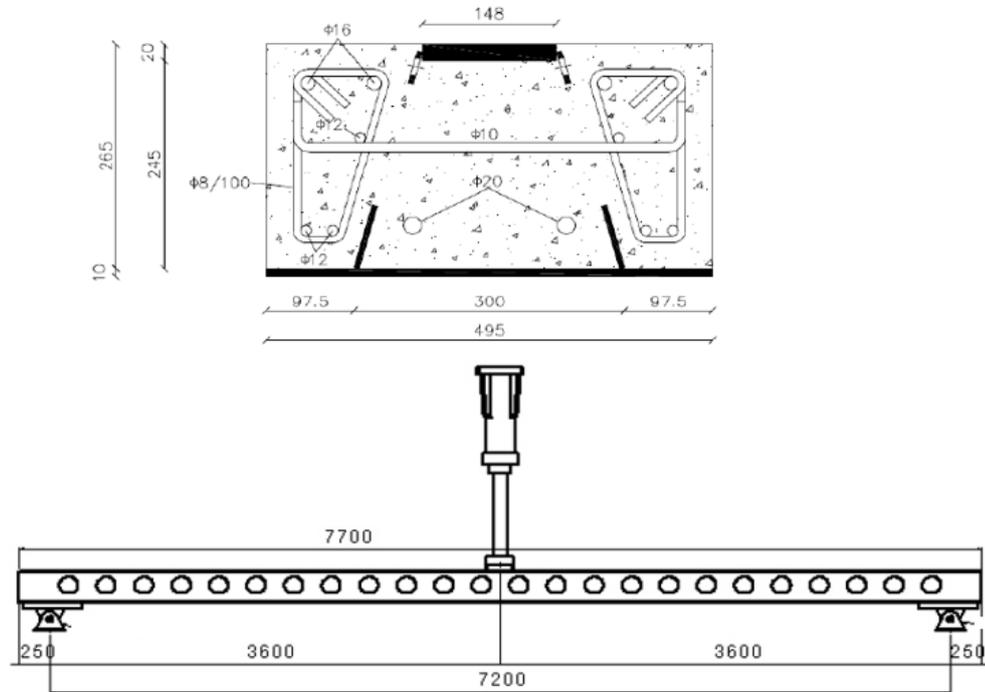


Figura 5. Geometria experimental Peltonen et al. [4]

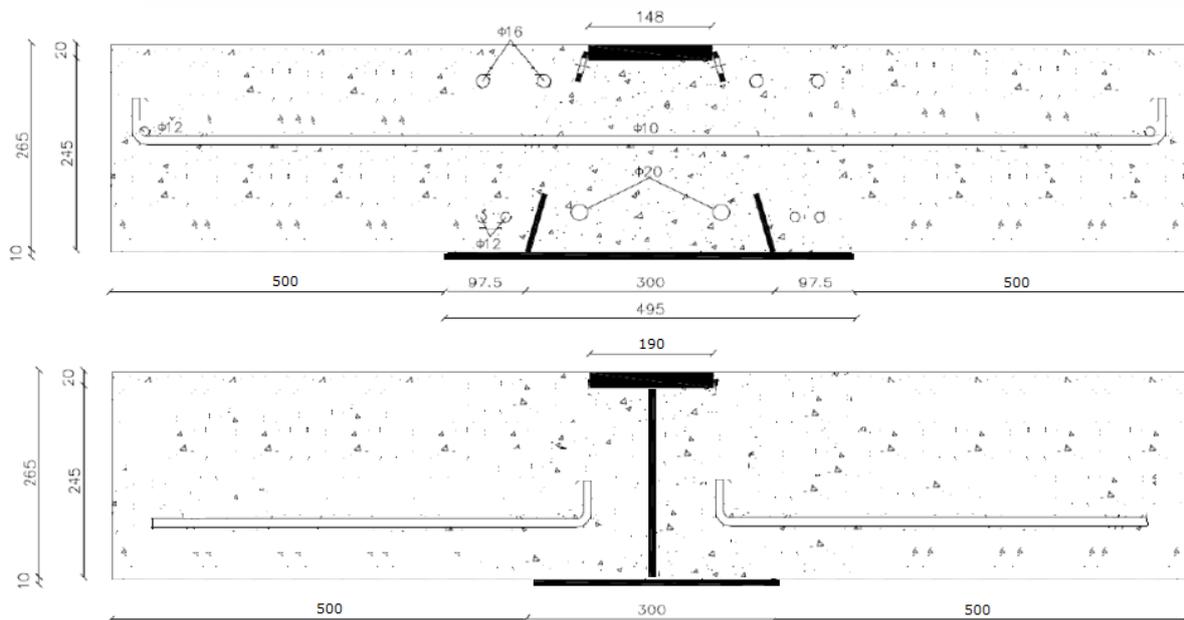


Figura 6. Geometria da Deltabeam® e da ASB utilizadas na comparação

3.1 Propriedade dos materiais e condições de contorno e carregamento

As propriedades utilizadas no estudo de Peltonen et al. [4] foram inseridas no programa, e empregadas tanto no processo de calibração do modelo quanto na fase comparativa, e estão mostradas na “Tabela 1”. As condições de contorno e carregamento foram baseadas nos testes experimentais de calibração do modelo, sendo de uma viga biapoiada, com aplicação do carregamento realizada de maneira incremental em um ponto de aplicação. Como já mostrado anteriormente e visto também na “Figura 7(c)”, no processo de calibração, a viga estava apenas envolvida pelo concreto. Já na fase de comparação, foi adicionada uma laje com propriedades iguais as anteriores, “Fig. 7(a)”. As propriedades utilizadas para a viga metálica e a laje de concreto da ASB, “Fig. 7(b)”, também foram as mesmas do estudo experimental.

Tabela 1. Propriedades dos materiais (MPa)

| Componentes | f_y | f_u | E | f_{cm} | f_t |
|---------------|-------|-------|--------|----------|-------|
| Perfil de aço | 315 | 490 | 150000 | - | - |
| Concreto | - | - | 29710 | 36.2 | 2.78 |

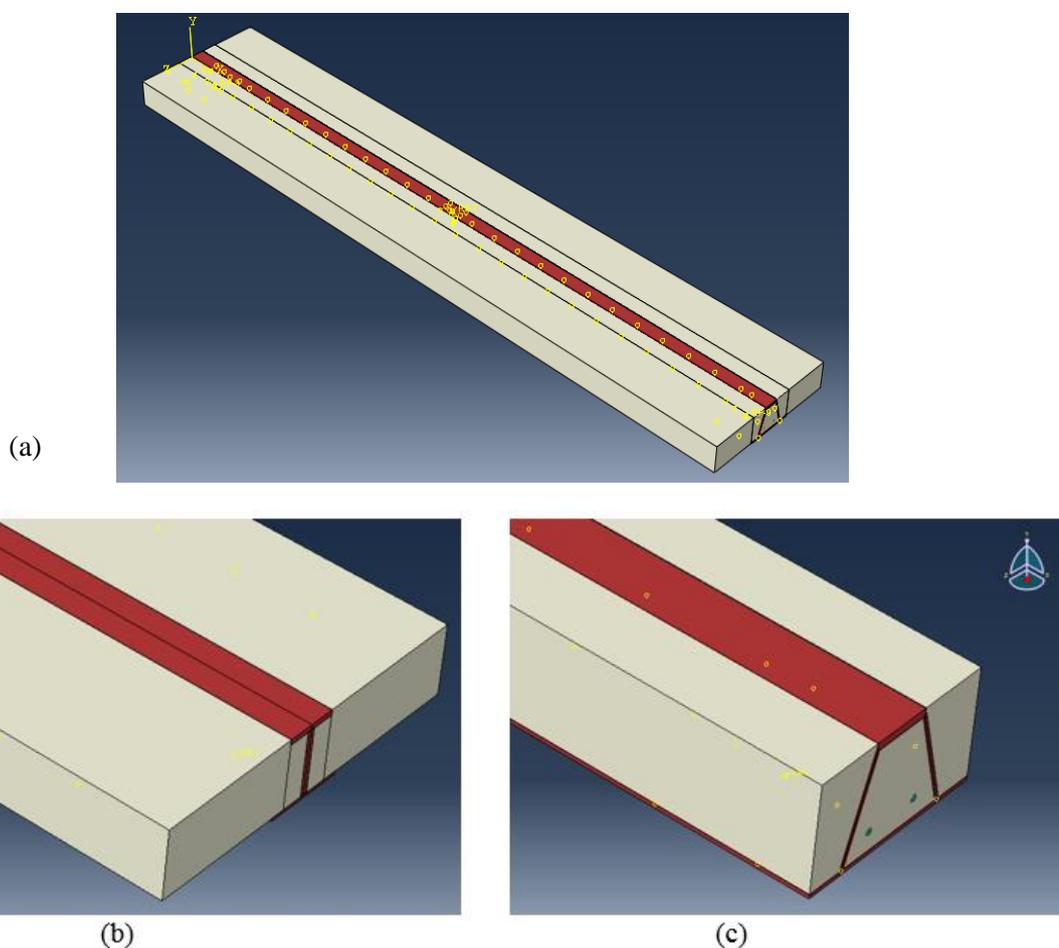


Figura 7. Materiais e condições de contorno e carregamento (a) Deltabeam® na fase de comparação, (b) ASB na fase de comparação e (c) Deltabeam® na fase de calibração

3.2 Elemento finito

O elemento finito a ser utilizado deve ser escolhido de maneira que consiga representar adequadamente o comportamento do componente estrutural. É possível escolher entre os elementos de barra (treliça), viga, chapa, casca e sólido, de modo que apresentem bons resultados e menor custo computacional. Dessa forma, para a modelagem da laje de concreto o elemento finito utilizado foi o

sólido C3D8R, que possui oito nós, com três graus de liberdade por nó e formulação com integração reduzida. Para o perfil de aço foi utilizado elemento de casca tipo S4R, com quatro nós e seis graus de liberdade cada, também com integração reduzida. Já para as barras de reforço, a modelagem foi feita utilizando o elemento de viga B31, dois nós e seis graus de liberdade por nó. Esses elementos finitos estão representados na “Figura 8” e foram utilizados tanto na fase de calibração, quanto na fase comparativa.

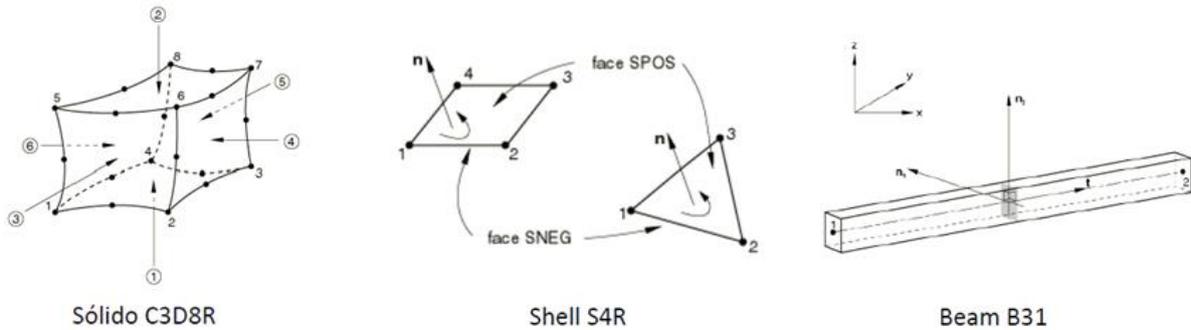


Figura 8. Elementos finitos utilizados na representação do *slim floor* [9]

3.3 Malha

Dois fatores são importantes na definição da malha do modelo. O primeiro deles é o refinamento, pois uma malha mais refinada possibilita resultados mais próximos do real. O segundo fator é a regularização, garantindo que as dimensões de cada elemento sejam aproximadamente iguais. Assim, nas lajes de concreto em que foi utilizado o elemento finito sólido, buscou-se criar uma malha cujos elementos tenham as três dimensões iguais, com tamanho de 50 mm x 50 mm x 50 mm. Para os perfis metálicos, que utilizaram o elemento finito de casca, a malha foi discretizada de forma que os elementos se assemelhem a quadrados, com tamanho de 50mm x 50mm, já para as armaduras o tamanho utilizado foi de 10 mm. As malhas das estruturas podem ser vistas na “Figura 9”.

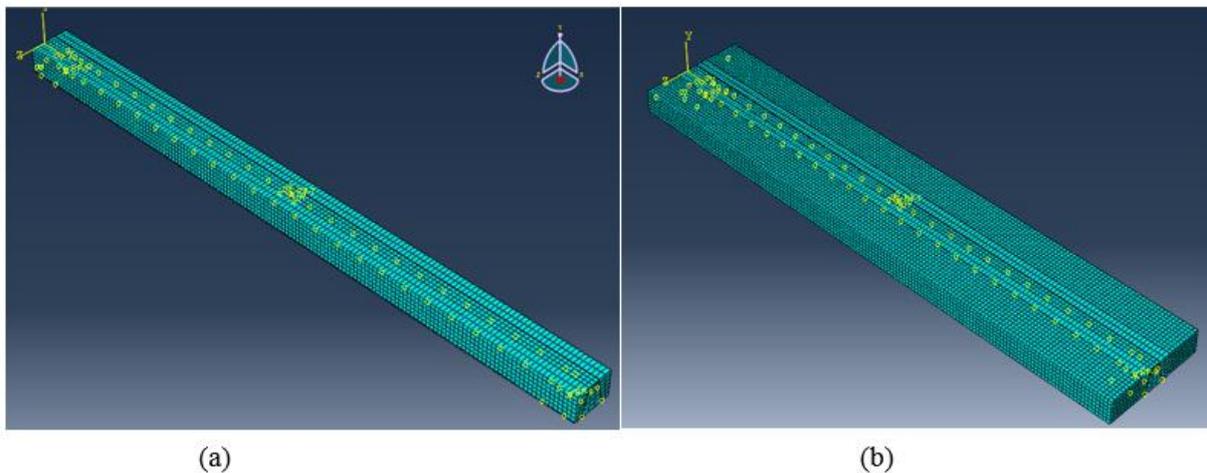


Figura 9. Malha utilizada na discretização na fase de (a) calibração e (b) comparação

3.4 Relações constitutivas e contato entre os componentes

Para uma simulação numérica completa e mais coerente, deve-se considerar o comportamento não-linear dos materiais envolvidos, sendo necessário definir modelos constitutivos que representem essa não linearidade. Assim, através da reprodução do comportamento tensão-deformação, foi adotado o modelo constitutivo bi-linear com encruamento isotrópico para o perfil metálico, sendo elástico-linear até a tensão de escoamento (f_y) e linear com outra inclinação até a tensão limite de resistência (f_u). Para a representação das armaduras, o modelo constitutivo utilizado foi o elasto-plástico perfeito. Ambos os

modelos podem ser vistos na “Figura 10”.

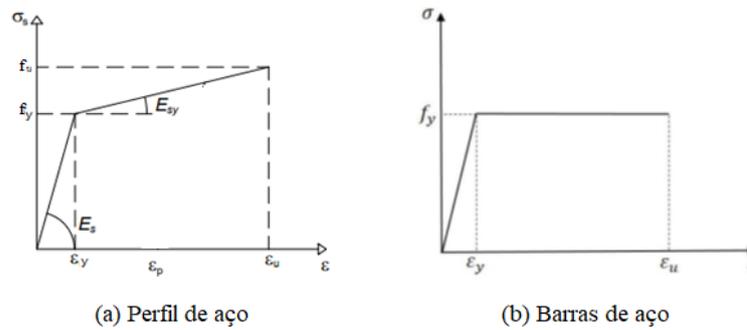


Figura 10. Modelos constitutivos adotados [10]

Na representação da não linearidade física do concreto, o modelo constitutivo utilizado foi o *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). O modelo admite dois mecanismos de falha, a ruptura por tração e o esmagamento por compressão, e emprega uma variável de dano para representar a perda de rigidez do concreto. O comportamento do concreto comprimido e tracionado têm curvas tensão-deformação diferentes, mostrados posteriormente na “Figura 11”, sendo que, para a tração, deve-se levar em consideração o efeito do concreto entre fissuras (*Tension Stiffening*).

Para utilizar o CDP no ABAQUS® são definidos, além do comportamento à tração e à compressão, parâmetros como ângulo de dilatância, excentricidade, relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial, fator de forma e viscosidade. O ângulo de dilatância (ψ) mede a inclinação que o potencial plástico alcança para altas tensões de confinamento. Malm [11] definiu que valores pequenos para o ângulo de dilatância, em torno de 10°, se relacionam à concretos com comportamento frágil, enquanto a adoção de valores altos, por volta dos 40°, representa o comportamento dúctil.

Ensaio experimentais mostram que a superfície de escoamento assume a forma de uma hipérbole próximo do encontro com o eixo hidrostático ($\rho=0,1$). Essa forma assumida pela superfície de escoamento é chamada de excentricidade (ρ) e valores próximos de zero indicam que a função de potencial plástico se aproxima mais rapidamente de uma assíntota.

A relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}) é o parâmetro adotado para descrever o ponto em que o concreto sofre falha devido à compressão biaxial. O quarto parâmetro que deve ser determinado no CDP é o fator de forma (K), utilizado para definir o formato da superfície de falha do concreto. O parâmetro de viscosidade (μ) é utilizado para reparar dificuldades de convergência quando o modelo apresenta degradação da rigidez. Adotar valores pequenos para a viscosidade é mais vantajoso, melhorando a convergência e o tempo de processamento sem comprometer os resultados. Os valores dos parâmetros utilizados no presente trabalho são mostrados na “Tabela 2”, para as duas fases do estudo.

Tabela 2. Parâmetros para o *Concrete Damaged Plasticity*

| Parâmetro | Valor |
|----------------------|--------|
| Ângulo de dilatância | 36° |
| Excentricidade | 0,06 |
| f_{b0}/f_{c0} | 1,16 |
| Fator de forma | 0,6667 |
| Viscosidade | 0,0001 |

A escolha do modelo que melhor retrate o comportamento do concreto à tração e à compressão, deve ser feita de maneira que reproduza corretamente a relação tensão-deformação desse material. Neste trabalho, o modelo utilizado para representar o comportamento do concreto à compressão foi o de Carreira e Chu [12], que leva em conta o amolecimento do concreto na compressão e se baseia nos limites de tensão e deformação, “Fig. 11(a)”. Já o modelo adotado para representar o comportamento do concreto à tração foi o de Polak e Genikomsou [13], no qual a relação tensão-deformação na tração é linear elástica até o limite da sua resistência ft' , e depois da abertura de fissura a curva de tensão-

deformação é caracterizada por um processo de perda de rigidez até a deformação ε_u , “Fig. 11(b)”.

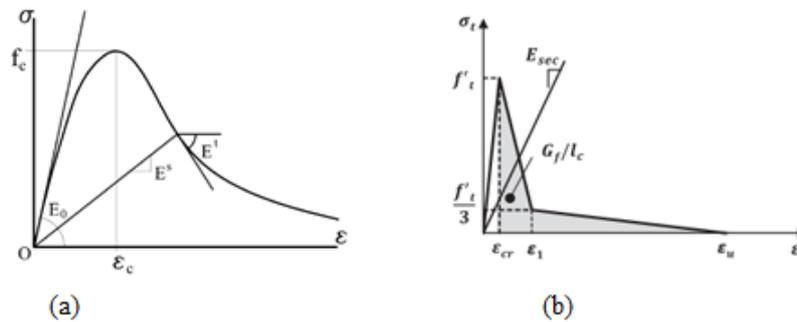


Figura 11. Curva tensão-deformação para o concreto (a) à compressão [12] e (b) à tração [13]

O CDP possibilita também a definição de variáveis de dano, representando a degradação da rigidez do concreto sob cargas concentradas ou cíclicas. A variável de dano na compressão foi adotada segundo Birtel e Mark [14], enquanto na tração foi dada pelo modelo de Pavlovic et al. [15].

Em um modelo numérico, além das não linearidades físicas e geométricas, é necessário definir também as não linearidades de contato, principalmente por se tratar de ligações mistas, garantindo que a laje de concreto e o perfil metálico tenham comportamento conjunto. Assim, deve-se escolher as ferramentas corretas para definir a interação entre o perfil metálico e a laje de concreto, e entre a armadura e a laje de concreto. No presente trabalho, a vinculação entre as armaduras e a laje de concreto se dará pelo comando “*Embedded region*”, simulando a aderência do concreto armado com restrições referentes a um corpo embutido em outro. Para o contato entre o perfil metálico e a laje de concreto foi utilizada a ferramenta de interação “*Surface-to-surface contact*”. Foi definido o comportamento normal como sendo “*Hard contact*”, em que a penetração entre as superfícies é considerada imperceptível, e o comportamento tangencial com a formulação “*Penalty*”, permitindo o movimento relativo das superfícies com um coeficiente de atrito igual a 0,3.

4 Análise dos resultados

A análise do comportamento estrutural da Deltabeam® foi realizada em duas partes, a fim de obter resultados mais confiáveis. Na primeira parte, foi feita a calibração e validação do modelo numérico, com a definição das propriedades e da geometria a partir dos estudos de Peltonen et al. [4]. Posteriormente, foi realizada uma nova simulação, padronizando as características geométricas e físicas da Deltabeam® e da ASB. A seguir serão analisados os resultados obtidos, visando entender como as características da Deltabeam® influenciam no comportamento à flexão do sistema.

4.1 Calibração do modelo

A fase de calibração do modelo foi feita definindo inicialmente as características geométricas e as propriedades dos materiais de acordo com o estudo experimental de Peltonen et al. [4], como mostrado na “Figura 5” e na “Tabela 1”. Posteriormente, utilizando o CDP, foi implementado o comportamento não linear do concreto e parâmetros como ângulo de dilatância, excentricidade e viscosidade sofreram variações, a fim de se obter a curva numérica carga-deslocamento que mais se aproximasse da curva experimental. Assim, foram obtidos os valores retratados na “Tabela 2”.

Percebe-se na “Figura 12” que os resultados numéricos estão em conformidade com os experimentais. Na fase elástica as curvas praticamente se sobrepuseram e na fase plástica houve diferença de apenas 4,5% da carga máxima do estudo experimental de Peltonen et al. [4], sendo mantido o comportamento crescente da curva. Assim, o resultado da calibração mostrou uma boa concordância com aqueles obtidos no estudo experimental, permitindo concluir que os modelos numéricos desenvolvidos são confiáveis, suficientemente precisos e podem ser usados para prever o

comportamento a flexão da Deltabeams®, estando o modelo calibrado.

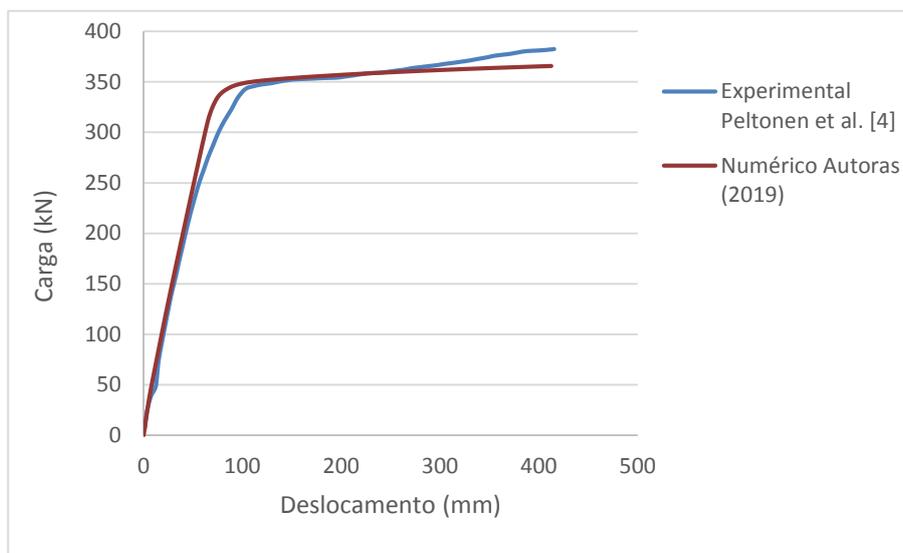


Figura 12. Gráfico carga-deslocamento de calibração

Para confirmar a boa concordância da calibração, deve ser avaliado também se o comportamento do modelo numérico está de acordo com o experimental, observando a sua deformada. Através da “Figura 13”, pode-se perceber que o comportamento da estrutura no estudo experimental de Peltonen et al. [4] está de acordo com o numérico do presente trabalho. Além disso, a distribuição de tensões também segue o esperado, com as maiores tensões concentradas no centro da estrutura, ponto de aplicação da carga, e no perfil metálico.

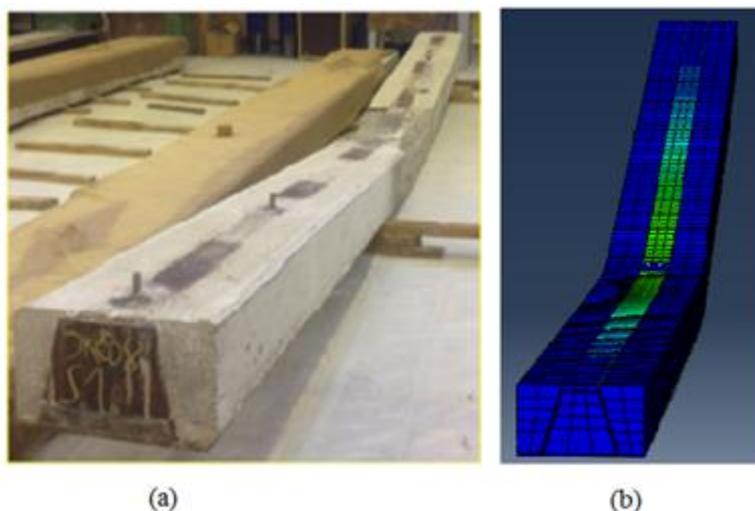


Figura 13. Comportamento à flexão (a) experimental Peltonen et al. [4] e (b) numérico Autoras

4.2 Análise comparativa

A partir da comparação entre a Deltabeam® a *Asymmetric Slimflor Beam*, foi possível entender como as características inovadoras da Deltabeam® influenciam no comportamento à flexão do sistema. Para isso, a geometria foi padronizada, como mostrada na “Figura 6”, mantendo atributos importantes, como espessura das mesas, largura e altura da laje de concreto, para que os resultados fossem passíveis de comparação.

Através da “Figura 14” é possível ver o resultado comparativo do comportamento carga-

deslocamento da Deltabeam® e ASB. Assim, algumas características particularidades da Deltabeam®, como possuir aberturas, possibilitando que as barras de aço atravessem a laje, permitir que seu interior seja preenchido com concreto e o formato de Delta, foram consideradas essenciais no comportamento que o sistema apresentou.

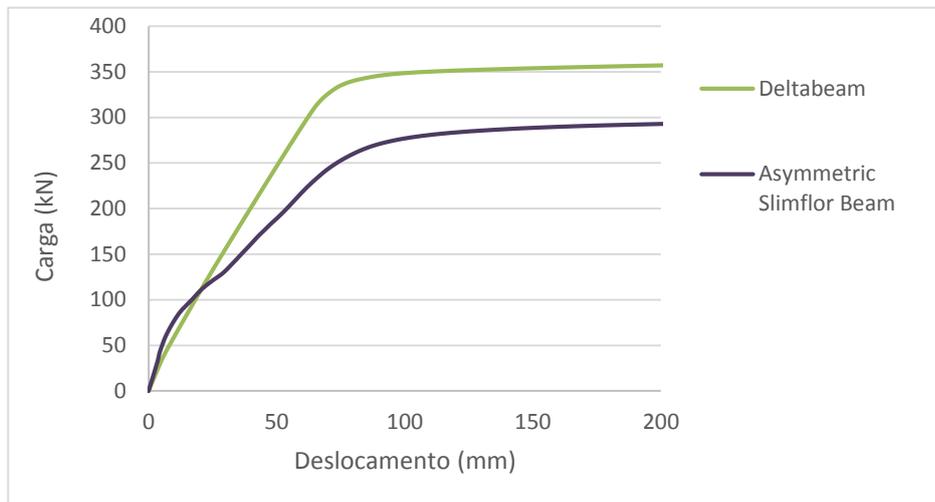


Figura 14. Gráfico carga-deslocamento de comparação entre a Deltabeam® e a ASB

A inserção de aberturas e o preenchimento interno da Deltabeam® com concreto proporcionaram maior resistência a flexão e elevada rigidez ao piso misto de pequena altura. A passagem do concreto e das barras de aço pelas aberturas, além de garantir maior rigidez às chapas de aço, viabiliza o comportamento misto da estrutura, fazendo com que a viga metálica e a laje de concreto se deformem como um único elemento. Além disso, ter barras de aço passando por todas as aberturas proporciona um aumento da resistência à flexão, como mostrado no estudo realizado por Sheehan et al. [16]. Por fim, a Deltabeam® possui uma característica que atribui a ela inúmeras vantagens: seu formato de Delta. Além de proporcionar uma viga por si só mais resistente, esse formato possibilita que o perfil fique completamente preenchido pelo concreto, aumentando a rigidez, minimizando os efeitos de flambagem e melhorando a resistência ao fogo e à flexão.

5 Conclusões

O estudo de novos tipos estruturais, como o *slim floor*, contribui não só para o avanço do conhecimento na área de estruturas mistas, mas também auxilia na sua utilização, visto que não existe norma brasileira que atenda a essa estrutura. Além disso, devido ao grande leque de possibilidades que o piso misto de pequena altura possibilita, os estudos sobre as tipologias ajudam na escolha da melhor viga a ser empregada. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo avaliar numericamente o comportamento à flexão de uma das tipologias, a Deltabeam®, e compará-lo ao da *Asymmetric Slimflor Beam*.

A fim de analisar como as novas características influenciam no comportamento à flexão da Deltabeam®, foi realizada inicialmente a calibração do modelo, para uma posterior comparação com a ASB. O resultado obtido na calibração mostrou boa concordância com o experimental, apontando que os modelos numéricos desenvolvidos são confiáveis e podem ser usados para prever o comportamento à flexão da Deltabeam®. A comparação numérica realizada entre a Deltabeam® e a ASB, possibilitou concluir que a forma de Delta, a presença de aberturas, que possibilitam a passagem das barras de aço, e o preenchimento do interior da viga com concreto, contribuíram significativamente para o aumento da rigidez e da resistência à flexão do *slim floor*.

Diante das análises desenvolvidas, ficou evidente as inúmeras vantagens que o piso misto de

pequena altura pode trazer à construção. Além de aumentar a resistência ao fogo, a sua utilização contribui para maior estabilidade estrutural e reduz a altura do pavimento. Ademais, os estudos sobre o *slim floor* são recentes no Brasil e ainda incompletos, necessitando de contribuições para a expansão dessa linha de pesquisa. Assim, acredita-se que a continuidade de pesquisas proporcionará a disseminação dessas vantagens e do seu comportamento estrutural, de modo a colaborar para a maior utilização desse sistema, principalmente no Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro dado ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- [1] A. L. Ramos. **Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.
- [2] S. De Nardin, A. L. H. C. El Debs. Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas. **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v.61, n.2, p.239-247, 2008.
- [3] D. L. Mullet. Slim Floor Design and Construction. Relatório Técnico P110. **The Steel Construction Institute**, 1992.
- [4] S. Peltonen, M. V. Leskela, P. Kiriakopoulos, A. Iliopoulos, I. Vayas and K. Spyarakos. Experimental and numerical investigations on the flexural behaviour of boxed steel beams encased in concrete. **The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures**. Timisoara, Romania. 2016.
- [5] P. Nádaský. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors—Specific Design Features in Scope of Steel Frames Design. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 40, p.274-279, 2012. Elsevier BV.
- [6] Peikko. DeltaBeam. **Slim Floor Structures**. Technical Manual, 2014. Disponível em: <<https://media.peikko.com/file/dl/i/qS6c7g/rRibebLCUQJvj7DtCwoE4w/DELTABEAMPeikkoGroup8-2014>>. Acesso em: 29 set. 2018.
- [7] M. V. Leskela, S. Peltonen, A. Iliopoulos and P. Kiriakopoulos. Numerical and experimental investigations on the vertical shear resistance of boxed steel cross-sections with concrete infill (Deltabeams). **EUROSTEEL 2014**. Naples, Italy. 2014.
- [8] W. Derkowsky and P. Skalski. New concept of slimfloor with prestressed composite beams International. **Procedia Engineering**. v. 193, p. 176–183, 2017.
- [9] E. N. Silva, A. S. C. Souza. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.52-68. 2018. Universidade Federal de Goiás.
- [10] R. F. F. Kochem. **Modelagem numérica de piso misto de aço e concreto de pequena altura: ênfase à ligação viga-pilar**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2018.
- [11] R. Malm. **Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method**. 2009. 64 f. Ph.D.Thesis - Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2009.
- [12] D. J. Carreira, K. Chu. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, vol. 82, pp. 797–804. 1985.
- [13] M. A. Polak, A. S. Genikomsou. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**. n. 98, p. 38-48, 2015.
- [14] V. Birtel, P. Mark. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. **Proceedings of the 19th Annual International ABAQUS Users' Conference**. Boston, [sn], pp. 95–108, 2006.

- [15] M. Pavlović, Z. Marković, M. Veljković, D. Budevac. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. **Journal of Constructional Steel Research**. 88: 134–149. 2013.
- [16] T. Sheehan, X. Dai, J. Yang, K. Zhou, D. Lam. Flexural behaviour of composite slim floor beams. **Proceedings 12th International Conference on Advances in Steel-concrete Composite Structures (ASCCS)**, [s.l.], p.137-144. 2018. Universitat Politècnica València.