

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE PISOS MISTOS DE PEQUENA ALTURA COM INOVADORA CONEXÃO DE CISALHAMENTO

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLEXURAL BEHAVIOR OF SLIM FLOOR WITH INNOVATIVE SHEAR CONNECTION

Tainá M. Borghi ¹

Bruno B. Marques ²

Fernanda G. B. S. Oliveira ³

Silvana De Nardin ⁴

Ana Lúcia H. C. El Debs ⁵

Resumo: Com as estruturas mistas já firmadas mundialmente, abre-se espaço para elementos estruturais mistos inovadores, como o piso misto de pequena altura, também conhecido como slim floor. Esse sistema é composto por vigas de aço e lajes de concreto ou mistas apoiadas na mesa inferior dos perfis, implicando na redução da altura total do piso. Foi realizado um estudo numérico de duas tipologias de slim floor compostas por perfis de aço com aberturas na alma, a Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB) e a Composite Slim-Floor Beam (CoSFB), que possibilitam a utilização da conexão de cisalhamento composta por barras de aço e concreto moldado in loco passando através das aberturas do perfil. Assim, objetivou-se avaliar a contribuição dessa conexão de cisalhamento no comportamento à flexão, concluindo que a presença de barras aumenta a capacidade resistente e que quanto maior a abertura maior essa capacidade.

Palavras-chaves: Piso Misto de Pequena Altura; Shallow Cellular Composite Floor Beam; Composite Slim-Floor Beam; Conexões de Cisalhamento; Comportamento à Flexão.

Abstract: With globally established composite structures, space is now open for innovative composite structural elements, such as slim floor. This system consists of steel beams and concrete or composite slabs supported on the lower flange of the profiles, resulting in a reduction of the total floor height. A numerical study was conducted on two typologies of slim floors composed of steel profiles with openings in the web: the Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB) and the Composite Slim-Floor Beam (CoSFB). These typologies allow the use of an innovative shear connection, with steel bars and in-situ cast concrete passing through the profile openings. The objective was to evaluate the contribution of this shear connection to flexural behavior, concluding that the presence of bars increases the resistant capacity of the systems, and the larger the opening, the greater this capacity.

Keywords: Slim floor; Shallow Cellular Composite Floor Beam; Composite Slim-Floor Beam; Shear Connections; Flexural Behavior.

¹Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Brasil, email: tainaborghi@usp.br

²Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Brasil, email: brunobm@usp.br

³Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Brasil, email: fernanda.gabriella@alumni.usp.br

⁴ Universidade Federal de São Carlos – Brasil, email: snardin@ufscar.br

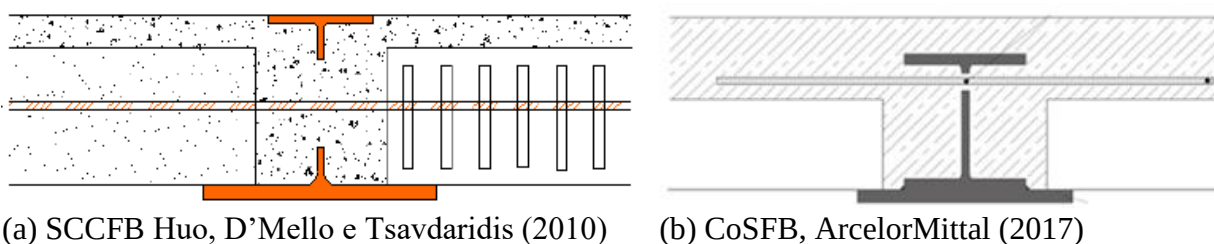
⁵Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Brasil, email: analucia@sc.usp.br

1 Introdução

As estruturas mistas de aço e concreto se caracterizam pela aplicação conjunta de perfis de aço e do concreto, se beneficiando das qualidades de ambos os materiais, como a resistência do aço à tração e do concreto à compressão. As estruturas mistas mais utilizadas no Brasil são as vigas, pilares e lajes, com normativas que regem seu projeto e execução. Mais recentemente, vem se difundindo internacionalmente o piso misto de pequena altura, também conhecido como slim floor, que objetiva reduzir a altura total do piso, introduzindo a laje na altura da viga.

Devido a viga de aço estar revestida pelo concreto, o slim floor possui vantagens como aumento da resistência ao fogo e da rigidez e diminuição das instabilidades locais e da corrosão. Além disso, esse sistema tem grande versatilidade, podendo variar o tipo de laje empregada, de perfil de aço para compor a viga e o tipo e posição dos conectores de cisalhamento. Apenas o conector do tipo pino com cabeça era utilizado, inicialmente soldado à mesa superior, mesa inferior, nas duas mesas ou até na alma do perfil. Quando utilizado o perfil com aberturas na alma, outros dispositivos mecânicos de conexão podem ser aplicados, como barras de aço e concreto moldado in loco passando através das aberturas do perfil.

Duas tipologias do piso misto de pequena altura foram estudadas em relação à conexão de cisalhamento com barras de aço passando através das aberturas do perfil, sendo elas a Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB) e a Composite Slim-Floor Beam (CoSFB), mostradas na Figura 1. Ambas são formadas pelo perfil I assimétrico com aberturas circulares na alma, entretanto a SCCFB possui aberturas de grande diâmetro e centradas na alma da viga, enquanto a CoSFB possui pequenas aberturas circulares no topo da alma.



(a) SCCFB Huo, D'Mello e Tsavdaridis (2010) (b) CoSFB, ArcelorMittal (2017)

Figura 1. Conexão de cisalhamento

Assim, o presente trabalho pretende realizar um estudo numérico avaliando a contribuição da conexão de cisalhamento composta por barras de aço e concreto moldado in loco passando através das aberturas do perfil na capacidade resistente à flexão da Shallow Cellular Composite Floor e Composite Slim-Floor Beam. Para isso, foi realizada uma análise numérica no programa ABAQUS®, dividida em três etapas: calibração dos modelos, utilizando os estudos experimentais de Chen, Limazie e Tan (2015) e Hechler et al. (2016); padronização geométrica e dos materiais dos dois modelos para comparação; análise paramétrica, analisando o tamanho das aberturas e a quantidade de barras de aço passando pelas aberturas.

A tipologia SCCFB foi estudada inicialmente por Lawson et al. (2006), que sugeriram um método de projeto que levava em conta a assimetria e a existência de aberturas. Em 2009, Tsavdaridis, D'Mello e Hawes publicaram um estudo experimental, para investigar a contribuição do concreto que passa entre as aberturas da viga na resistência ao cisalhamento, continuando a pesquisa em Huo, D'Mello e Tsavdaridis (2010), Huo e D'Mello (2013) e Huo e D'Mello (2017), através de investigações experimentais. Um grupo de pesquisadores da China investiga a SCCFB a partir do estudo experimental de Chen, Limazie e Tan (2015), que analisou os mecanismos de transferência de cisalhamento no comportamento à flexão. Limazie e Chen (2015), Limazie e Chen (2016) e Limazie e Chen (2017) deram continuidade à pesquisa, com

estudos analíticos, estimando o momento resistente, e numéricos, com análise paramétrica e da conexão de cisalhamento.

Os estudos sobre a CoSFB começaram com Hechler et al. (2016), que realizaram testes push-out e de flexão e avaliaram o cisalhamento, flexão, vibração e deformação, que revelaram aumento de 100% na capacidade de carga e 150% na rigidez em comparação com vigas mistas usuais. Sheehan et al. (2019) analisaram experimentalmente o grau de ligação de barras de aço e sua capacidade de resistência, observando que o número de barras de aço influenciou diretamente na resistência à flexão do sistema. Baldassino et al. (2019) avaliaram experimentalmente o comportamento em serviço da CoSFB, concluindo que a resposta final foi afetada pelo tempo de cura do concreto e pelos efeitos da fluência.

2 Análise Numérica

A simulação numérica realizada foi dividida em três fases, sendo inicialmente destinada a representar o comportamento dos modelos físicos da Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB) e a Composite Slim-Floor Beam (CoSFB) já ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015) e Hechler et al. (2016), respectivamente. Posteriormente, os dois modelos foram padronizados para efeito de comparação. Por fim, foi realizado um estudo paramétrico, avaliando parâmetros relacionados com a conexão de cisalhamento composta pelas barras de aço e concreto moldado in loco que atravessam as aberturas da alma da viga. Os modelos físicos da calibração e da padronização estão mostrados na Figura 2 (dimensões em mm).

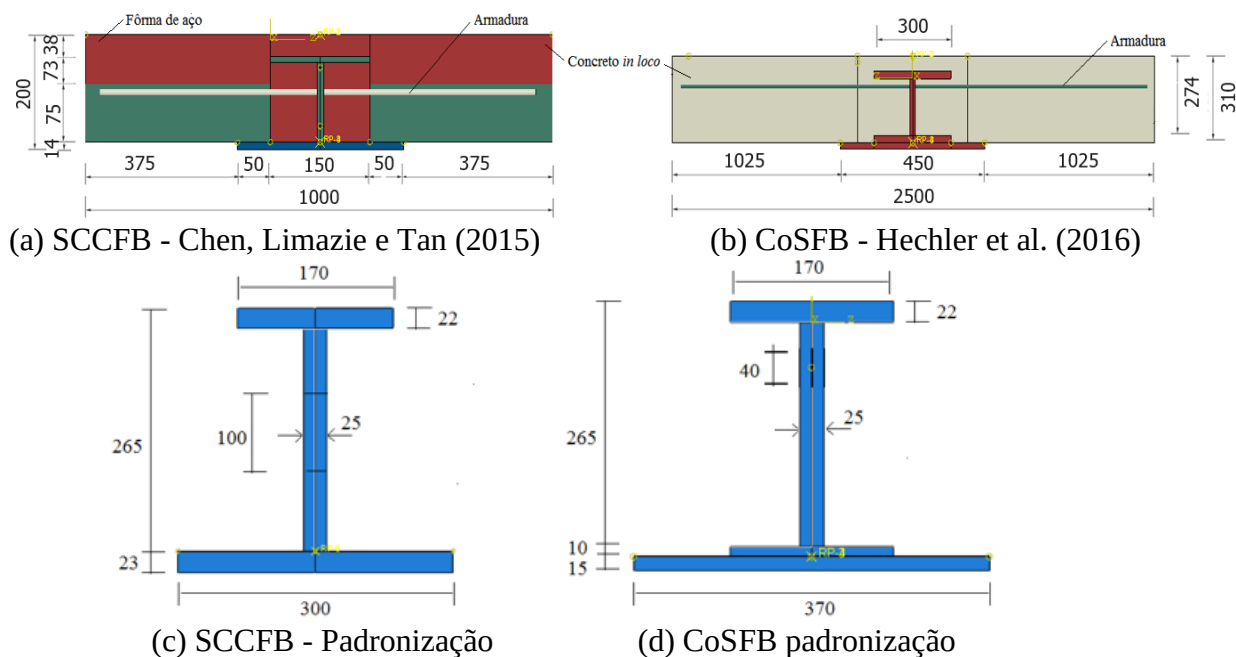


Figura 2. Modelos físicos

As propriedades mecânicas utilizadas na calibração dos modelos foram as mesmas dos estudos experimentais e para a padronização foram definidos os valores mostrados na Tabela 1. A condição de contorno foi de viga biapoiada e de carregamento em dois pontos de aplicação.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais

		Calibração CoSFB	Calibração SCCFB	Padronização
Viga	Vão (m)	8,0	4,2	4,3
	f_y (MPa)	430	436,7	430
	f_u (MPa)	500	556,3	550
	E (MPa)	190000	185000	200000
Laje	Tipo	In loco	Steel deck	In loco
	Largura (m)	2,5	1,0	1,3
	Altura (m)	0,31	0,2	0,288
	E (MPa)	32000	32000	32000
	f_{ck} (MPa)	30,1	29,4	30
	f_t (MPa)	2,9	2,8	2,9

Fonte: Autoria própria (2024)

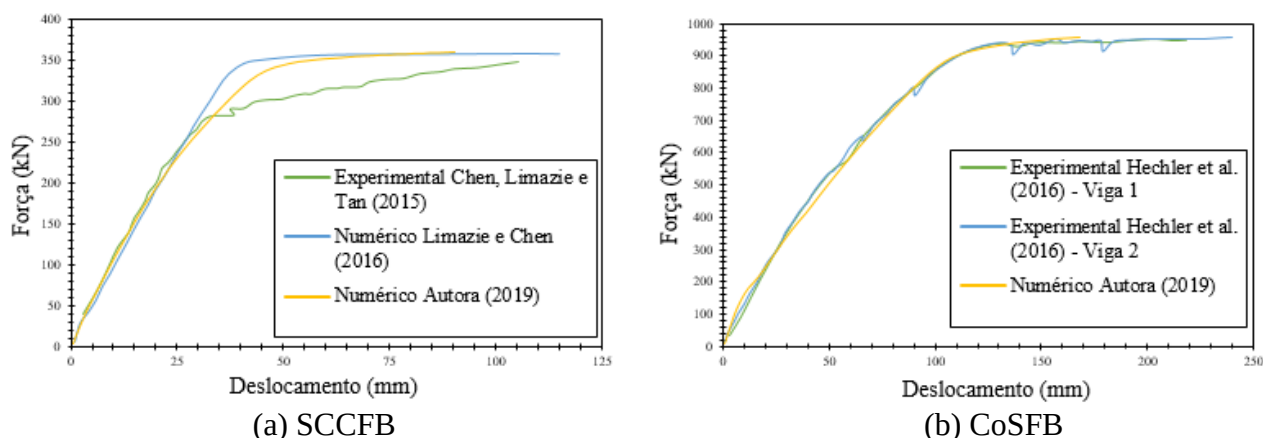
O ABAQUS® foi o programa utilizado na simulação numérica, com características da simulação baseadas em Borghi (2020). O elemento finito e malha escolhidos para a laje de concreto foi o elemento sólido C3D8R e malha de 35 mm, para o perfil de aço foi elemento de casca S4R e malha de 25 mm, para as armaduras, elemento de viga B31 e malha de 10 mm.

O comportamento não-linear dos materiais foi considerado por modelos constitutivos, sendo adotado para o perfil metálico o bi-linear com encruamento isótropo. Para o concreto, o modelo constitutivo utilizado foi o Concrete Damaged Plasticity (CDP). O modelo utilizado para representar o comportamento do concreto à compressão foi o de Carreira e Chu (1985) e para o concreto à tração, o de Polak e Genikomso (2015). As variáveis de dano foram definidas baseadas no modelo de Birtel e Mark (2006) para a compressão e de Pavlovic et al. (2013) para a tração. Além disso, foram definidos parâmetros, como ângulo de dilatância (36°), excentricidade (0,06), relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (1,16), fator de forma (0,6667) e viscosidade (0,0001).

O contato entre a laje de concreto e o perfil de aço foi feito com a ferramenta de interação “Surface-to-surface contact”, considerando o comportamento normal como sendo “Hard contact” e o comportamento tangencial “Penalty”, com coeficiente de atrito igual a 0,3. A vinculação das barras de aço com a laje de concreto foi feita pelo comando “Embedded region”.

3 Resultados e discussões

Na fase de calibração dos modelos os resultados do gráfico força x deslocamento no meio do vão dos ensaios experimentais foram comparados com a simulação numérica. A Figura 3 ilustra os resultados obtidos.

**Figura 3.** Gráfico força x deslocamento - calibração

Nota-se que os resultados numéricos aparecem em conformidade com os experimentais, mostrando na fase elástica perfeita concordância, para as duas tipologias. Na fase plástica houve pequena diferença da carga máxima da SCCFB, na ordem de 4%. O resultado da calibração permitiu concluir que os modelos numéricos desenvolvidos podem ser usados para prever o comportamento à flexão das tipologias. Após a calibração, a geometria e as propriedades dos materiais das duas tipologias foram padronizadas, obtendo-se o resultado mostrado na Figura 4.

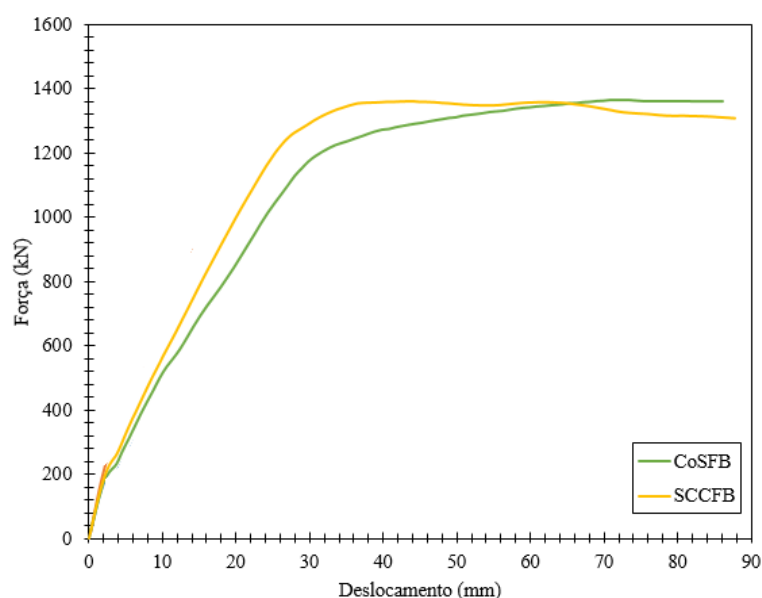
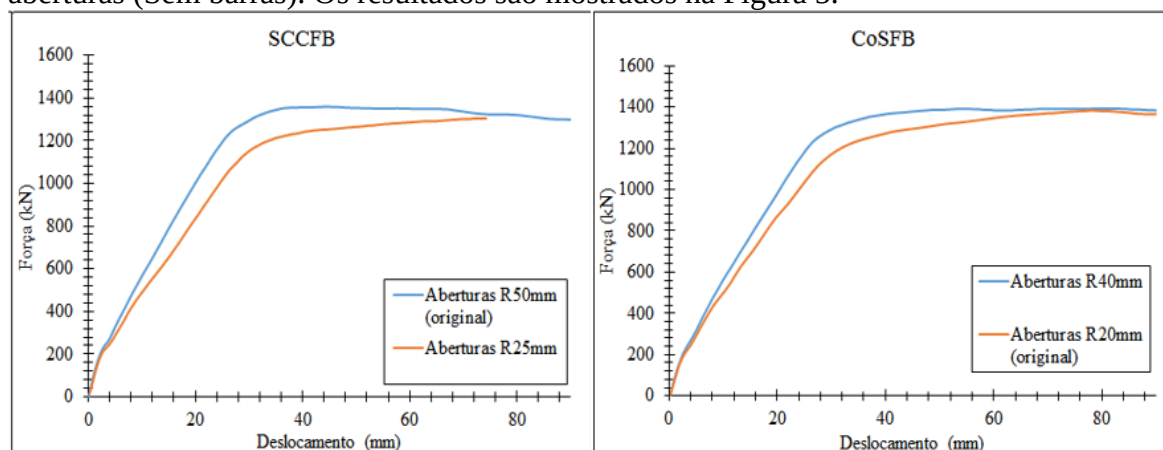


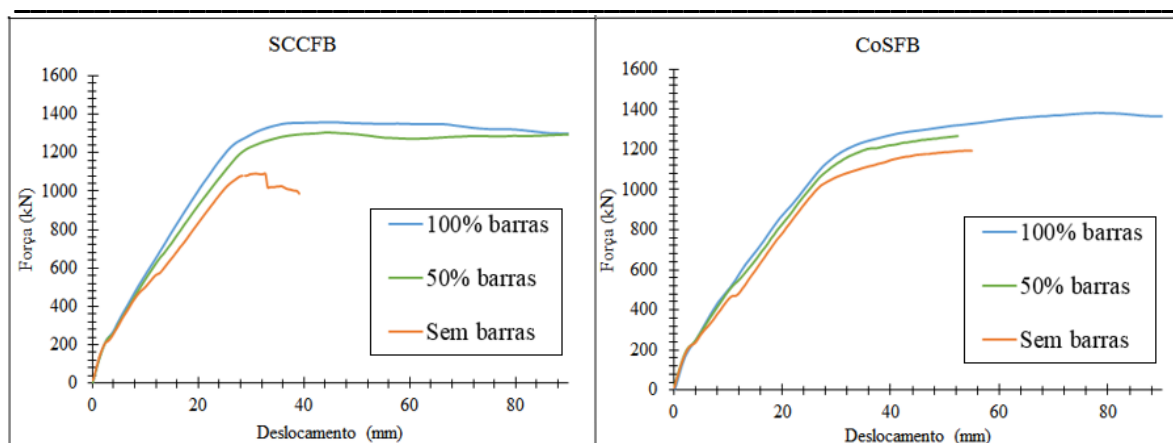
Figura 4. Gráfico força x deslocamento - padronização

Nota-se que a SCCFB apresentou maior rigidez que a CoSFB e atingiu um pico na capacidade resistente última, com pós-pico decrescente. Entretanto, a CoSFB possui aumento crescente dessa capacidade, sendo maior que a SCCFB para o limite da análise estipulado.

Na terceira fase, foram utilizados os modelos padronizados para analisar a influência da conexão de cisalhamento na capacidade resistente à flexão das tipologias. O primeiro parâmetro analisado foi o raio das aberturas, variando de 20 *mm* (original) para 40 *mm* para CoSFB e de 50 *mm* (original) para 25 *mm* para a SCCFB. O segundo parâmetro foi a quantidade de barras que passam pelas aberturas, sendo analisado todas as aberturas com barras (100% barras), metade das aberturas com barras (50% barras) e nenhuma barra passando pelas aberturas (Sem barras). Os resultados são mostrados na Figura 5.



Tamanho das aberturas



Quantidade de barras que passa pelas aberturas

Figura 5. Gráfico força x deslocamento – Análise paramétrica

Conclui-se que, quanto maior o diâmetro das aberturas, maior a rigidez e capacidade resistente inicial do sistema. Entretanto, menores aberturas mantêm o comportamento crescente da capacidade resistente, enquanto que, em sistemas com diâmetros maiores, a força aplicada começa a cair após a plastificação da viga de aço. Isso acontece, pois quanto maior o diâmetro, maior o volume de concreto no comprimento da viga, deixando o sistema mais suscetível às consequências trazidas pelo esmagamento do concreto. Além disso, à medida que se reduz a quantidade de barras passando pelas aberturas, ocorre redução da rigidez e da capacidade resistente do sistema. A CoSFB atingiu redução de 15% da capacidade resistente última sem a presença de armaduras. Comparativamente ao sistema sem armaduras, a SCCFB foi mais afetada, apresentando um comportamento à flexão ineficiente na ausência de barras de aço, indicando uma ruptura frágil.

4 Conclusões

A simulação numérica foi realizada em três etapas: calibração, padronização e análise paramétrica. Os resultados obtidos na calibração mostraram boa concordância com os resultados experimentais, podendo ser usados para prever o comportamento à flexão das tipologias. A comparação padronizada realizada entre a SCCFB e a CoSFB, possibilitou concluir que a SCCFB é mais rígida que a CoSFB e atinge um pico na capacidade resistente última, ao contrário da CoSFB que continuou crescente. Na análise paramétrica, concluiu-se que quanto mais barras forem utilizadas, maior a rigidez e a capacidade resistente do sistema, assim como com o aumento do diâmetro das aberturas.

Referências

- BALDASSINO, N.; ROVERSO, G.; RANZI, G.; ZANDONINI, R. Service and ultimate behaviour of slim floor beams: an experimental study. **Structures**, vol. 17, pp. 74–86, 2019.
- BIRTEL V., MARK P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. **Proceedings of the 19th Annual International ABAQUS Users' Conference**. Boston, [sn], pp. 95–108, 2006.
- BORGHI, T. M. **Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise numérica das tipologias**. 2020. 175p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos,

Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

CARREIRA, D.J.; CHU, K. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, 1985.

CHEN, S.; LIMAZIE, T.; TAN, J. Flexural behavior of shallow cellular composite floor beams with innovative shear connections. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 106, p.329-346, mar. 2015. Elsevier BV.

HECHLER, O.; BRAUN, M.; OBIALA, R.; KUHLMANN, U.; EGGERT, F.; HAUF, G. CoSFB: composite slim-floor beam: experimental test campaign and evaluation. **Proceedings VII International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete**, 2016, pp. 158–172. [Online].

HUO, B. Y.; D'MELLO, C. A. Push-out tests and analytical study of shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 88, p.191-205, 2013. Elsevier BV.

HUO, B. Y.; D'MELLO, C. A. Shear Transferring Mechanisms in a Composite Shallow Cellular Floor Beam with Web Openings. **Structures**, [s.l.], v. 9, p.134-146. 2017. Elsevier BV.

HUO, B. Y.; D'MELLO, C.; TSAVDARIDIS, K. D. Experimental and Analytical Study of Push-out Shear Tests in Ultra Shallow Floor Beams. **Iabse Symposium Report**, [s.l.], v. 97, n. 34, p.31-38, 2010.

LIMAZIE, T.; CHEN, S. Effective shear connection for shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 128, p.772-788, jan. 2017. Elsevier BV.

LIMAZIE, T.; CHEN, S. FE modeling and numerical investigation of shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 119, p.190-201, 2016. Elsevier BV.

LIMAZIE, T.; CHEN, S. Numerical procedure for nonlinear behavior analysis of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 106, p.209-219, mar. 2015. Elsevier BV.

PAVLOVIĆ, M.; MARKOVIĆ, Z.; VELJKOVIĆ, M.; BUĐEVAC, D. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. **Journal of Constructional Steel Research**. 88: 134–149. 2013

POLAK, M. A.; GENIKOMSOU, A. S. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**. n. 98, p. 38-48, 2015.

SHEEHAN, T.; DAI, X.; YANG, J.; ZHOU, K.; LAM, D. Flexural behaviour of composite slim floor beams. **Proceedings 12th International Conference on Advances in Steel-concrete Composite Structures**, [s.l.], p.137-144. 2018. Universitat Politècnica València.