
**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VIGAS MISTAS DE AÇO E
CONCRETO SUBMETIDAS A MOMENTO FLETOR NEGATIVO PARA
MODELOS CONSTITUTIVOS DO AÇO**

***SENSITIVITY ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS
UNDER NEGATIVE BENDING MOMENT TO STEEL CONSTITUTIVE MODELS***

Juliano Branjão Zonta ¹

Felipe Piana Vendramell Ferreira ¹

Alexandre Rossi ¹

Resumo: As vigas mistas de aço e concreto são uma eficiente solução estrutural para edifícios de múltiplos pavimentos, ao reduzir altura e peso próprio da edificação. Atualmente grande parte das pesquisas nessa área se utilizam da modelagem numérica como forma de aprimorar o conhecimento sobre o tema. Entretanto, há uma lacuna na análise de sensibilidade para diferentes modelos constitutivos do aço do perfil estrutural. Este trabalho visa explorar a capacidade preditiva de quatro modelos constitutivos para o aço do perfil estrutural das vigas mistas. Os modelos serão avaliados por meio de simulações numéricas no programa ABAQUS® considerando ensaios experimentais. Concluiu-se que os modelos constitutivos avaliados apresentaram uma boa capacidade preditiva do comportamento real da estrutural.

Palavras-chaves: Vigas mistas; Modelos constitutivos; Análise de sensibilidade; Modelagem numérica.

Abstract: *Composite steel and concrete beams stand out as an efficient structural solution for multi-story buildings, contributing to the reduction of overall height and self-weight of the structure. Current research in this field predominantly relies on numerical modeling to enhance understanding. However, there exists a gap in sensitivity analysis for different constitutive models of the steel profile. This study aims to explore the predictive capability of four constitutive models for the steel profile of composite beams. The models will be evaluated through numerical simulations using the ABAQUS® program, considering experimental tests. The findings indicate that the assessed constitutive models demonstrate a strong predictive capacity for the real structural behavior.*

Keywords: Composite beams; Constitutive models; Sensitivity analysis; Numerical modeling.

¹Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica – Brasil, e-mail:
julianobranjao@ufu.br; fpvferreira@ufu.br; alexandre-rossi@ufu.br

1 Introdução

A busca por melhorias no desempenho das estruturas de aço é constante na engenharia estrutural. Perfis convencionais são adequados para vigas de grandes vãos e cargas moderadas, mas o atendimento aos requisitos de serviço é desafiador, especialmente para vigas mais altas que requerem maior rigidez (VIEIRA et al. 2014). As vigas mistas de aço e concreto surgem como uma solução promissora, especialmente em edifícios de múltiplos pavimentos, pois reduzem a altura do edifício e o peso próprio, atendendo aos requisitos de serviço de forma mais eficiente (QUEIROZ et al., 2007).

As vigas mistas de aço e concreto são versáteis, podendo ser usadas como elementos simplesmente apoiados, semi-contínuos ou contínuos. Em configurações de ligações contínuas e semi-contínuas, especialmente perto dos apoios internos, as vigas mistas estão sujeitas a momento fletor negativo, desenvolvendo tensões de compressão na parte inferior da viga e tensões de tração na laje de concreto, o que pode desencadear instabilidades locais e globais (HOSSEINPOUR et al., 2022). Nesse contexto, a instabilidade global mais comum nessas vigas, quando submetidas a momento fletor negativo, é a instabilidade lateral com distorção, caracterizada por um deslocamento lateral e uma rotação da mesa inferior comprimida, ocorrendo devido à distorção da alma, especialmente quando esta não é suficientemente rígida (ROSSI et al., 2020).

Considerando os estudos recentes que foram desenvolvidos por meio de simulações numéricas em vigas mistas de aço e concreto submetidas a momento fletor negativo podemos mencionar os trabalhos de Rossi et al. (2023), Rossi et al. (2021) e Hosseinpour et al. (2022). Embora esses autores tenham realizado simulações numéricas em vigas mistas de aço e concreto submetidas a momento fletor negativo, não existem investigações por meio de análise de sensibilidade sobre o comportamento desses elementos estruturais para diferentes modelos constitutivos para o aço do perfil estrutural.

O presente estudo objetiva explorar, através de análises numéricas, o comportamento de vigas mistas de aço e concreto quando submetidas a momento fletor negativo, levando em consideração a variação dos modelos constitutivos do aço estrutural. Para isso, são realizadas simulações numéricas no programa ABAQUS®. As vigas são validadas por meio de ensaios experimentais desenvolvidos por Tong et al. (2014).

2 Modelos Constitutivos

Para realização das análises de sensibilidade serão utilizados os modelos constitutivos proposto por Earls (1999), Yun e Gardner (2017) e os dois modelos propostos por Wang et al. (2021).

2.1. EARLS (1999)

O autor apresenta um modelo elastoplástico (Figura 1) que concebe a relação entre tensão e deformação como linear por partes, proporcionando uma representação simplificada do comportamento do material. Nesse modelo, é contemplada a variação do limite de escoamento e a relação entre o limite de resistência à tração e o limite de escoamento, onde o efeito de encruamento do aço é considerado por meio de uma região bilinear.

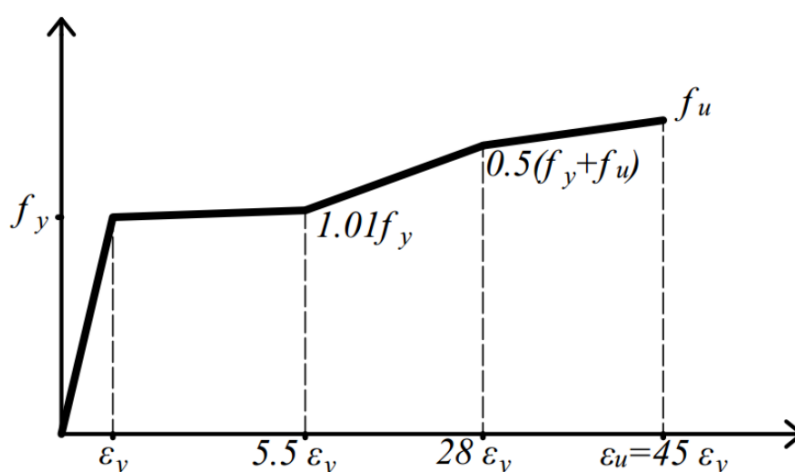


Figura 1. Relação tensão-deformação proposta por Earls (1999)

2.2. YUN E GARDNER (2007)

Com base em mais de 500 curvas experimentais de tensão-deformação provenientes de 34 fontes distintas em diversas regiões do mundo, os autores procederam à calibração dos modelos experimentais por meio de regressão por mínimos quadrados. Esse processo permitiu aos autores formular dois modelos representativos para descrever o comportamento de perfis de aço laminados a quente: o modelo quadrilinear e o modelo bilinear com encruamento não linear. A diferença entre os modelos reside na captura mais precisa do modelo bilinear em

relação à perda de rigidez durante a fase de encruamento. Para o presente estudo, foi utilizado apenas o modelo quadrilinear (Figura 2), já que uma abordagem simplificada é suficiente para a situação em estudo.

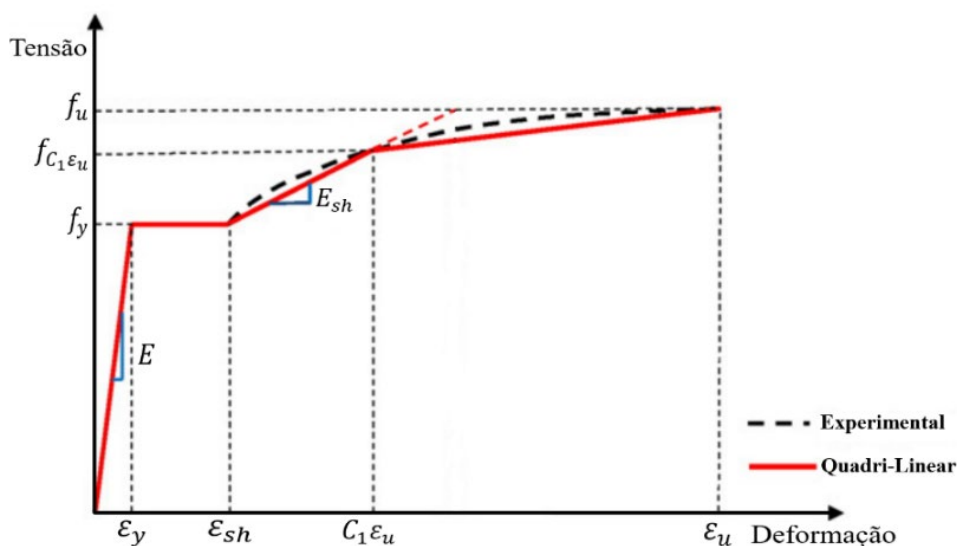


Figura 2. Modelo quadrilinear, adaptado de Yun e Gardner (2007)

2.3. WANG et al. (2021)

Neste trabalho, os pesquisadores utilizaram 216 curvas de tensão-deformação provenientes de diversas variantes de aço de alta resistência, desenvolvendo dois modelos constitutivos específicos para esse tipo de material. Além disso, 30 curvas representativas de aço convencional foram selecionadas para avaliar a capacidade de resposta dos modelos a esse tipo de material.

2.3.1. Modelo I – Descontínuo

O primeiro modelo proposto pelos pesquisadores é uma representação da relação tensão-deformação empregada para descrever o comportamento mecânico de aços de alta resistência caracterizados pela presença de um patamar de escoamento, como evidenciado na Figura 3^a.

2.3.2. Modelo II – Contínuo

O segundo modelo proposto pelos pesquisadores representa a relação entre tensão e deformação, utilizado para descrever o comportamento mecânico de aços de alta resistência

que se destacam pela falta de um patamar de escoamento. Esse padrão é frequente em aços de alta resistência e baixa ductibilidade. O modelo é apresentado a seguir na Figura 3b.

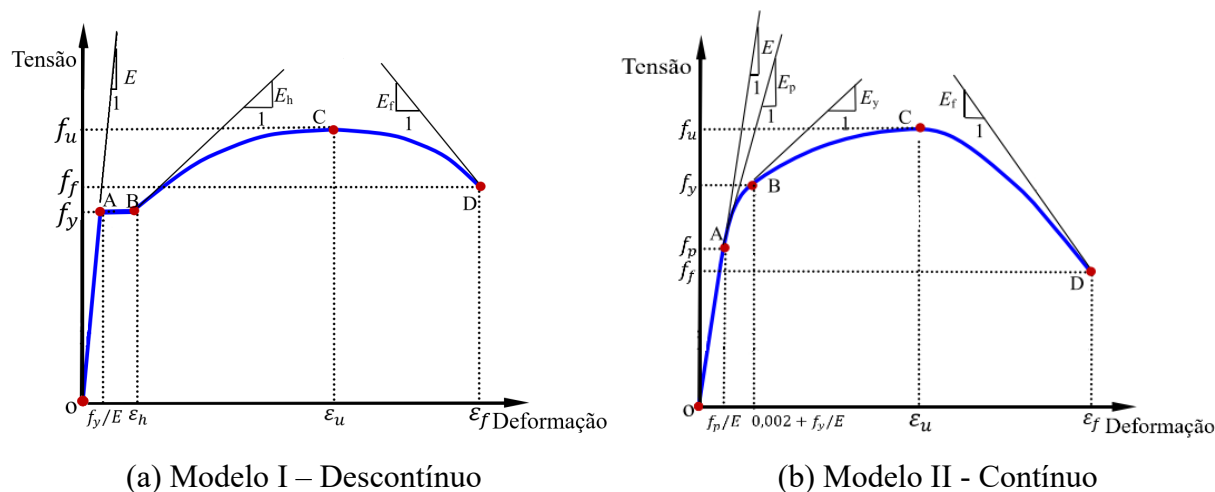


Figura 3. Modelos constitutivos, adaptado de Wang et al. (2021)

3 Modelagem Numérica

A fim de avaliar a capacidade preditiva de cada um dos modelos constitutivos apresentados anteriormente, modelagens numéricas foram realizadas no programa ABAQUS considerando vigas mistas de aço e concreto submetidas a momento fletor negativo ensaiadas por Tong et al. (2014). As condições de contorno das vigas no ensaio são ilustradas na Figura 4.

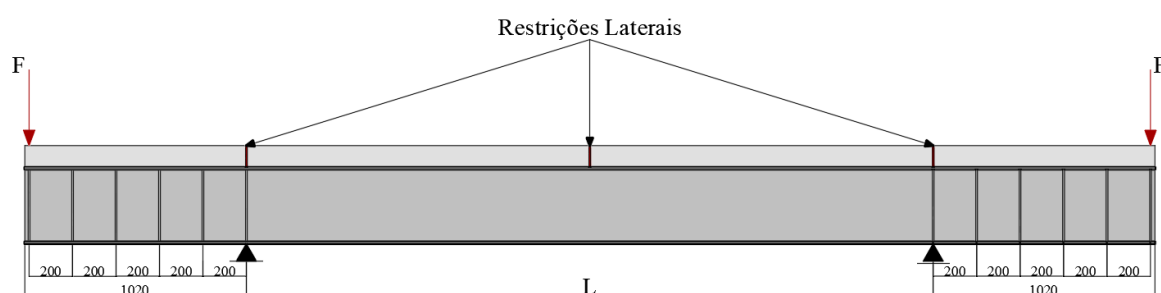


Figura 4. Condições de contorno das vigas mistas, adaptado de Tong et al. (2014)

As propriedades geométricas são apresentadas na Tabela 1, onde: L é o comprimento entre apoios da viga, d é a altura do perfil de aço, b_f é a largura das mesas do perfil, t_f é a espessura das mesas, t_w é a espessura da alma do perfil e $Spino$ é o espaçamento entre os conectores de cisalhamento.

Tabela 1 - Propriedades geométricas das vigas mistas

Elemento	L (mm)	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	S_{pino} (mm)
B3.0-350-1	3,000	350	125	8	6	220
B3.2-350-1	4,200	350	125	8	6	300
B4.2-350-1-C	4,200	350	125	8	6	150
B4.2-400-1	4,200	400	125	8	6	300

Fonte: Autoria própria (2024)

A seguir, na Tabela 2, são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais, onde: E é o módulo de elasticidade longitudinal do material, ν é o coeficiente de poisson, f_{cub} é a resistência a compressão do concreto medida em corpos de prova cúbicos, f_y é a resistência ao escoamento do aço e por fim, f_u é a resistência última do aço.

Tabela 2: Propriedades mecânica das vigas mistas

Elemento	E (MPa)	ν	f_{cub} (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Laje de concreto	27,117	0,2	25,1	-	-
Mesas do perfil	205,000	0,3	-	403	522
Alma do perfil	207,000	0,3	-	362	489
Armaduras	211,000	0,3	-	530	657
Conector de Cisalhamento	206,000	0,3	-	235	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Em relação aos modelos constitutivos adotados, para as armaduras longitudinais e transversais, foi utilizado um modelo elastoplástico com encruamento linear positivo. Por fim, os conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça foram descritos pelo modelo elastoplástico perfeito. O modelo *concrete damage plasticity* (CDP) é utilizado para representar o material concreto, os parâmetros adotados neste modelo foram os mesmos adotados em Rossi (2021), em relação ao modelo constitutivo adotado para o concreto sob compressão foi adotado o modelo proposto pelo Model Code 2010 (CEB-FIB, 2010) já para o comportamento à tração, aplicou-se o modelo proposto por Hordijk (1991).

Para a conexão entre o pino com cabeça e a mesa superior do perfil, optou-se pelo uso da restrição "Tie", simulando uma ligação soldada entre esses dois elementos. A interação entre as seguintes superfícies: laje de concreto e perfil de aço; conector pino com cabeça e laje de concreto e atuador e laje de concreto foram modeladas utilizando a opção de interação de superfície (*surface-to-surface interaction*). Os comportamentos normal e tangencial entre essas superfícies de contato foram especificados por meio das configurações "Hard contact" e

"Penalty", respectivamente. O coeficiente de atrito adotado foi estabelecido em 0,4, de acordo com Wijesiri Pathirana et al. (2016). Por fim para as interações entre as barras de armadura longitudinal e transversal e a laje de concreto foi utilizado a técnica de elementos embebidos.

Os tipos dos elementos finitos adotados e suas respectivas dimensões são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipo e dimensão dos elementos

Modelo	Tipo do elemento	Dimensões do elemento
Armaduras	T3D2	10 mm
Atuador	C3D8R	20 mm
Conector de cisalhamento	C3D8R	3 mm
Laje de concreto	C3D8R	20 mm
Perfil de Aço I	S4R	10 mm

Fonte: Autoria própria (2024)

Por fim, foi implementada uma imperfeição geométrica por meio do comando "IMPERFECTION", adotando uma imperfeição global de $L/1000$. Essa escolha baseou-se no estudo de sensibilidade conduzido por Rossi et al. (2021a), que identificou essa magnitude como a que proporciona os melhores resultados. Quanto às tensões residuais, optou-se por empregar o modelo de Galambos e Ketter (1959), também validada por Rossi et al. (2021a) em seu estudo de sensibilidade.

Para resolver o problema da não linearidade geométrica, é utilizado o método *Static Riks*. Este método, também é conhecido como algoritmo de Riks modificado, também utilizado por Rossi et al. (2021a).

4 Resultados e discussões

A seguir, os resultados são apresentados na Figuras 5 e Figura 6, levando em consideração curvas de carga por rotação.

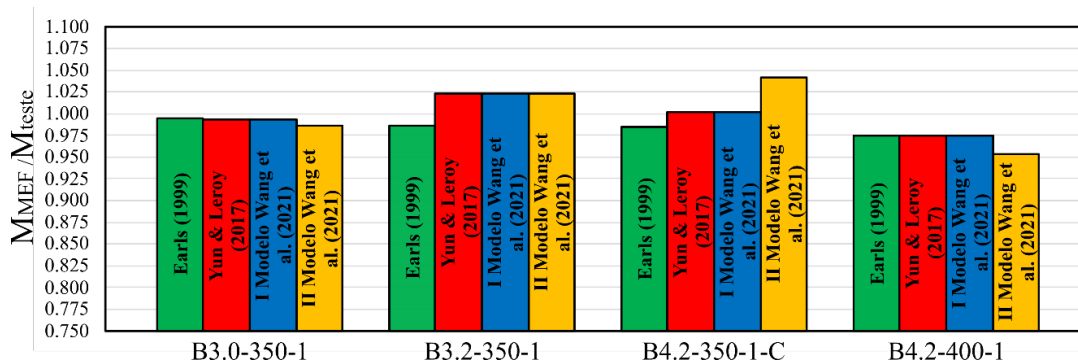


Figura 5. Razão entre o valor de momento último experimental e os valores numéricos

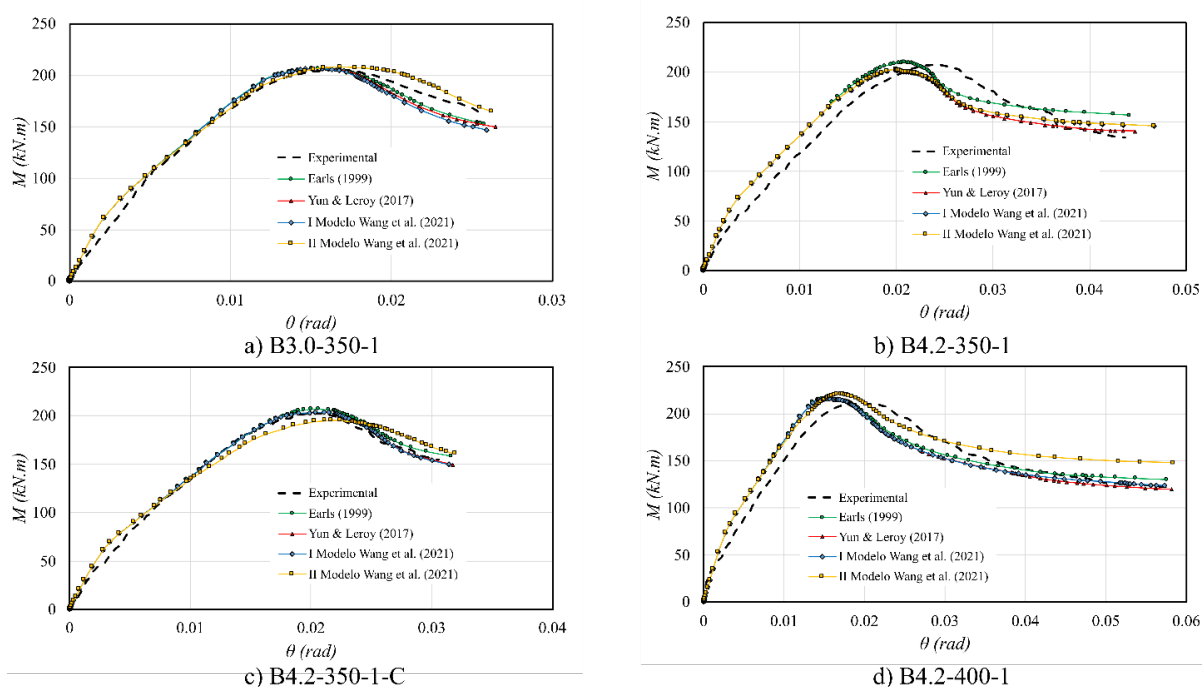


Figura 6. Resultado dos testes de sensibilidade

Os resultados revelaram que os quatro modelos constitutivos conseguiram capturar eficientemente o comportamento real das vigas mistas nos ensaios experimentais. Notavelmente, o modelo II proposto por Wang et al. (2021) destacou-se ao apresentar a maior diferença entre o modelo experimental e o numérico, uma ocorrência esperada devido à sua abordagem contínua da curva tensão x deformação do aço, sem patamar de escoamento, algo presente em aços convencionais como os avaliados neste estudo.

Além disso, para as vigas B3.0-350-1 e B3.2-350-1, o modelo constitutivo de Earls (1999) demonstrou a melhor correspondência entre os valores dos ensaios numéricos e experimentais. Já para as vigas B4.2-350-1-C e B4.2-400-1, os modelos constitutivos de Yun e Gardner (2017) e o modelo I de Wang et al. (2021) mostraram-se mais precisos. Os resultados dos modelos de Yun e Gardner (2017) e o modelo I de Wang et al. (2021) foram praticamente idênticos para todas as vigas com uma aproximação de 3 casas decimais.

5 Conclusões

Com base nos resultados obtidos na modelagem numérica, conclui-se que os modelos constitutivos propostos por Earls (1999), Yun e Gardner (2017), e o modelo I de

Wang et al. (2021) são capazes de capturar com precisão o comportamento das vigas mistas sob momento fletor negativo. Em situações que demandem maior precisão, sugere-se realizar uma pré-análise utilizando os modelos de Earls (1999) e Yun e Gardner (2017), ou o modelo I de Wang et al. (2021), a fim de determinar qual deles demonstra a melhor capacidade preditiva do comportamento da viga.

Referências

- ABAQUS. **Dassault Systèmes Simulia**. Abaqus, 6.12.2012. , [s.d.].
- CEB-FIB. **Model Code 2010**. , 2010.
- EARLS, C. J. **Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility**. Journal of Constructional Steel Research, v. 51, n. 2, p. 147–175, ago. 1999.
- GALAMBOS, T. V.; KETTER, R. L. **Columns Under Combined Bending and Thrust**. Journal of the Engineering Mechanics Division, v. 85, n. 2, p. 1–30, abr. 1959.
- HORDIJK, D. A. **Local approach to fatigue of concrete**. Delft: University of Technology, 1991. Disponível em: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:fa87147b-8201-47ed-83d7-b812b09c5fbb>
- HOSSEINPOUR, M. et al. **New predictive equations for LDB strength assessment of steel–concrete composite beams**. Engineering Structures, v. 258, p. 114121, maio 2022.
- VIEIRA, H. C; FAKURY, R. H. **Análise numérica da flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento em vigas de aço celulares**. Belo Horizonte, MG, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2014.
- L. TONG et al. **Experimental investigation on mechanical behavior of steel-concrete composite beams under negative bending**. Journal of Building Structures, v. 35, n. 10, p. 1–10, 2014.
- QUEIROZ, F. D.; VELLASCO, P. C. G. S.; NETHERCOT, D. A. **Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection**. Journal of Constructional Steel Research, v. 63, n. 4, p. 505–521, abr. 2007.
- ROSSI, A. et al. **Lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams: A review**. Structures, v. 27, p. 1299–1312, out. 2020.
- ROSSI, A. et al. **The influence of structural and geometric imperfections on the LDB strength of steel–concrete composite beams**. Thin-Walled Structures, v. 162, p. 107542, maio 2021a.
- ROSSI, A. et al. **A Parametric Study on the LDB Strength of Steel-Concrete Composite Beams**. Eng, v. 4, n. 3, p. 2226–2253, 27 ago. 2023.

WANG, X.-Q. et al. **Tensile stress-strain models for high strength steels**. Journal of Constructional Steel Research, v. 186, p. 106879, nov. 2021.

WIJESIRI PATHIRANA, S. et al. **Flexural behaviour of composite steel–concrete beams utilising blind bolt shear connectors**. Engineering Structures, v. 114, p. 181–194, 1 maio 2016.

YUN, X.; GARDNER, L. **Stress-strain curves for hot-rolled steels**. Journal of Constructional Steel Research, v. 133, p. 36–46, jun. 2017.