

Avaliação experimental de estruturas treliçadas mistas constituídas por elementos de aço de chapas finas e lajes pré-moldadas de concreto

Luiz Alberto Araújo de Seixas Leal¹, Eduardo de Miranda Batista²

¹Faculdade de Arquitetura / Universidade Federal da Bahia / NTPP / albertoleal@ufba.br

²Escola Politécnica / Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE/UFRJ / batista@coc.ufrj.br

Resumo

O emprego de vigas treliçadas mistas de aço e concreto para pavimentos de edifícios é uma solução estrutural que possibilita a adoção de grandes vãos, otimização no consumo de materiais e passagem de instalações entre as diagonais das treliças. Nos últimos anos, especialmente em países como Estados Unidos, diversas pesquisas sobre sistemas treliçados mistos têm sido publicadas, abordando aspectos como a identificação de mecanismos de colapso, conectores de cisalhamento, capacidade resistente e rigidez à flexão. Poucas publicações, no entanto, estão voltadas à avaliação estrutural de treliças compostas por perfis de chapas finas e a sua ligação entre banzo superior e à laje de concreto. Tendo em vista que a soldagem de conectores de cisalhamento em perfis com espessuras compreendidas entre 0,95 mm e 1,25 mm não é recomendável, inovadoras soluções para conectores foram concebidas e testadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LABEST/COPPE-UFRJ). Foram realizados ensaios de *push-out* (cisalhamento direto) e de flexão em escala real, onde foram avaliados o comportamento estrutural de sistemas treliçados mistos para pavimentos, em termos de momento resistente, rigidez à flexão e grau de interação entre ambos os materiais. A partir dos resultados obtidos, um comparativo pode ser estabelecido entre metodologias analíticas, recomendadas por normas técnicas internacionais, e o real comportamento da estrutura.

Palavras-chave

Estruturas mistas de aço e concreto. Vigas treliçadas com perfis de aço formados a frio. Conectores de cisalhamento. Ensaio de flexão. Ensaio de *push-out*. Pisos mistos de aço e concreto.

1. Introdução

As vigas treliçadas mistas de aço e concreto representam um sistema estrutural bastante utilizado para composição de pavimentos de edifícios, principalmente nos Estados Unidos e Canadá. A associação entre aço e concreto possibilita uma série de vantagens, tais como: (a) aumento considerável da capacidade resistente, (b) redução no consumo de materiais e (c) elevada rigidez à flexão.

A solução estrutural apresenta, como vantagem adicional, a presença de “vazios” ao longo da altura do elemento, permitindo a passagem de instalações e possibilitando a redução da altura do “entre-fôrro” da edificação.

Naturalmente, os pavimentos com vigas treliçadas mistas também apresentam desvantagens. Maior custo de fabricação, maior dificuldade de manutenção e menor quantidade de informações relacionadas ao comportamento estrutural são alguns dos principais pontos negativos.

Os primeiros estudos relativos às treliças mistas foram publicados na década de 60, através de pesquisas realizadas por Lemberck (1965) e Wang & Kaley (1967). As vigas treliçadas eram constituídas por diagonais com barras redondas e banzos formados por dupla cantoneira e perfis cartola.

Na década de 70, ensaios experimentais relevantes foram reportados por Tide & Galambos (1970) e Azmi (1972), com um padrão semelhante de perfis laminados de aço para as treliças. É importante destacar ainda os ensaios realizados por Robinson & Fahmy (1978), uma das poucas publicações que abordam a interação parcial entre laje de concreto e banzo superior das treliças.

Nos últimos 40 anos, segundo informações publicadas por Samuelson (2002), diversas pesquisas foram realizadas para investigação de treliças laminadas, lajes de concreto com fôrma de aço e conectores tipo pino com cabeça (*stud bolts*).

No entanto, poucas publicações apresentam estudos relacionados ao comportamento de sistemas treliçados compostos por perfis de aço de chapas finas (espessuras de 0,80 a 1,25 mm). Dentre outros aspectos relevantes, a adoção de tais componentes traz dificuldades para soldagem de conectores de cisalhamento tradicionais e incertezas quanto à ductilidade (capacidade de deformação) das vigas treliçadas mistas, por conta do processo de conformação a frio.

Nesse contexto, 3 (três) soluções inovadoras para conectores de cisalhamento, conectados ao banzo superior através de parafusos auto-atarraxantes, foram concebidas e apresentadas por Leal & Batista (2017) e Leal & Batista (2019). Na Figura 1, são ilustradas as principais características associadas aos conectores TWP (*Thin-Walled Perfobond*), TWC (*Thin-Walled Channel*) e TWVP (*Thin-Walled Vertical Post*).

Em todos os casos, os elementos estruturais apresentam mecanismos resistentes para evitar o deslizamento longitudinal e o descolamento vertical (efeito de *up-lifting*) entre o banzo superior e a laje de concreto. Nos conectores TWP e TWVP, as armaduras de aço transversais (diâmetro de 4,2 mm) foram idealizadas para garantir maior capacidade de deformação (ductilidade) aos conectores de cisalhamento.

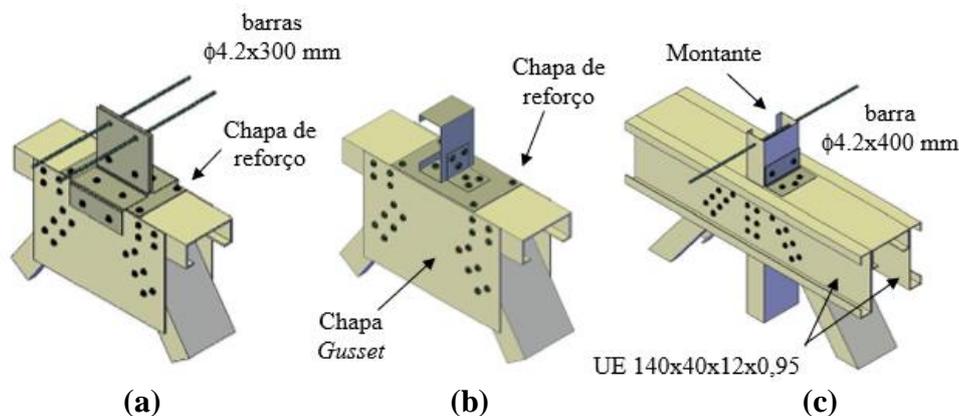


Figura 1 – Conectores de cisalhamento propostos para treliças de chapas finas. (a) TWP, (b) TWC e (c) TWVP

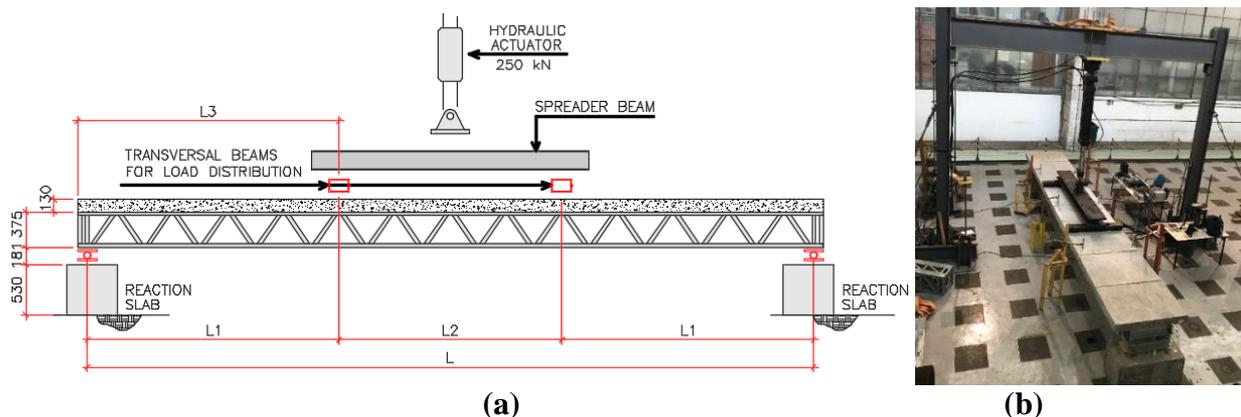
Após a realização dos ensaios de *push-out*, os resultados experimentais foram comparados com requisitos estabelecidos pelo *Eurocode 4* (2004), para caracterização da capacidade resistente e ductilidade. Os dados obtidos indicam que os conectores TWP e TWC apresentam adequada capacidade de deformação e forças resistentes superiores às estimativas iniciais, baseadas em formulações analíticas. Discussões mais detalhadas sobre o comportamento da ligação entre aço e concreto foram apresentadas em Leal (2019).

2. Instrumentação dos protótipos em escala real

Os ensaios de flexão em escala real foram realizados para 3 (três) protótipos compostos por treliças de aço formadas por perfis formados a frio e lajes unidirecionais pré-moldadas de concreto armado (enchimento em

EPS). A solidarização entre aço e concreto foi garantida através dos conectores de cisalhamento TWP, TWC e TWVP desenvolvidos por Leal (2019), Batista & Leal (2020). As figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam características gerais dos protótipos e detalhes da instrumentação adotada.

As vigas treliçadas mistas foram avaliadas através de ensaio de flexão por 4 (quatro) pontos, com vão livre compreendido entre 7.600 mm (ER-TWP) e 7.580 mm (ER-TWC e ER-TWVP). O carregamento foi aplicado através de atuador hidráulico de 500 kN (Figura 2), com controle de deslocamentos (Sistema MTS) e velocidade do pistão entre 0,005 e 0,02 mm/s. A obtenção de dados foi feita através de *Data Logger* da Kyowa, com frequência de aquisição de 2 Hz.



Protótipo	L	L1	L2	L3	f_c	f_y	Espessura do conector (mm)
Escala Real	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	
ER-TWP	7600	2635	2330	2735	16,5	375	1,25
ER-TWC	7580	2615	2350	2725	26,0	360	0,95
ER-TWVP	7580	3125	1330	3235	26,0	360	0,95

Figura 2 – (a) Vista lateral do arranjo experimental para os ensaios de flexão; (b) Vista superior do arranjo experimental.

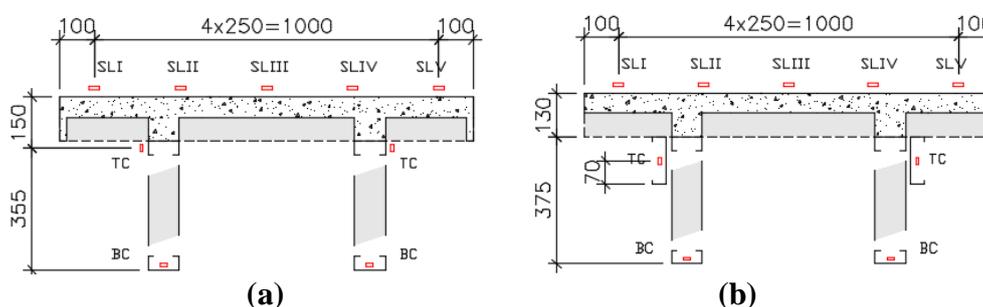


Figura 3 – Seção transversal da estrutura ensaiada, com a disposição dos extensômetros no topo da laje de concreto, no banzo superior e no banzo inferior: (a) ER-TWP e ER-TWC e (b) ER-TWVP

A instrumentação adotada, destacada nas figuras 3 e 4, incluem extensômetros na face superior do concreto e nos banzos superior e inferior. Além disto, foram posicionados flexímetros verticais e horizontais, possibilitando a avaliação das flechas e deslocamentos relativos entre aço e concreto, respectivamente.

Na Figura 5, é possível observar as características dos apoios de extremidade, estabelecidas como móvel e fixo (rolete soldado). Durante a concepção dos protótipos, adotou-se uma maior quantidade de parafusos de ligação para evitar colapso precoce das estruturas, nas regiões de apoio.

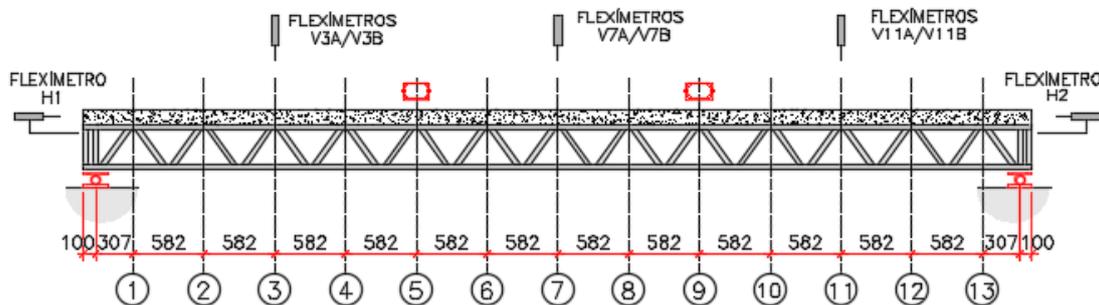


Figura 4 – Posicionamento dos flexímetros (protótipo ER-TWP) para medição dos deslocamentos verticais (V1, V3 e V7) e do deslizamento relativo aço-concreto (H1 e H2)

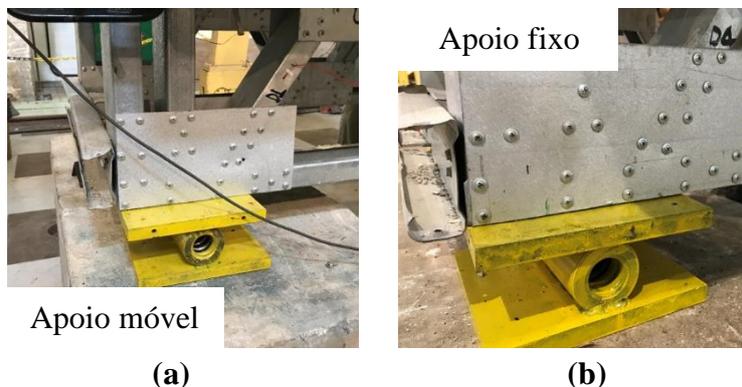


Figura 5 – Apoios nas extremidades: (a) móvel horizontalmente e (b) fixo (rolete soldado)

3. Modelos analíticos para avaliação do momento de inércia efetivo e momento resistente

Os modelos analíticos para determinação das características estruturais são apresentados pela norma americana SJI 200 e pela ABNT NBR 8800:2008. A avaliação da rigidez à flexão da estrutura é feita através de características de seção transversal, conforme pode ser observado na Figura 6.

Na Figura 6a, o modelo que serve de referência para a obtenção do momento de inércia efetivo admite distribuição de forças em regime elástico e com variação linear, ao longo da altura das vigas treliçadas mistas. Segundo a ABNT NBR 8800:2008, para ações atuantes após o concreto alcançar 75% da resistência característica (f_{ck}), o momento de inércia efetivo (I_{ef}) pode ser expresso pela Equação 1. O fator de 15% é adotado para levar em conta os efeitos das deformações por cisalhamento.

$$I_{ef} = I_{tm} - 0,15 \cdot I_{trel} \quad (1)$$

onde

I_{tm} é o momento de inércia da seção homogeneizada, formada pelo concreto comprimido e pelo banzo inferior tracionado (Figura 6a);

I_{trel} é o momento de inércia da seção de aço, formado pelos bantos superior e inferior (Figura 6b);

Segundo Murray & Davis (2015), o momento de inércia efetivo pode ser expresso pela Equação 2, levando em consideração o tipo de diagonais adotadas para as treliças de aço.

$$I_{ef} = \frac{1}{\gamma/I_{trel} + C_r/I_{tm}} \quad (2)$$

$$C_r = 0,90 \cdot (1 - e^{-0,28 \cdot L/D})^{2,8} \leq 0,90 \quad (3)$$

$$C_r = 0,721 + 0,00725 \cdot L/D \leq 0,90 \quad (4)$$

onde:

γ é um coeficiente que varia em função do tipo de diagonal adotada para a treliça de aço e é expresso por $\gamma = 1/C_r - 1$. As equações 3 e 4 correspondem a diagonais compostas por cantoneiras e barras redondas, respectivamente, e L/D é a razão entre o vão livre e a altura total da treliça de aço.

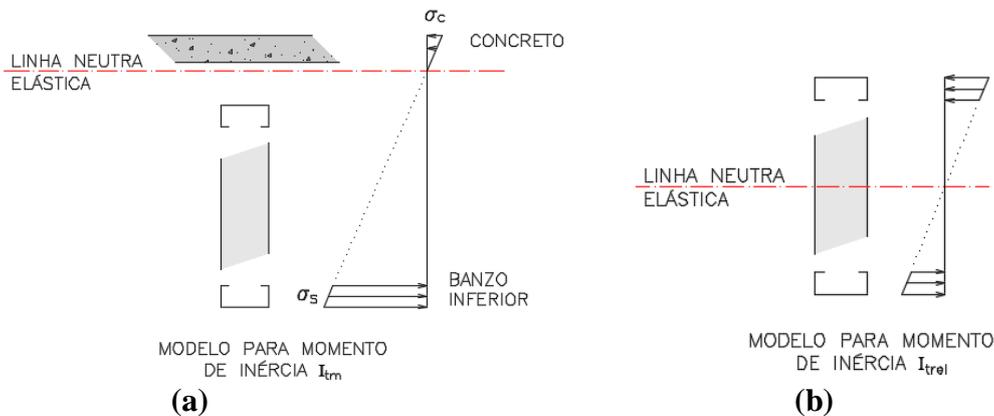


Figura 6 – Características de seção transversal e modelos analíticos para avaliação das propriedades estruturais

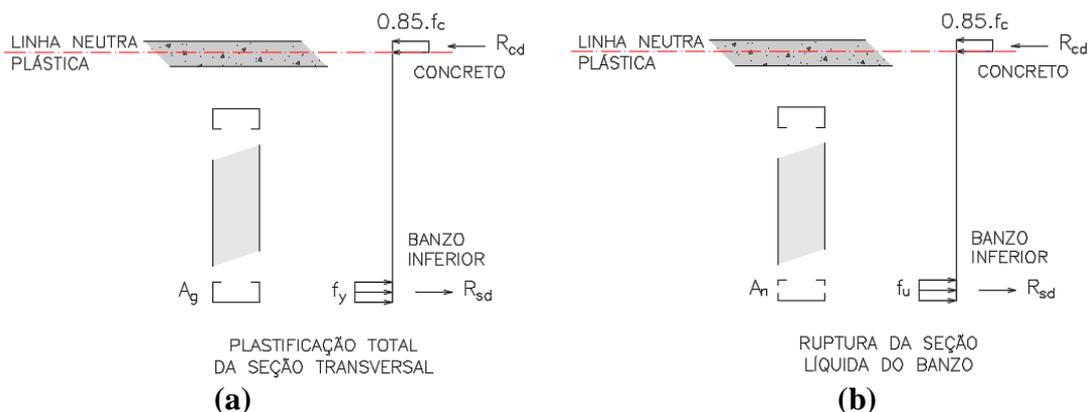


Figura 7 – Seção transversal idealizada para a obtenção do momento resistente: (a) Plastificação total da seção e (b) Ruptura da seção líquida do banzo inferior

Em relação ao modelo analítico para determinação do momento resistente, a ABNT NBR 8800:2008 e o SJI 200 (2015) estabelecem expressões dadas em função do momento de plastificação total da seção composta pelo concreto comprimido e banzo inferior tracionado (Figura 7).

É importante ressaltar que o SJI 200 (2015) recomenda ainda que seja verificado mecanismo de colapso associado à ruptura da seção líquida, contemplando a presença de furos no banzo inferior, conforme destacado na Figura 7b.

4. Avaliação da rigidez à flexão dos protótipos

Os resultados experimentais obtidos, através dos ensaios de flexão em escala real, são apresentados a seguir. Levou-se em consideração, para cada um dos protótipos investigados, o efeito do peso próprio da estrutura (F_{pp}). Maiores informações podem ser observadas em LEAL (2019).

Para análise da rigidez à flexão dos protótipos, foram determinados momentos de inércia secantes, para cada estágio de carregamento total. A Figura 8 apresenta as expressões analíticas adotadas, levando em consideração as diferenças no arranjo experimental (Figura 2).

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam os dados experimentais obtidos, associados aos protótipos ER-TWP, ER-TWC e ER-TWVP, respectivamente. Em função do comportamento não linear das vigas treliçadas mistas, especialmente após a plastificação do banzo inferior, os resultados foram informados para cada estágio de carregamento (F_{tot} / F_{rup}). A força total (F_{tot}) é obtida através do somatório entre a força equivalente de peso próprio (F_{pp}) e força aplicada pelo atuador hidráulico (F_{at}).

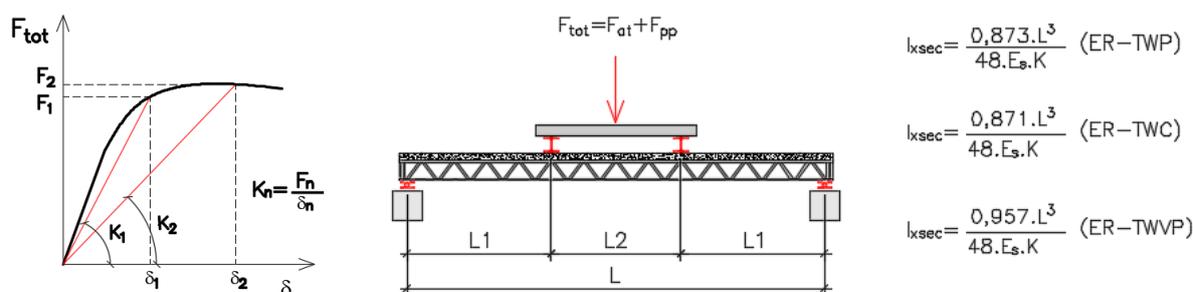


Figura 8 – Relação secante entre a força total (F_{tot}) e os deslocamentos máximos do protótipo (δ), para cada estágio de carregamento

Nas tabelas 1 e 2, observa-se que a relação I_{xsec} e I_{ef} (obtido através do modelo da ABNT NBR 8800:2008) varia entre 90% e 98%, para estágios de carga imediatamente inferiores ao início da plastificação do banzo inferior das treliças. Além disto, os resultados indicam reduções consideráveis no momento de inércia secante até o instante de colapso dos protótipos ER-TWP e ER-TWC.

Na Tabela 3, a relação I_{xsec} e I_{ef} apresenta-se praticamente constante (em torno de 67%) entre os estágios de carregamento inicial ($F_{tot} = 32,01$ kN) e aquele correspondente à plastificação do banzo inferior ($F_{tot} = 42,01$ kN). Os resultados evidenciam uma discrepância acentuada entre os momentos de inércia experimental e analítico, mesmo com o protótipo ER-TWVP estando em regime elástico.

Durante a realização do ensaio de flexão do ER-TWVP, foram observados deslocamentos iniciais bem mais elevados que os demais protótipos, para estágios de carga iniciais. Na Tabela 3, o deslocamento máximo da estrutura, submetida quase que exclusivamente à ação do peso próprio ($F_{tot} = 26,06$ kN), totaliza 27,59 mm (equivalente a $L/275$). Acredita-se que a menor rigidez à flexão do protótipo é uma consequência da maior flexibilidade da ligação entre aço e concreto, através do conector TWVP (montante da treliça de aço) com espessura de 0,95 mm.

A Figura 8 apresenta as relações entre forças aplicadas pelo atuador e deslocamentos medidos pelos flexímetros centrais identificado na Figura 4. É possível observar que os protótipos sofreram perda acentuada de rigidez após a plastificação do banzo inferior e, portanto, os deslocamentos tornaram-se bastante elevados até o instante de colapso.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 1 – Dados para definição do momento de inércia do protótipo ER – TWP

Fat [kN]	Ftot [kN]	Ftot/Frup -	δ [mm]	Es [kN/cm ²]	lef [cm ⁴]	Ixsec [cm ⁴]	Ixsec/lef -
1,50	26,00	38%	10,85			-	-
5,00	29,50	43%	12,31			10142	112%
15,00	39,50	57%	17,64			9478	105%
20,00	44,50	64%	21,30			8843	98%
25,00	49,50	72%	25,90	18861	9064	8091	89%
30,00	54,50	79%	31,77			7262	80%
40,00	64,50	93%	58,00			4707	52%
44,70	69,20	100%	82,76			3540	39%

Tabela 2 – Dados para definição do momento de inércia do protótipo ER – TWC

Fat [kN]	Ftot [kN]	Ftot/Frup -	δ [mm]	Es [kN/cm ²]	lef [cm ⁴]	Ixsec [cm ⁴]	Ixsec/lef -
2,80	27,29	44%	15,86			-	-
5,00	29,49	48%	16,95			7400	102%
15,00	39,49	64%	25,84			6500	90%
17,50	41,99	68%	29,55	18577	7244	6045	83%
20,00	44,49	72%	33,81			5598	77%
25,00	49,49	80%	45,46			4631	64%
30,00	54,49	88%	66,55			3483	48%
37,20	61,69	100%	129,38			2028	28%

Tabela 3 – Dados para definição do momento de inércia do protótipo ER – TWVP

Fat [kN]	Ftot [kN]	Ftot/Frup -	δ [mm]	Es [kN/cm ²]	lef [cm ⁴]	Ixsec [cm ⁴]	Ixsec/lef -
4,05	26,06	45%	27,59			-	-
15,00	37,01	64%	35,72			4842	67%
16,60	38,61	66%	37,77			4778	67%
20,00	42,01	72%	41,85	18577	7174	4692	65%
25,00	47,01	81%	49,80			4413	62%
30,00	52,01	89%	60,52			4017	56%
36,25	58,26	100%	86,76			3139	44%

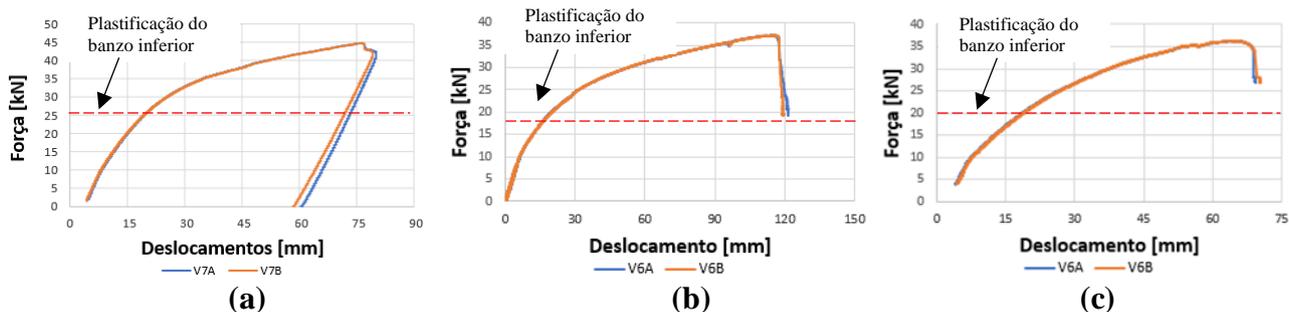


Figura 8 – Relação entre forças no atuador e deslocamentos medidos pelos flexímetros identificados na Figura 4

5. Avaliação da capacidade resistente dos protótipos

Para avaliação da capacidade resistente dos protótipos, as tabelas 4 e 5 apresentam resultados experimentais e estimativas baseadas em procedimentos analíticos. As informações descritas na Tabela 4 são baseadas na plastificação total da seção (área bruta do banzo inferior e largura colaborante de 1.200 mm de concreto comprimido) e consideram os esforços produzidos pelo peso próprio das vigas treliçadas mistas.

A Tabela 5 apresenta os resultados experimentais e um comparativo entre as forças estimadas e os dados obtidos. Em todos os casos, o mecanismo de colapso observado é de ruptura da seção líquida efetiva do banzo inferior, com deslocamentos excessivos dos protótipos.

Tabela 4 – Previsão do momento resistente para os diferentes protótipos, baseado na plastificação total da seção transversal (concreto comprimido e banzo inferior tracionado)

Protótipo	Prof. Linha Neutra Plástica [cm]	Momento Resistente [kN.cm]	Momento Peso Próprio [kN.cm]	Momento Aplicado Estimado [kN.cm]	Força Aplicada Est [kN]	Força Total Estimada Fest [kN]
ER-TWP	1,06	8478	3222	5256	39,9	64,4
ER-TWC	0,50	6468	3202	3265	25,0	49,5
ER-TWVP	0,49	6367	3439	2928	18,7	40,8

Tabela 5 – Comparativo entre resultados experimentais e forças estimadas

Protótipo	Força Máx Aplicada Fat (kN)	Força Equiv F _{pp} (kN)	Força Total F _{rup} (kN)	Relação F _{rup} / F _{est}
ER-TWP	44,7	24,5	69,2	107 %
ER-TWC	37,2	24,5	61,7	125 %
ER-TWVP	36,3	22,0	58,3	143 %

Os resultados comparativos na Tabela 5 indicam que a capacidade resistente dos protótipos é significativamente superior às previsões analíticas. As forças estimadas pelo modelo sugerido pela ABNT NBR 8800:2008 foram conservadoras em todos os protótipos ensaiados.

É válido destacar que o protótipo ER-TWP apresentou colapso precoce, causado pela distribuição não uniforme da força no atuador (F_{at}). Uma das treliças absorveu uma maior parcela de carga, conforme descrito por Leal (2019), e condicionou a ruptura prematura da estrutura. Mesmo assim, a força total (F_{rup}) foi superior à expectativa analítica em 7%.

As figuras 9, 10 e 11 apresentam a distribuição de deformações específicas médias na seção transversal dos protótipos. Os resultados revelam que os banzos inferior e superior estão sujeitos a esforços de tração (deformação positiva) e que a seção mista apresenta apenas 1 (uma) linha neutra plástica, ou seja, há interação completa entre as treliças de aço e os conectores de cisalhamento.

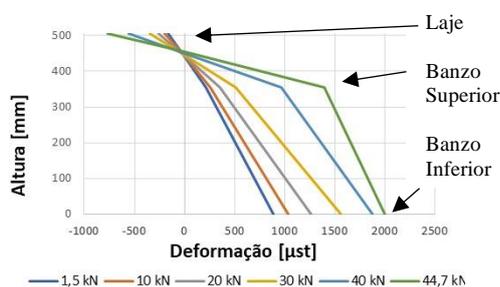


Figura 9 – Distribuição aproximada de deformações específicas na seção transversal do protótipo TWP

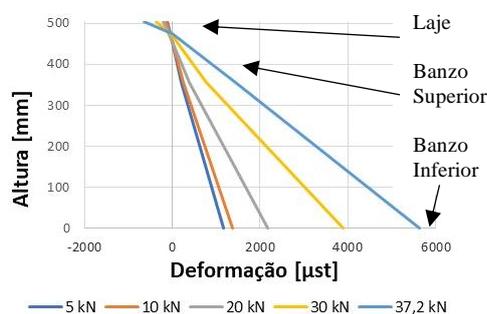


Figura 10 – Distribuição aproximada de deformações específicas na seção transversal do protótipo TWC

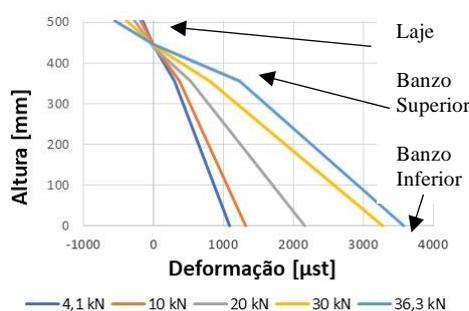


Figura 11 – Distribuição aproximada de deformações específicas na seção transversal do protótipo TWVP

6. Conclusões

Foram realizados ensaios de flexão em escala real para avaliação do comportamento de vigas treliçadas mistas de aço de chapas finas e concreto. A partir dos dados obtidos experimentalmente, foi possível estabelecer um comparativo com metodologias analíticas para estimativa da rigidez à flexão e capacidade resistente dos protótipos.

Em termos de rigidez à flexão e estimativa do momento de inércia efetivo, a formulação sugerida pela ABNT NBR 8800:2008 está bem correlacionada com o comportamento dos protótipos ER-TWP e ER-TWC, considerando estágios de carregamento inferiores ao instante de plastificação do banzo inferior (em regime elástico para o aço do banzo inferior).

Os resultados para o protótipo ER-TWVP, por sua vez, indicam rigidez à flexão bem inferior ao previsto pela equação analítica sugerida pela norma brasileira de aço, para todos os estágios de carga. Acredita-se que a flexibilidade da ligação entre o aço e a laje de concreto, através do montante da treliça (conector TWVP), influenciou negativamente no momento de inércia efetivo.

Nesse contexto, o emprego da formulação da ABNT NBR 8800:2008 deve ser utilizado com ressalvas para vigas treliçadas mistas. Além disto, é recomendado que estudos analíticos, experimentais e computacionais sejam realizados para pesquisas futuras, no intuito de esclarecer a influência da rigidez da ligação entre aço e concreto sobre o momento de inércia efetivo.

Em relação à capacidade resistente, os protótipos ensaiados apresentaram comportamento mais eficiente do que as previsões analíticas, baseadas na plastificação total da seção formada pelo banzo inferior (área bruta) e pelo concreto comprimido da laje.

Os resultados indicam que o colapso ocorre para estágios de carregamentos bem mais elevados (F_{rup} / F_{est} de 125% e 143%, respectivamente para ER-TWC e ER-TWVP) e está associado à ruptura da seção líquida do

banzo inferior, mecanismo de colapso que foi efetivamente confirmado nos ensaios. O protótipo ER-TWP apresentou capacidade resistente 7% mais elevada, em relação à previsão analítica, mas foi negativamente influenciado por sobrecarga mais elevada numa das treliças.

Portanto, observa-se que o modelo analítico sugerido pela ABNT NBR 8800:2008 apresenta previsões conservadoras para a capacidade portante de vigas treliçadas mistas e identificação do mecanismo de colapso real da estrutura.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de agradecer também ao Grupo GypSteel pelo apoio durante a pesquisa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, 2008. NBR 8800: Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, Brasil.
- ANSI/SJI 200. Standard specification for CJ-Series composite steel joists. Steel Joist Institute, 2015.
- AZMI, M.H. Composite open-web trusses with metal cellular floor. Master of Science Thesis. McMaster University, 1972.
- CEN, EN 1994-1-1. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels, 2004.
- LEAL, L.A.A.S; BATISTA, E.M. Composite floor system with CFS trussed beams, concrete slab and innovative shear connectors. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Florianópolis, Brazil, 2017.
- LEAL, L.A.A.S; BATISTA, E.M. Composite floor system with cold-formed trussed beams and pre-fabricated concrete slab. International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS), Prague, 2019.
- LEAL, L.A.A.S. Análise de estrutura de piso misto formado por vigas treliçadas em perfis formados a frio e lajes pré-moldadas de concreto. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.
- LEAL, L.A.A.S; BATISTA, E.M. Experimental investigation of new thin-walled perfbond shear connectors. REM (Revista da Escola de Minas) International Engineering Journal. Brazil, Vol 73. 2020.
- BATISTA, E.M; LEAL, L.A.A.S. Composite floor system with thin-walled steel trussed beams and concrete slab. Journal of Constructional Steel Research (JCSR). Vol 172. 2020.
- LEMBECK, Jr, H.G. Composite Design of open-web steel joists. Master of Science Thesis, Washington University, St. Louis, MO. 1965.
- MURRAY, T.M; DAVIS, B. Technical Digest 5: Vibration of steel joist – concrete slab floors. Steel Joist Institute (SJI), 2015.
- ROBINSON, H; FAHMY, E. The design of partially connected composite open-web joists. Canadian Journal of Civil Engineering, 611-614. 1978.
- SAMUELSON, D. Composite steel joists. AISC Engineering Journal. 111-120. 2002
- TIDE, R.H.R; GALAMBOS, T.V. Composite open-web steel joists. AISC Engineering Journal, Vol. 7, 27-36. 1979
- WANG, P.C; KALEY, D.J. Composite action of concrete slab and open-web joist (without the use of shear connectors). AISC Engineering Journal, Vol. 4, nº 1. 1967.