

VIGOTAS TRELIÇADAS PROTENDIDAS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E ESTUDO DE ESCORAMENTO

Maria Cristina Vidigal de Lima¹, Vanessa Cristina de Castilho² & Francisco A. Romero Gesualdo³

Resumo

As lajes formadas por vigotas treliçadas protendidas têm sido uma alternativa para vencer vãos maiores, com a possibilidade de incluir armadura passiva adicional, comparadas às lajes com vigotas convencionais. No entanto, a literatura técnica carece de informações sobre o espaçamento entre escoramentos das lajes. Para este fim, o presente trabalho trata do desenvolvimento de ensaios experimentais de vigotas treliçadas protendidas como elementos isolados, a fim de obter informações importantes sobre o adequado escoramento para a concretagem da laje, respeitando os limites de flecha. São ensaiadas nove vigotas treliçadas protendidas com variação na altura da treliça, na quantidade de fios de protensão e do diâmetro da armadura do banzo superior da treliça eletrossoldada. Um estudo preliminar é apresentado indicando o vão máximo entre escoras levando em conta o carregamento devido ao peso-próprio da sapata da vigota, da treliça eletrossoldada, da nervura e capa de concreto da laje, bem como a sobrecarga durante a concretagem, baseado na limitação da flecha para escoramento definida pela norma brasileira para cálculo de fôrmas ABNT NBR 15696:2009.

Palavras-chave: Vigotas treliçadas protendidas. Escoramento.

PRECAST PRESTRESSED CONCRETE JOISTS: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND THE STUDY OF SCAFFOLD SUPPORTS

Abstract

Concrete slabs formed by precast prestressed concrete joists are an alternative to overcome larger span, compared to the conventional precast joists, considering the possibility of including longitudinal additional reinforcement. However, the technical literature has lacks information about the required distance between the scaffold supports. This paper deals with the experimental tests of the prestressed concrete joists as isolated element in order to obtain important information about the proper scaffold support distance, taking into account the limited displacement which attend the Brazilian Code. The variables considered on the analysis are the high of the prestressed concrete joist, the number of prestressed bars, and the diameter of reinforcement. A preliminary study is presented indicating the maximum span between the supports, considering the self weight loading of the concrete, the truss and the concrete of the slab, based on the limited displacement as defined by the Brazilian standard code ABNT NBR 15696:2009.

Keywords: Prestressed truss joists. Scaffold support.

1 INTRODUÇÃO

O uso de vigotas treliçadas protendidas tem se intensificado na região do Triângulo Mineiro como uma alternativa para executar lajes com vãos maiores, mantendo as facilidades de montagem e execução das lajes formadas por vigotas treliçadas, tais como a redução do consumo de fôrmas e escoramento, uso de material de enchimento e aspectos construtivos.

Segundo Albuquerque et al. (2005), as vigotas pré-moldadas protendidas apresentam uma série de vantagens sobre as vigotas convencionais e por isso cada vez mais ganham espaço no

¹ Professora Doutora da Faculdade de Engenharia Civil – UFU. Email: macris@ufu.br.

² Professora Doutora da Faculdade de Engenharia Civil – UFU. Email: castilho@feciv.ufu.br.

³ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil – UFU. Email: gesualdo@ufu.br.

mercado consumidor. A laje treliçada protendida (pré-tração) é mais simples de se fabricar por dispensar o uso de extrusora e ainda permite o acréscimo de armadura passiva no seu processo de fabricação.

Albuquerque et al. (2005) observam que além de demonstrar melhor viabilidade econômica quando comparadas às vigotas protendidas, as lajes treliçadas (pré-tração) apresentam algumas vantagens construtivas. As lajes treliçadas quando têm um aumento de solitação podem ser complementadas com armaduras passivas, já nas vigotas há que se aumentar a protensão. As lajes treliçadas têm a armadura da treliça que assegura uma melhor transferência de esforços entre o concreto pré-moldado e o moldado in loco, ao contrário das vigotas protendidas convencionais. Saliencia-se ainda que para a execução das vigotas são necessários equipamentos caros, como moldadoras ou extrusoras.

Merlin et al. (2005) verificaram o benefício da aplicação da protensão no comportamento estrutural de lajes formadas por vigotas com armação treliçada, através de ensaios comparativos em painéis de lajes com e sem armadura protendida. Segundo os autores, a aplicação da protensão na vigota com armação treliçada melhorou o comportamento do painel de laje em relação às deformações; o maior benefício da aplicação da protensão foi para a situação de serviço, justamente a região crítica para este tipo de laje como já mencionado anteriormente; e que a flecha média dos painéis com armadura protendida foi aproximadamente 1/3 da flecha média dos painéis sem armadura protendida, para a carga de serviço dos painéis ensaiados.

Levando-se em conta os benefícios gerais descritos anteriormente tanto quanto ao comportamento da laje como elemento estrutural, bem como dos aspectos construtivos do processo de montagem e execução, é também de fundamental importância conhecer os procedimentos e condições que devem ser atendidos na execução das estruturas provisórias que servem de fôrmas e escoramentos. A norma brasileira que trata do projeto e dimensionamento de fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto é a ABNT NBR 15696:2009.

A ABNT NBR 15696:2009 define como escoramentos as estruturas provisórias com capacidade de resistir e transmitir às bases de apoio da estrutura do escoramento todas as ações provenientes das cargas permanentes e variáveis resultantes do lançamento do concreto fresco sobre as fôrmas horizontais e verticais, até que o concreto se torne autoportante.

Quanto aos métodos de cálculo, a ABNT NBR 15696:2009 prevê que o cálculo de resistência deve ser feito pelo método dos estados-limites. O método de tensões admissíveis pode ser aplicado em caráter transitório, desde que o fator de segurança usado assegure o atendimento das mesmas condições dos estados-limites.

De acordo com El Debs (2000), em relação às fases transitórias, a situação mais desfavorável é a fase de colocação da capa de concreto no local. Nessa fase, devem ser considerados o peso dos elementos da laje, do concreto moldado no local e ainda uma sobrecarga de construção de pelo menos $1,0 \text{ kN/m}^2$. Segundo El Debs (2000), quando for o caso, deve ainda ser prevista a passagem de equipamento de distribuição do concreto.

A fim de atender a norma brasileira para cálculo de fôrmas ABNT NBR 15696:2009, com relação à limitação do valor da flecha para escoramento, este trabalho apresenta os resultados dos ensaios de 9 vigotas treliçadas protendidas como elemento isolado, bem como posterior análise do espaçamento mínimo para o escoramento na concretagem. Trata-se, no entanto, de um estudo preliminar sobre espaçamento entre escoramentos para a concretagem em lajes formadas por vigotas treliçadas protendidas.

2 VERIFICAÇÕES NAS FASES TRANSITÓRIAS

El Debs (2000) observa que quando a nervura está sobre dois apoios extremos e um apoio interno do escoramento, pode-se observar que os momentos fletores são bem distintos dos correspondentes da situação definitiva.

No caso de nervura com armação treliçada, como parte da armadura está sem concreto, as verificações requerem maiores cuidados. Assim, para os momentos fletores positivos, a armadura superior é solicitada à compressão e sua resistência é governada pela flambagem.

El Debs (2000) esclarece que para treliças eletrossoldadas não muito altas, os efeitos decorrentes do cisalhamento não são geralmente críticos. Assim, a flambagem das diagonais da

treliça eletrossoldada sujeitas a forças normais de tração e compressão, e o cisalhamento entre os banzos e as diagonais, não são, em geral, determinantes do modo de ruptura.

No entanto, segundo El Debs (2000), no caso de nervuras de concreto protendido, é necessário tomar cuidado com a situação correspondente à fase de colocação da capa de concreto no local, sendo importante a verificação do estado limite de formação de fissuras.

É ainda recomendado por El Debs (2000) limitar as flechas das nervuras entre as linhas de escoramento na fase de colocação da capa de concreto. De acordo com a norma espanhola EF-96 (1997) apud El Debs (2000), o valor indicado é de 1/1000 da distância entre linhas de escoras e não superior a 3 mm.

3 PRESCRIÇÕES DA ABNT NBR 15696:2009

Segundo a ABNT NBR 15696:2009, os estados limites de utilização referem-se aos estados que, por sua ocorrência, repetição ou duração, provoquem efeitos incompatíveis com as condições de uso da estrutura, tais como, deslocamentos excessivos, vibrações e deformações permanentes. Para este fim, a condição para dimensionamento (Equação 1) é:

$$u_{total} \leq u_{lim} \quad (1)$$

onde: u_{total} é a máxima flecha que ocorre no elemento, calculada com carga de peso próprio do concreto e sobrecarga de 1,0 kN/m², sem aplicação de coeficiente de segurança; e u_{lim} é o deslocamento limite igual a 1 mm + L/500. Entende-se por L o vão entre os apoios, como a distância entre os apoios de cada elemento estrutural do escoramento ou fôrma estudada.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram ensaiadas 9 vigotas treliçadas protendidas com 10 cm de largura, vão de 280 cm, altura da sapata h_s igual a 4,5 cm, o diâmetro do banzo inferior de 5 mm, o diâmetro da diagonal da sinusóide de 4,2 mm, tendo como variáveis o número de fios de protensão sendo 1 ou 2 fios de 5 mm de diâmetro, a altura da treliça eletrossoldada variando entre 10 cm ou 12 cm, e o diâmetro do banzo superior da treliça podendo ser de 6 mm, 7 mm ou 8 mm.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características geométricas das vigotas ensaiadas. O agrupamento de vigotas protendidas com um fio de protensão de 5 mm e com dois fios de protensão de 5 mm pode ser melhor visualizado conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 1 – Geometria das vigotas treliçadas protendidas ensaiadas

	VIGOTAS TRELIÇADAS PROTENDIDAS ENSAIOS DE FLEXÃO				
	b	h _s	L	∅ protensão	TR
Viga	[cm]	[cm]	[cm]	∅ 5mm	
V1	10	4,5	280	1	12845
V2	10	4,5	280	2	12845
V3	10	4,5	280	1	10745
V4	10	4,5	280	2	12645
V5	10	4,5	280	2	10645
V6	10	4,5	280	1	12845
V7	10	4,5	280	1	12845
V8	10	4,5	280	2	12645
V9	10	4,5	280	2	12845

Os ensaios de flexão realizados consistiram na aplicação de uma força central concentrada no meio do vão de uma viga biapoiada com vão de 280 cm, tendo sido medidos os deslocamentos verticais máximos por meio de um transdutor de deslocamento de 10 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 1. Os ensaios foram realizados sobre a laje de reação do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (UFU).

Tabela 2 – Grupo de vigotas treliçadas protendidas ensaiadas com 1 e 2 fios de protensão

1 \varnothing 5mm		2 \varnothing 5mm	
V1	TR 12845	V2	TR 12845
V3	TR 10745	V4	TR 12645
V6	TR 12845	V5	TR 10645
V7	TR 12845	V8	TR 12645
		V9	TR 12845

A força concentrada foi aplicada utilizando uma peça de madeira de alta resistência à compressão (>70 MPa), onde há uma abertura central para se adaptar às barras da treliça e se apoiar na sapata de concreto, e assim fazer a transferência da força diretamente para o concreto (Figura 2). A aplicação da força sobre o banzo superior da treliça eletrossoldada resultaria em um sistema instável e com riscos no apoio da célula de carga. O aparato de madeira tem dimensões da ordem de $5 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$.



Figura 1 – Viga V1 biapoiada sob ação de força concentrada no meio do vão e transdutor de deslocamento para leitura da flecha.



Figura 2 – Detalhe do ponto de aplicação da força concentrada no meio do vão por meio de aparato de madeira com apoio da célula de carga.

Os valores medidos para a força concentrada por meio de célula de carga, bem como os respectivos deslocamentos verticais no meio do vão (transdutor indutivo), foram devidamente armazenados por meio da utilização do sistema de aquisição de dados Spider 8.

4.1 Resultados dos ensaios

As nove vigotas treliçadas protendidas designadas neste trabalho por V1 à V9, conforme apresentado na Tabela 1, foram ensaiadas à flexão com uma força concentrada aplicada no meio do vão, tendo sido medidos os deslocamentos no mesmo ponto. A Figura 3 permite observar o deslocamento da viga durante uma etapa do ensaio, apresentando deformações acentuadas.

Nas Figuras 4 e 5 é possível observar a flambagem da armadura do banzo superior da sinusóide, modo de ruptura para todas as nove vigas ensaiadas. Também foi detectada fissuração na face inferior da sapata de concreto em toda a região do meio do vão (Figura 5b).

Quanto às relações força \times deslocamento no vão central, a Figura 6 permite observar o comportamento frágil do sistema formado pela vigota, apresentando um comportamento praticamente linear até que a flambagem do banzo superior da treliça eletrossoldada impeça a absorção de carregamento apresentando grandes deslocamentos, seguido de aumento de fissuração na sapata de concreto.



Figura 3 – Flecha acentuada observada na vigota V6 durante o ensaio.



Figura 4 – Flambagem do banzo superior da Viga V3-TR 10745 e 1 fio de protensão de 5mm.



a) Flambagem do banzo superior da Viga V4-TR 12645 e 2 fios de protensão de 5mm cada.



b) Fissuração na vigota V5-TR 10645 e 2 fios de protensão de 5mm cada.

Figura 5 – Modos de ruptura das vigotas.

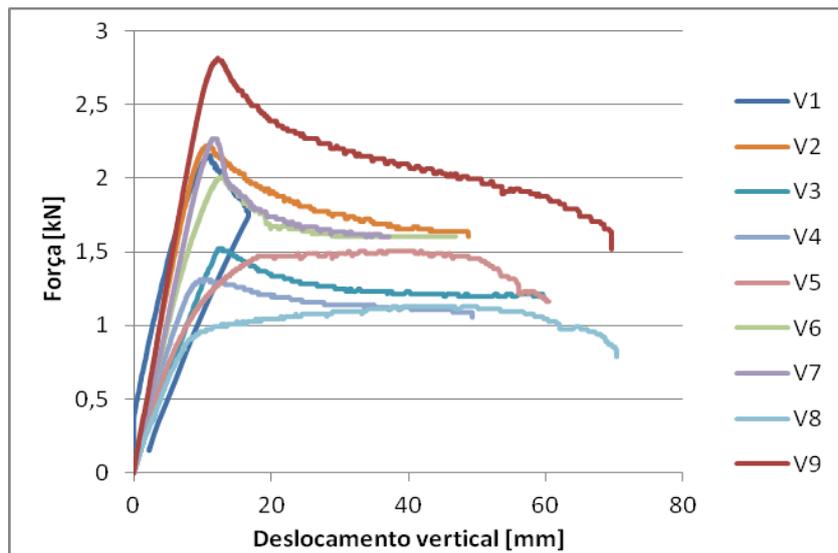


Figura 6 – Relação Força [kN] x Deslocamento vertical [mm] na seção do meio do vão para as 9 vigotas treliçadas protendidas ensaiadas.

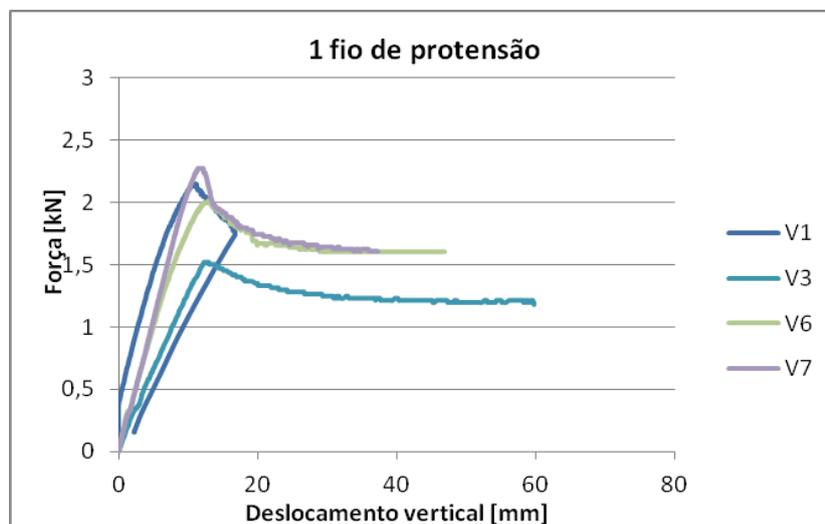


Figura 7 – Relação Força [kN] x Deslocamento vertical [mm] na seção do meio do vão para as vigotas treliçadas com 1 fio de protensão de 5 mm cada.

Analisando separadamente o comportamento das vigotas com um fio de protensão, foi nítido nos ensaios que a rigidez inicial variou muito de uma vigota para outra, independente do tipo de treliça utilizada (Figura 7). Vale ressaltar que as vigotas V1, V6 e V7 têm TR 12845 e apenas a vigota V3 utilizou TR 10745. Acredita-se que a centralização de apenas um fio de protensão compromete o comportamento da peça, uma vez que seu correto posicionamento é mais complicado de ser executado.

Por outro lado, para as vigotas treliçadas protendidas com 2 fios de protensão, representadas neste trabalho por V2, V4, V5, V8 e V9, observa-se na Figura 8 um comportamento elástico mais uniforme quanto à rigidez inicial do elemento estrutural. A vigota V5 tem TR10645, as vigotas V4 e V6 têm TR 12645 e as vigotas V2 e V9 têm TR12845 (Figura 8).

Observa-se nas Figuras 8 e 9 que para as vigotas treliçadas protendidas com 2 fios de protensão, o efeito da correta centralização da pré-tração é menor. Portanto, entende-se que seu comportamento estrutural é menos susceptível aos erros de posicionamento dos cabos de protensão.

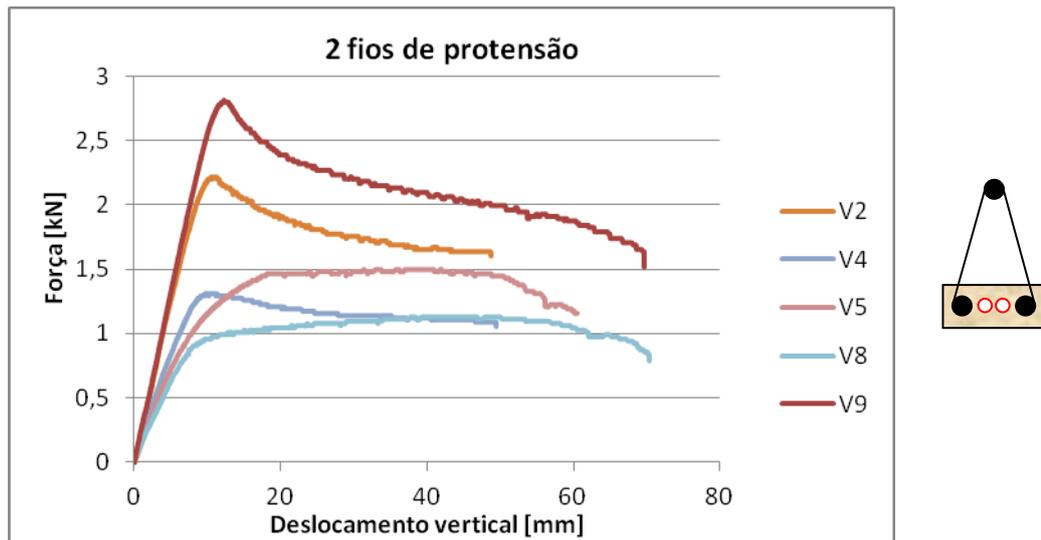


Figura 8 – Relação Força [kN] × Deslocamento vertical [mm] na seção do meio do vão para as vigotas treliçadas com 2 fios de protensão de 5 mm cada.

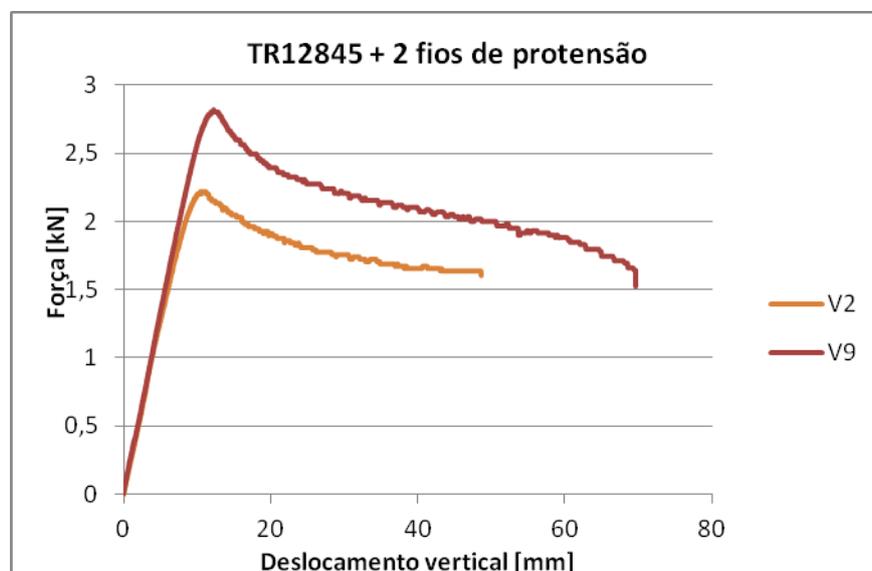


Figura 9 – Relação Força [kN] x Deslocamento vertical [mm] na seção do meio do vão para as vigotas V2 e V9 com TR 12845 e 2 fios de protensão de 5mm cada.

Após os ensaios, observou-se uma deformação residual em todas as vigotas ensaiadas, atribuída essencialmente à flambagem do banzo superior, como se pode observar na Figura 10.



Figura 10 – Deformação residual da vigota V6 TR 12845 (1 fio de protensão) após o ensaio.

5 ESTUDO PRELIMINAR DO ESCORAMENTO PARA CONCRETAGEM DAS VIGOTAS V2 E V9

A fim de aplicar as recomendações da ABNT NBR 15696:2009 para obter a distância entre os escoramentos para o caso das vigotas treliçadas protendidas V2 e V9 com TR12845 e dois fios de protensão de 5 mm cada, o carregamento utilizado nas análises está discriminado na Tabela 3, para intereixo de 50 cm.

Tabela 3 – Carregamento devido a peso-próprio e sobrecarga na vigota durante a concretagem

Material	Carregamento
Material de enchimento EPS	$g_1=5,76 \times 10^{-3}$ kN/m
Sapata da vigota	$g_2=0,113$ kN/m
Treliça eletrossoldada TR12845	$g_3=0,00971$ kN/m
Capa de concreto da laje	$g_4=0,500$ kN/m
Nervura de concreto moldado in loco	$g_5=0,131$ kN/m
Sobrecarga (ABNT NBR 15696:2009)	$g_6=0,500$ kN/m
TOTAL	$q=1,259$ kN/m

A fim de obter um valor, ainda que em caráter empírico, para o espaçamento entre escoramentos para a concretagem de uma laje com vigota treliçada protendida com 2 fios de protensão e TR12845, caso representado neste trabalho pelas vigotas V2 e V9 ensaiadas, foi considerada a rigidez na fase elástica conforme apresentadas pelas curvas ilustradas na Figura 9. Assim, entende-se que, de acordo com as Equações 2 e 3, o valor da rigidez EI das vigotas V2 e V9 vale 119.682.935,21 kNmm².

Nestes termos, da Figura 9, tem-se a relação EI dada pelo valor do deslocamento u do meio do vão da viga e respectivo valor da força P aplicada durante o ensaio, sendo que para P=1,023891 kN, o deslocamento medido foi de 3,9125 mm, conforme indicado na Equação 2.

Esta relação pode ser descrita conforme a Equação 3 relativa ao valor da flecha de uma viga biapoiada sob força concentrada no meio do vão. Com esta relação, tem-se a rigidez EI da viga biapoiada com 280 cm de vão (Equações 4 e 5).

Uma vez conhecido o valor da rigidez EI, para a viga em estudo, e aplicando a recomendação de flecha limite conforme a ABNT NBR 15696:2009 descrita na Equação 6, buscou-se conhecer o valor do vão L que atende esta prescrição, conforme os valores aplicados nas Equações 7 e 8. Finalmente, o valor de L que atende à flecha limite é dado na Equação 9, sendo aproximadamente 2,60 m.

$$tg\theta = \frac{1,023891 \text{ kN}}{3,9125 \text{ mm}} \quad (2)$$

$$u = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3)$$

$$3,9125 \text{ mm} = \frac{(1,023891 \text{ kN})(2800 \text{ mm})^3}{48EI} \quad (4)$$

$$EI = 119.682.935,21 \text{ kN} \cdot \text{mm}^2 \quad (5)$$

$$u = \frac{5qL^4}{384EI} \leq \frac{L}{500} + 1 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\frac{5 \times \frac{1,259 \text{ kN}}{1000 \text{ mm}} L^4}{384 \times 119.682.935,21 \text{ kN} \cdot \text{mm}^2} - \frac{L}{500} - 1 \text{ mm} = 0 \quad (7)$$

$$1,349 \times 10^{-3} L^4 - \frac{L}{500} - 1 \text{ mm} = 0 \quad (8)$$

$$L = 2592 \text{ mm} \quad (9)$$

Para visualizar as expressões dos membros da Equação 6 pode-se definir $u_1(x)$ como a função $\frac{5qx^4}{384EI}$ e $u_2(x)$ como o limite da flecha recomendado pela ABNT NBR 15696:2009 dado por $\frac{x}{500} + 1 \text{ mm}$.

Assim, pode-se observar na Figura 11 que o valor do vão x para o qual a equação é verdadeira é para x igual a 2,60 m, conforme já apresentado na Equação 9.

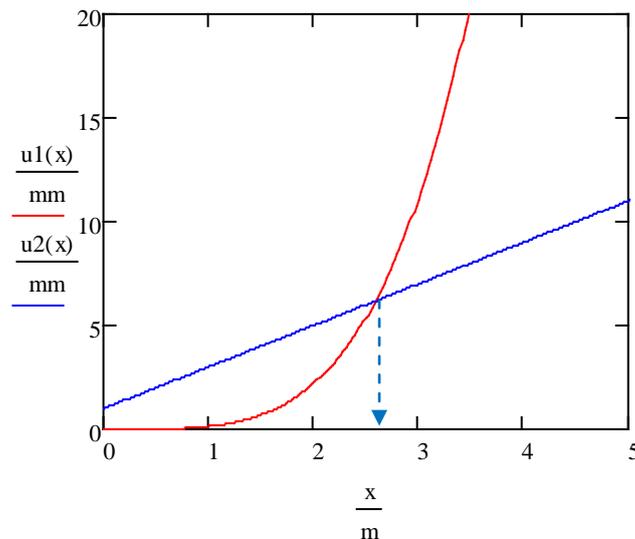


Figura 11 – Relação entre as funções $u_1(x)$ e $u_2(x)$ no vão x .

6 CONCLUSÕES

Finalmente, após a realização dos ensaios para melhor entendimento do comportamento das vigotas treliçadas protendidas como elemento isolado e análise preliminar da indicação do espaçamento entre escoras para a fase de colocação da capa de concreto no local, as principais conclusões deste trabalho podem ser agrupadas como segue:

- Para todas as vigotas ensaiadas observa-se um comportamento praticamente linear até o início da flambagem do banzo superior da treliça eletrossoldada, seguido de grandes deslocamentos e aumento de fissuração na sapata de concreto;
- As vigotas treliçadas protendidas com 2 fios de protensão tem comportamento mais uniforme com relação à rigidez na fase elástica, decorrente da simetria geométrica durante a fase de concretagem e protensão da sapata de concreto da vigota;
- A ruptura das vigotas treliçadas protendidas é governada pela flambagem do banzo superior da treliça eletrossoldada, tendo sido atingida a força última em torno de 2,8 kN para a vigota TR12845 com dois fios de protensão de 5 mm;

- Para a situação analisada neste trabalho, a distância entre as escoras que atende aos limites de flecha recomendados pela ABNT NBR 15696:2009 é aproximadamente de 2,60 m, para a vigota TR12845 com dois fios de protensão de 5 mm cada;
- Entretanto, outras séries de ensaios deverão ser desenvolvidas a fim de permitir estudo mais aprofundado dos deslocamentos das vigotas treliçadas protendidas durante a fase transitória de concretagem da capa no local, fixando o número de fios de protensão e tipo de treliça, bem como proposta analítica para estimativa da flecha e simulação numérica apropriada ao problema em questão.

7 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Eng. Civil Silney Gomes Carvalho, da empresa *PREMON Soluções Construtivas em Painéis e Lajes Treliçadas*, pela gentileza e doação das vigotas treliçadas protendidas para o desenvolvimento deste estudo experimental preliminar.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15696:2009 Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos**. Rio de Janeiro, 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

MERLIN, A. J.; EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T.; NETO, N. M. Análise do Efeito da Protensão em Lajes Pré-moldadas com Armação Treliçada. In: **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**. São Carlos, 3 e 4 de novembro, 2005.

ALBUQUERQUE, A. T.; MOTA, J. E.; CARACAS, J.; NOBRE, E. G. Lajes Treliçadas Protendidas (Pré-Tração). In: **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**. São Carlos, 3 e 4 de novembro, 2005.