

ANÁLISE NÃO LINEAR DE VIGOTAS TRELIÇADAS E VIGOTAS TRELIÇADAS PROTENDIDAS PARA A FASE DE MONTAGEM

NONLINEAR ANALYSIS OF LATTICE JOISTS AND LATTICE PRESTRESSED JOISTS FOR THE ASSEMBLY STAGE

Lorayne Cristina da Silva Alves¹, Vanessa Cristina de Castilho², Rodrigo Reis de Rezende Costa³, Maria Cristina Vidigal de Lima⁴

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: lorayne_cristina@hotmail.com

²Professora Adjunta da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: castilho@feciv.ufu.br

³Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: rodrigorr@hotmail.com

⁴Professora Associada da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, MG.
E-mail: macris@ufu.br

RESUMO

A laje formada por vigotas pré-fabricadas atende a todo tipo de construção civil, e seu uso amplo no mercado brasileiro, corresponde a grandes vantagens, como por exemplo, economia de fôrmas e escoramentos, maior rapidez de execução e diminuição do peso da estrutura. O elemento mais usual é a vigota treliçada sendo foco deste trabalho. Neste caso parte da armação das vigotas é concretada na obra conferindo ao conjunto da laje maior resistência, podendo vencer vãos maiores. Além disso, foi analisada uma variação deste elemento, a vigota treliçada protendida, que apresenta uma armadura de protensão na base de concreto da vigota. Desta forma, este artigo trata de uma análise numérica comparativa de vigotas treliçadas e vigotas treliçadas protendidas, usando o *software* ANSYS. Nessas análises foi considerada ainda a não linearidade dos materiais para elementos com 3m de comprimento, para a etapa de montagem na obra. Pelos resultados pode verificar que a vigota treliçada protendida se mostrou mais eficaz que a vigota treliçada. Para a análise não linear, a ruptura do elemento ocorreu pela plastificação do concreto e em alguns casos, pela flambagem da armadura do banzo superior.

Palavras-chave: vigota treliçada, vigota treliçada protendida, análise não linear, análise numérica, fase de montagem.

ABSTRACT

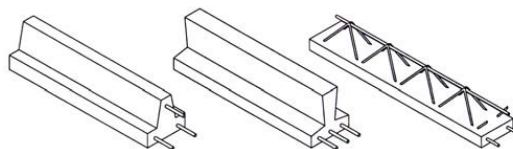
The slab of prefabricated beams is used to all type of construction, and its use in the Brazilian market, represents major advantages, such as reduced of scaffold support and forms, fast fabrication and decreased the self-weight structure. The most usual joist and focus of this work is the lattice joist. In this case, part of the reinforcement is cast in place providing to the system, greater strength and able to use larger spans. Furthermore, this study aims a variation of this element, the lattice prestressed joist, which has a prestressed reinforcement in the concrete base. Therefore, this article shows a comparative analysis of lattice joist and lattice prestressed joist, using the ANSYS computer program. The physical nonlinear behavior of materials involved is considered in the simulations for elements with span of 3m for the assembly stage. The results show that the lattice prestressed joist is more effective than the lattice joist. The concrete material achieved the failure by cracking and in another cases, the buckling of the upper reinforced

Keywords: lattice joists, lattice prestressed joists, nonlinear analysis, numerical analysis, assembly stage.

1 – INTRODUÇÃO

As lajes nervuradas vêm ganhando, cada vez mais, espaço na construção civil. Esse sistema apresenta como vantagem principal a redução da parcela de concreto abaixo da linha neutra. As nervuras ou vigotas utilizadas no Brasil são de seção T invertido, em concreto armado ou concreto pretendido ou com uma armadura em forma de treliça, que projeta para fora da seção (a chamada laje com armação treliçada) (SILVA, 2012). Na Figura 1 são apresentados os tipos de vigotas usadas.

Figura 1 – Tipos de vigotas pré-moldadas (EL DEBS, 2000).



As vigotas pré-moldadas de concreto armado são produzidas em fôrmas metálicas simples. Deve-se ressaltar que geralmente, esse tipo de laje permite vãos da ordem de 5m com nervuras em concreto armado, da ordem de 10m com nervuras de concreto pretendido e da ordem de 10m com nervuras com armação treliçada.

O comportamento estrutural das lajes formadas por vigotas pré-moldadas corresponde aos das lajes armadas em uma direção (lajes unidirecionais), com seção resistente composta pela parte pré-moldada e pelo concreto moldado no local. Cabe salientar que a partir de vigotas com armação treliçada pode se obter lajes armadas nas duas direções (lajes bidirecionais).

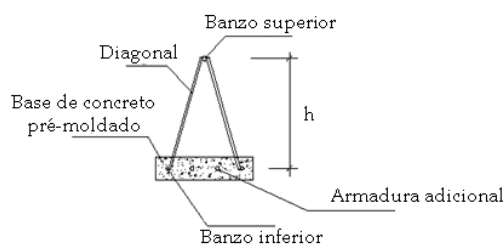
Um dos elementos que são amplamente utilizados no mercado brasileiro é a vigota treliçada. Além disso, existem alguns estudos que analisam uma armadura protendida na base de concreto a fim de melhorar o comportamento estrutural das lajes. Tais elementos são chamados vigotas treliçadas protendidas.

Podem ser ressaltadas diversas vantagens do uso de vigotas treliçadas em relação ao sistema convencional, como a eliminação completa de fôrmas, redução sensível da quantidade de escoramentos, obtenção de uma superfície inferior plana eliminando a necessidade de forro e utilização de elementos pré-moldados com armaduras pré-incorporadas em ambiente industrial (MERLIN *et al.*, 2005).

As lajes com vigotas treliçadas podem ser tratadas como estruturas monolíticas devido à solidarização da armação treliçada com o concreto moldado no local. Essas lajes comportam-se de maneira semelhante a uma laje projetada convencionalmente, sendo que os elementos pré-moldados têm a função de racionalidade, dando economia e rapidez (BORGES, 1997; GASPAS, 2000).

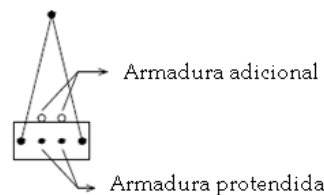
A armação treliçada é uma estrutura formada por barras de aço, solidarizadas por meio de soldagem por eletrofusão em alguns pontos de modo a formar uma treliça espacial. As diagonais dessas treliças proporcionam rigidez ao conjunto nas fases transitórias, ligação entre o concreto moldado no local e o concreto na base pré-moldada além de serem utilizadas como armaduras transversais para resistir às tensões de cisalhamento. Na Figura 2 são apresentadas as características de uma vigota treliçada.

Figura 2 – Vista lateral da vigota treliçada (MERLIN *et al.*, 2005)



Deve-se ressaltar que, em virtude das vigotas protendidas apresentarem muitas vantagens sobre as vigotas convencionais, foi avaliado em Albuquerque *et al.* (2005) um elemento que apresentasse as características tanto da treliçada quanto da protendida, a chamada vigota treliçada protendida. Esse elemento, aplicado em lajes, é mais simples de se fabricar já que dispensa o uso de extrusora e ainda permite o uso de armadura passiva no seu processo de fabricação (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; MERLIN *et al.*, 2005). Na Figura 3 é ilustrada uma vista da vigota treliçada protendida.

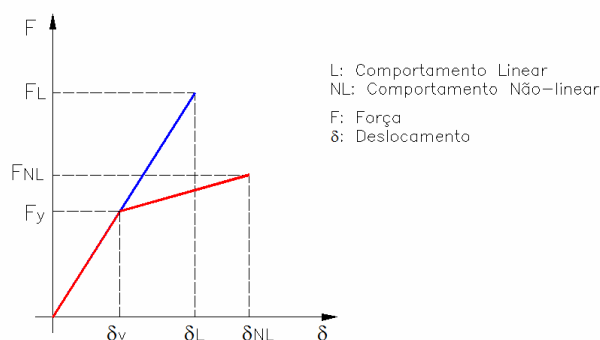
Figura 3 – Vista lateral da vigota treliçada protendida.



Durante as análises dos elementos isolados quando da laje formada por esses elementos, deve-se levar em conta que o comportamento do material constituinte da estrutura, não é elástico perfeito. São introduzidos os efeitos da fissuração, da fluência, o escoamento das armaduras, entre outros que conferem ao mesmo um comportamento não linear, a chamada não linearidade física.

Gomes *et al.* (2008) ressaltam que o estudo do comportamento real das estruturas submetidas a carregamentos externos é um tema exaustivo e que são realizados com base nos aspectos da teoria elástico-linear. Entretanto, a evolução dos meios de cálculo vem permitindo uma ampliação na realização de análises não lineares, que contemplam o comportamento não linear do material possibilitando o dimensionamento de estruturas para esforços inferiores àqueles obtidos nas análises elásticas (Figura 4).

Figura 4 – Exemplo de uma análise não linear (GOMES *et al.*, 2008).



Neste trabalho é apresentado um estudo do comportamento das vigotas treliçadas e vigotas treliçadas protendidas na fase de montagem, considerando dois valores para a altura da vigota. Para a realização de todas as modelagens numéricas foram utilizados os recursos disponíveis do *software* computacional ANSYS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nessa fase foi avaliado tanto o comportamento desses elementos isolados considerando o regime linear quanto a não linearidade dos materiais constituintes.

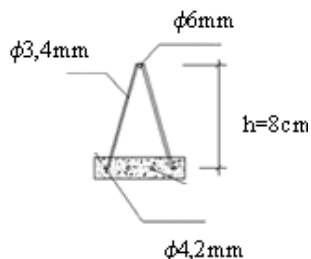
2 – VIGOTAS TRELIÇADA E TRELIÇADA PROTENDIDA

A base de concreto no caso da vigota treliçada é moldada em fôrma metálica para se garantir a qualidade do concreto lançado em espessuras de 2 a 3 cm, empregando-se concreto com agregado miúdo e rico em pasta de cimento, a fim de evitar a operação de vibração. As armaduras em

treliça são usualmente fabricadas com alturas variando de 80 a 300 mm com possível variação de centímetro a centímetro.

A identificação de cada tipo é feita segundo a nomenclatura da ABNT NBR 14862:2002, como exemplificado na Figura 5.

Figura 5 – Armação da vigota treliçada TR 08634.



Sob encomenda, as treliças podem ser fabricadas com armaduras adicionais introduzidas na base de concreto, sem que acarrete dificuldade de fabricação. Além disso, esse tipo de vigota treliçada favorece a utilização das lajes armadas nas duas direções (EL DEBS, 2000).

Os procedimentos de cálculo para o dimensionamento e verificação de lajes formadas por vigotas treliçadas são encontrados nas normas brasileiras (ABNT NBR 6118, 2007; ABNT NBR 9062, 2006; ABNT NBR 14859-1, 2002; ABNT NBR 14859-2, 2002; ABNT NBR 14860-1, 2002; ABNT NBR 14860-2, 2002).

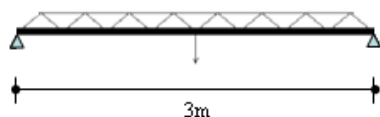
No caso da vigota treliçada protendida, verifica-se que o estiramento dos fios é feito numa pista e em seguida as treliças são posicionadas para concretagem. Este sistema consiste em um sistema com operação rápida e simples com baixo custo e fácil adaptação aos diversos tamanhos de vãos. Após o concreto atingir a resistência desejada os fios são liberados e o elemento está pronto para o uso (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005).

A base da vigota treliçada protendida varia de 10 cm a 11 cm e a altura de 4 a 5 cm. Deve-se ressaltar que as armaduras em treliça são as mesmas usadas na vigota treliçada. A diferença está na fabricação desse elemento, pois existe uma armadura protendida na placa de concreto da vigota com armação treliçada.

3 – DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura analisada em ambos os elementos foi apoiada nas extremidades. Na Figura 6 é apresentado um croqui da estrutura analisada. Foi considerada uma carga 1,5 kN aplicada no meio do vão. O valor adotado para a carga se refere ao obtido em ensaios experimentais da vigota treliçada protendida, realizada por Lima *et al.* (2013).

Figura 6 – Representação dos apoios para as vigotas analisadas.



Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as características das vigotas, bem como os tipos de análises realizadas no modelo numérico considerando análise linear e não linear.

Tabela 1 – Características das vigotas para a análise linear.

Análise Linear	
AL-H8-VT	TR 08645
AL-H10-VT	TR 10645
AL-H8-VTP	TR 08645
AL-H10-VTP	TR 10645

VT – vigota treliçada; VTP – vigota treliçada protendida

Tabela 2 – Características das vigotas para a análise não linear.

Análise não Linear	
ANL-H8-VT	TR 08645
ANL-H10-VT	TR 10645
ANL-H8-VTP	TR 08645
ANL-H10-VTP	TR 10645

VT – vigota treliçada; VTP – vigota treliçada protendida

Deve-se ressaltar que foram mantidos constantes os diâmetros das barras superior ($\phi 6$ mm) e inferior ($\phi 5$ mm), bem como das diagonais ($\phi 4,2$ mm) em ambos os elementos analisados. Foram consideradas ainda duas barras adicionais de $\phi 6$ mm para a vigota treliçada e dois fios de protensão de $\phi 6$ mm para a vigota treliçada protendida.

4 – MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta seção são apresentadas as características principais usadas na modelagem numérica das vigotas treliçadas e vigotas treliçadas protendidas.

4.1 Elementos finitos utilizados

Na busca da solução foi utilizado o *software* computacional ANSYS que se baseia nos Métodos dos Elementos Finitos.

Na discretização da base de concreto foi adotado o elemento tridimensional SOLID65. É um elemento que apresenta oito nós e cada nó com três graus de liberdade, ou seja, translações nas direções x , y e z . Além disso, este elemento permite simular a fissuração na tração e o esmagamento na compressão, bem como a não linearidade física.

Para treliças, barras adicionais e fios de protensão, foi usado o elemento LINK8. O elemento possui dois nós com três graus de liberdade cada, sendo três translações nas direções x , y e z .

4.2 Características e propriedades dos materiais

Nas análises das vigotas treliçadas foram consideradas as seguintes ações verticais: a) peso-próprio da base de concreto; b) carregamento no meio do vão da vigota.

Nas análises foram definidas as seguintes características:

- Módulo de elasticidade longitudinal do concreto: $E_c = 2,52 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$;
- Coeficiente de poisson do concreto: $\nu = 0,2$;
- Resistência do concreto à compressão: $2,5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$;
- Resistência do concreto à tração: $2,5 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$;
- Peso específico do concreto: 25 kN/m^3 ;
- Módulo de elasticidade longitudinal do aço: $E_s = 2,15 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$;
- Coeficiente de poisson do aço: $\nu = 0,3$;
- Tensão de escoamento do aço: $f_{yd} = 5 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$;
- Tensão última do aço: $f_u = 5,5 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$;
- Tensão de escoamento do aço de protensão: $f_{pyk} = 1,585 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$;
- Tensão última do aço de protensão: $f_{ptk} = 1,75 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$;
- Seção transversal da base de concreto: $0,105\text{m} \times 0,045\text{m}$.

4.3 Modelo de ruptura para os materiais

A seguir são apresentados os modelos de ruptura adotados para cada elemento. Para a consideração da não linearidade foi usado o algoritmo de Newton-Raphson modificado.

O carregamento no modelo foi aplicado de forma incremental controlado pelo recurso do ANSYS denominado “Automatic Time Stepping”. Foram adotados nas análises 30 passos de carga e o critério de convergência foi baseado no controle dos deslocamentos.

4.3.1 Base de Concreto

Os critérios de resistência adotados para o concreto foram o critério *Concrete*, baseado no critério de *Willian-Warnke*, e o critério DP de *Drucker-Prager*.

O modelo *Concrete* permite a simulação da fissuração do concreto quando submetido a tensões de tração e esmagamento na compressão. Para a utilização deste modelo são usados os parâmetros apresentados na Tabela 3.

A resposta do concreto à compressão foi desabilitada estipulando o valor para a resistência última uniaxial de compressão igual a -1. Desta forma, foi adotado o critério de plastificação de Von Mises para o concreto na compressão.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros do modelo *Concrete*.

Parâmetros	Valores
coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta	0,2
coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada	0,6
resistência última uniaxial de tração do concreto	$f_{ck}/10$
resistência última uniaxial de compressão do concreto	-1

O modelo adotado para o concreto na compressão foi o de *Drucker-Prager* (JACOMASSI, 2007). Para o critério de *Drucker-Prager*, a superfície de ruptura pode ser aproximada por um cone com vértice sobre o eixo

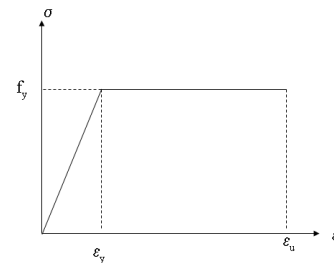
hidrostático sendo descritos apenas por dois parâmetros: ângulo de atrito interno do material e o coeficiente de coesão. No caso do concreto, tais parâmetros são descritos em função da tensão de ruptura à tração (f_{cr}) e da tensão de ruptura à compressão (f_c), conforme apresentado pela Equação 1. Os valores adotados para este trabalho foram: $c = 4431 \text{ kN/m}^2$; $\phi = 54,903^\circ$.

$$f_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad f_{cr} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (1)$$

4.3.2 Armadura passiva

Para o comportamento do aço foi adotado o modelo elasto-plástico perfeito definido pelo critério de ruptura de Von Mises (Figura 7).

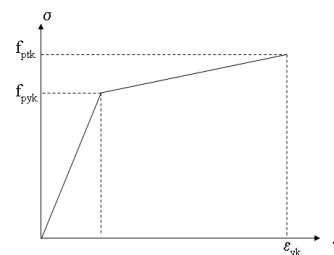
Figura 7 – Modelo constitutivo adotado para o aço das treliças.



4.3.3 Armadura ativa

Para o comportamento do aço de protensão foi adotado o modelo bilinear definido pelo critério de ruptura de Von Mises (Figura 8).

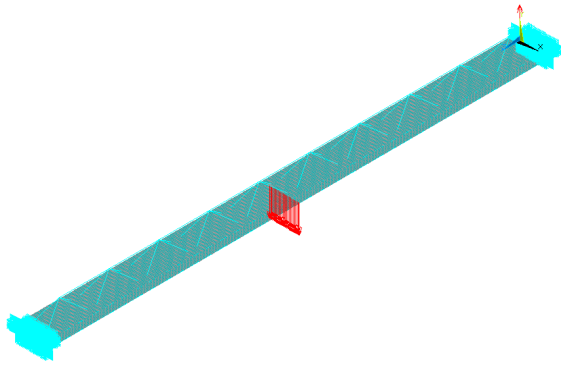
Figura 8 – Modelo constitutivo adotado para o aço de protensão.



4.4 Discretização da estrutura analisada

Na Figura 9 é ilustrada a malha adotada para ambas as vigotas.

Figura 9 – Discretização das vigotas analisadas.



Para simular a força de protensão neste trabalho foi aplicada uma variação de temperatura nos fios de protensão, de tal forma que esses elementos se contraíam gerando com isso uma força de compressão na base de concreto (FERREIRA, 2007). De acordo com Ferreira (2007) a diferença de temperatura introduzida nos fios deve produzir um esforço axial nos elementos igual ou bastante próximo ao valor da força de protensão. Deve-se ressaltar que o valor da força foi estimada segundo orientações de Albuquerque *et al.* (2005). Desta forma, para produzir uma força de protensão aproximada de 70 kN nos fios foi aplicada uma variação de temperatura de -490°C nesses elementos. Esse valor aproximado foi obtido pela Resistência dos Materiais, conforme apresentado pela Equação 2 (FERREIRA, 2007).

$$\Delta T = \frac{P}{\alpha E_p A_p} \quad (2)$$

Onde:

P – força de protensão;

α – coeficiente de dilatação térmica

E_p – módulo de elasticidade da armadura de protensão

A_p – área do fio

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram analisados os resultados para as alturas em ambas as vigotas. Na Tabela 4 são apresentados os valores dos deslocamentos finais no meio do vão.

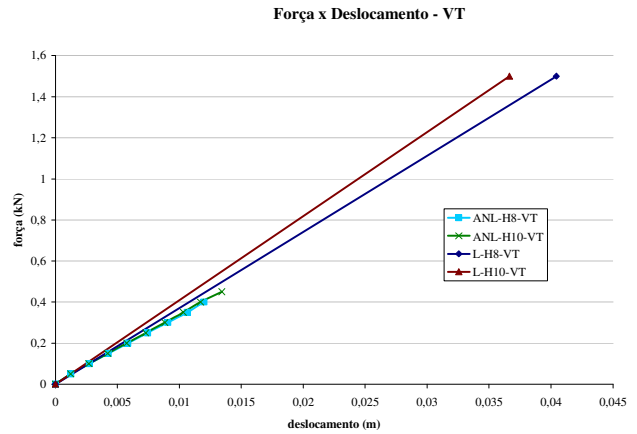
Tabela 4 – Valores do deslocamento no meio do vão.

Tipo de vigota	Altura (cm)	Linear (m)	Não Linear (m)	Passo de carga
VT	8	0,04043	0,01198	8
	10	0,03665	0,01343	9
VTP	8	0,04042	0,01144	7
	10	0,03656	0,01482	10

Verifica-se pela tabela que no caso dos dois elementos, não há convergência de todos os passos de carga. Deve-se ressaltar que em ambas as vigotas a não convergência foi decorrente do esgotamento da capacidade resistente das vigotas, especificamente a plastificação do concreto.

Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os valores dos deslocamentos no meio do vão para a vigota treliçada (VT) e vigota treliçada protendida (VTP), respectivamente em função da força. Verificam-se, pelas figuras, que o comportamento é bem semelhante em ambas as vigotas.

Figura 10 – Deslocamento da vigota treliçada para análise linear e não linear.



Na Figura 12 observa-se a comparação das duas vigotas analisadas. Pelos resultados verifica-se que para altura de 10 cm, os valores foram bem próximos. A vigota treliçada protendida apresenta deslocamento levemente maior se comparado a vigota treliçada. No geral, praticamente não houve alteração de resultados para as duas alturas em ambas as vigotas. Deve-se ressaltar que no caso da vigota treliçada protendida houve convergência em aproximadamente 33% do carregamento atuante para altura de 10 cm.

Figura 11 – Gráfico Força x Deslocamento da vigota treliçada protendida para análise linear e não linear.

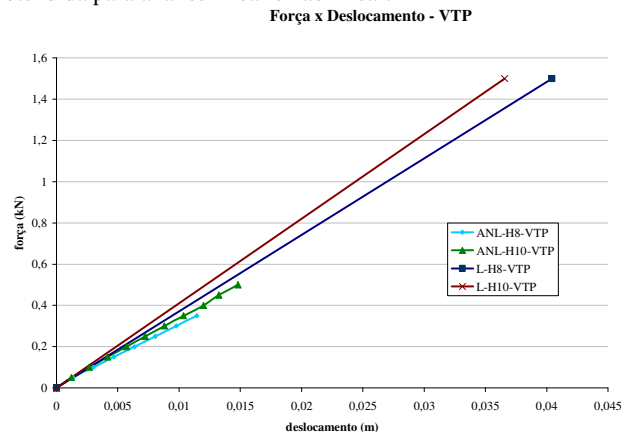
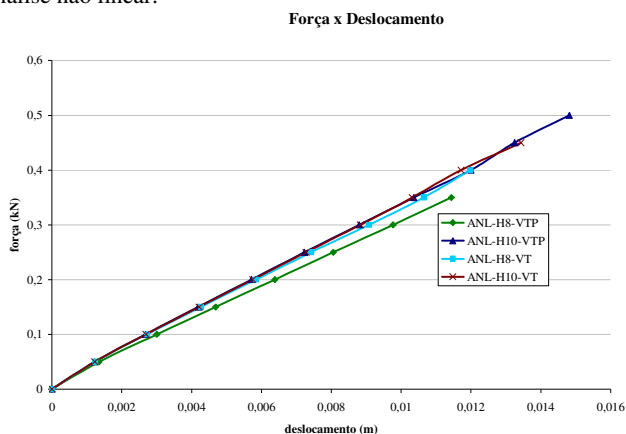


Figura 12 – Gráfico Força x Deslocamento das vigotas para análise não linear.



Os valores da tensão de Von Mises da base de concreto para ambas as vigotas estão mostrados na Tabela 5. Como era de se esperar os valores para o regime não linear foram bem inferiores aos valores do regime elástico.

Tabela 5 – Valores da tensão de Von Mises no meio do vão na base de concreto.

Tipo de vigota	Altura (cm)	Linear (kN/m ²)	Não Linear (kN/m ²)
VT	8	9,47.10 ⁴	2,74.10 ⁴
	10	9,26.10 ⁴	3,31.10 ⁴
VTP	8	9,51.10 ⁴	2,62.10 ⁴
	10	9,18.10 ⁴	3,76.10 ⁴

Nas Figuras 13 e 14 são apresentados os deslocamentos para a vigota treliçada e vigota treliçada protendida obtidos pelo ANSYS.

Figura 13 – Deslocamento da vigota treliçada de altura 8 cm para análise linear (unidades em m).

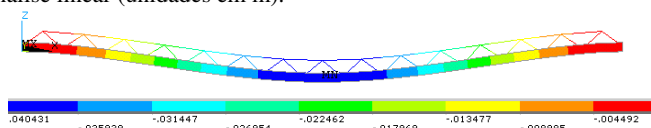
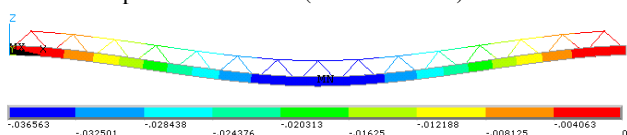


Figura 14 – Deslocamento da vigota treliçada protendida de altura 10 cm para análise linear (unidades em m).



Nas Figuras 15 a 18 são mostrados valores de tensões de Von Mises no regime linear e não linear para as vigotas treliçada e a treliçada protendida. A partir dos resultados obtidos, nota-se que o comportamento de ambas as vigotas são similares, sendo o do regime não linear mais uniforme em toda a base de concreto. Neste caso, verifica-se uma concentração de tensão somente nos pontos de aplicação do carregamento, ultrapassando o limite da resistência à tração.

Figura 15 – Tensão de Von Mises da base se concreto da vigota treliçada de altura 8 cm para análise linear (unidades em kN/m²).

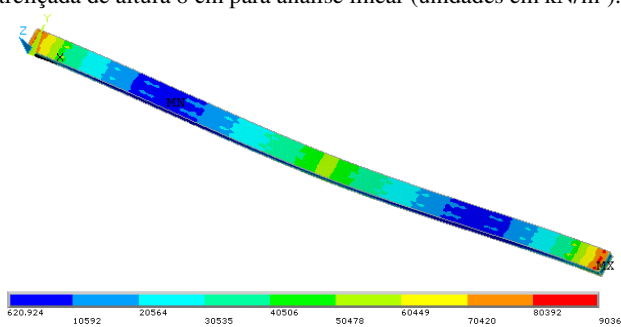


Figura 16 – Tensão de Von Mises da base se concreto da vigota treliçada de altura 8 cm para análise não linear (unidades em kN/m²).

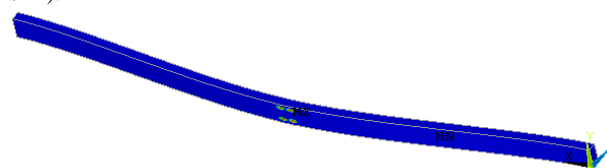


Figura 17 – Tensão de Von Mises da base se concreto da vigota treliçada protendida de altura 8 cm para análise linear (unidades em kN/m²).

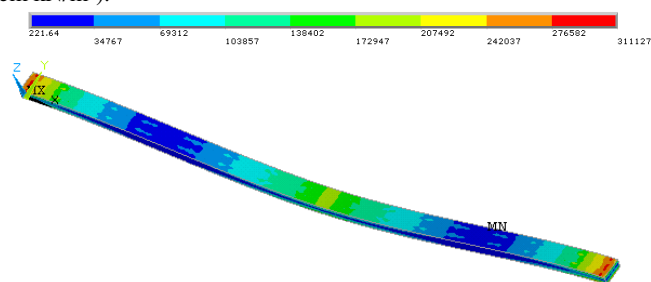
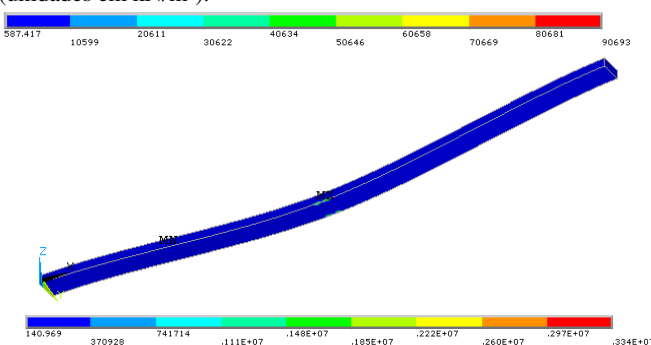


Figura 18 – Tensão de Von Mises da base se concreto da vigota treliçada protendida de altura 8 cm para análise não linear (unidades em kN/m²).



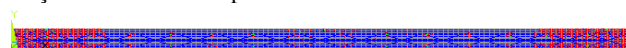
Percebe-se ainda que no caso linear os maiores valores de tensão localizam-se nos apoios, diferentemente no caso não linear que os maiores valores estão no meio do vão. Pode-se verificar que no caso não linear, em ambas as vigotas, as tensões se mantiveram bem baixas.

Nas Figuras 19 a 22 são apresentados o quadro de fissuração obtido nas análises não lineares para as vigotas treliçadas e as vigotas treliçadas protendidas para os bordos superior e inferior. Pelos resultados foi verificado

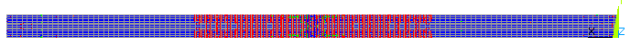
que, para as duas vigotas, o quadro de fissuração foi muito semelhante.

Observa-se que, a fissuração é crítica nos apoios (vista superior) e no meio do vão (vista inferior), onde o carregamento está aplicado em todas as análises. Verifica-se ainda que o quadro de fissuração foi levemente maior nos pontos da localização da treliça para o caso da vigota treliçada (parte superior). Em contrapartida, no caso da vigota treliçada protendida, o quadro de fissuras foi maior no meio do vão.

Figura 19 – Quadro de fissuração da base se concreto da vigota treliçada de altura 8 cm para análise não linear.

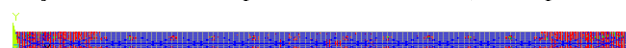


a) vista superior



b) vista inferior

Figura 20 – Quadro de fissuração da base se concreto da vigota treliçada de altura 10 cm para análise não linear (vista superior).

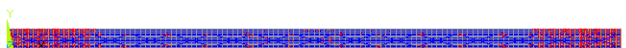


a) vista superior

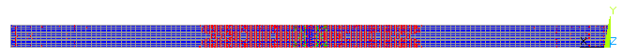


b) vista inferior

Figura 21 – Quadro de fissuração da base de concreto da vigota treliçada protendida de altura 8 cm para análise não linear.

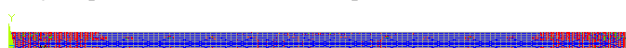


a) vista superior

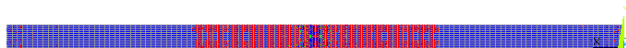


b) vista inferior

Figura 22 – Quadro de fissuração da base de concreto da vigota treliçada protendida de altura 10 cm para análise não linear



a) vista superior



b) vista inferior

A Tabela 6 apresenta os valores da tensão axial máxima da treliça para os dois regimes no último passo de carga. Tais valores correspondem a tensões de compressão da armadura do banço superior. Pela Tabela 6, verifica-se que a armadura da vigota treliçada protendida para altura de 10 cm, atingiu o limite de escoamento.

Deve-se ressaltar que os fios de protensão na vigota treliçada protendida mantiveram-se no regime elástico-linear até a plastificação da base de concreto.

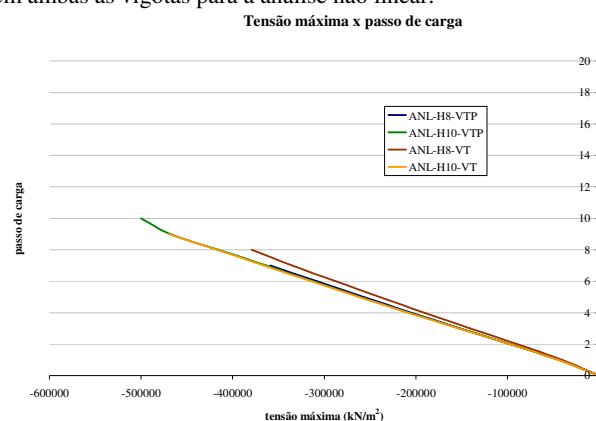
Tabela 6 – Valores da tensão máxima da treliça.

Tipo de vigota	Altura (cm)	Linear (kN/m ²)	Não Linear (kN/m ²)
VT	8	1,302.10 ⁶	0,379.10 ⁶
	10	1,338.10 ⁶	0,470.10 ⁶
VTP	8	1,302.10 ⁶	0,359.10 ⁶
	10	1,338.10 ⁶	0,500.10 ⁶

VT	8	1,302.10 ⁶	0,379.10 ⁶
	10	1,338.10 ⁶	0,470.10 ⁶
VTP	8	1,302.10 ⁶	0,359.10 ⁶
	10	1,338.10 ⁶	0,500.10 ⁶

Observa-se pelos resultados apresentados na Figura 23 que os valores de tensão máxima na treliça para as duas alturas, praticamente não se alteraram para uma mesma vigota. Embora os valores finais de tensão sejam muito próximos, verifica-se que o comportamento da vigota treliçada protendida de altura 10 cm atingiu o escoamento. Pelos resultados verifica-se que a vigota treliçada protendida apresenta um comportamento melhor do que a vigota treliçada sem a protensão.

Figura 23 – Tensão máxima da treliça para as diferentes alturas em ambas as vigotas para a análise não linear.



Nas Figuras 24 a 26 são apresentados os valores das tensões em toda a treliça.

Pelos resultados apresentados as tensões são de compressão no banço superior e de tração no banço inferior. Este fato se estende a todas as vigotas analisadas. No caso da Figura 27 houve a ruptura da vigota pela plastificação do concreto e a flambagem da armadura do banço superior para altura de 10 cm para vigota treliçada protendida.

Figura 24 – Valores da tensão axial da vigota treliçada de altura 8 cm para análise linear (unidades em kN/m²).

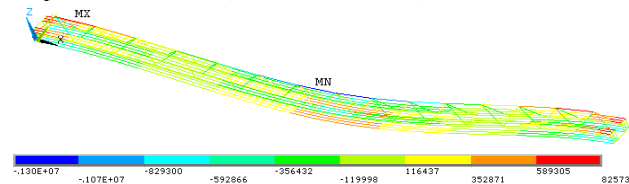


Figura 25 – Valores da tensão axial da vigota treliçada de altura 10 cm para análise não linear (unidades em kN/m²).

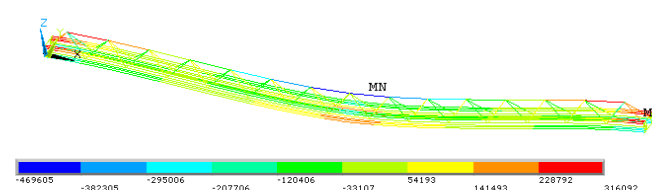
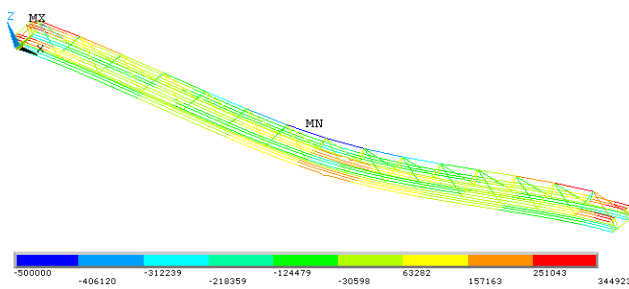


Figura 26 – Valores da tensão axial da vigota treliçada protendida de altura 10 cm para análise não linear (unidades em kN/m²).



6 – CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentada uma análise do comportamento de vigotas treliçadas e vigotas treliçadas protendidas na fase de montagem. Neste contexto são avaliadas duas alturas de vigota, 8 cm e 10 cm, levando em consideração a não linearidade dos materiais constituintes. Para as análises propostas, foram utilizados os recursos disponíveis do *software* computacional ANSYS.

A partir dos resultados apresentados verifica-se que as vigotas analisadas apresentaram um comportamento muito similar. Além disso, podem ser traçadas algumas conclusões:

- em ambos os elementos investigados, os valores obtidos da tensão na base de concreto se mostraram superiores ao limite de resistência do concreto à tração;
- a vigota treliçada protendida apresentou um comportamento levemente melhor que a vigota treliçada, em função dos fios de protensão;
- os resultados de tensões e deslocamentos para as duas alturas em ambas as vigotas não foram discrepantes, sendo algumas vezes, praticamente iguais;
- a ruptura da vigota ocorreu pela plastificação do concreto em todas as vigotas e para a vigota treliçada protendida de altura de 10 cm ocorreu ainda a flambagem do banzo superior;
- o quadro de fissuração foi crítico nos apoios e no meio do vão, onde o carregamento está aplicado em todas as análises realizadas;
- o quadro de fissuração foi maior nos pontos de localização da treliça no caso da vigota treliçada e no meio do vão para a vigota treliçada protendida
- para a vigota treliçada protendida houve convergência em aproximadamente 33% do carregamento atuante;
- somente a armadura do banzo superior da vigota treliçada protendida de altura 10 cm atingiu o escoamento;
- os fios de protensão da vigota treliçada protendida mantiveram-se no regime linear;
- as vigotas treliçadas protendidas apresentam melhores condições de atender ao estado limite de deformações excessivas, devido à existência dos fios de protensão;

- o uso de vigotas treliçadas com o auxílio da protensão melhora o comportamento da vigota na fase de montagem e com isso auxilia as lajes formadas por tais elementos em uma situação em serviço.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. T.; MOTA, J. E. ; CARACAS, J.; NOBRE, E. G. Lajes Treliçadas Protendidas (Pré-Tração). **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado**, São Carlos, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1**: Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 14859-2**: Laje pré-fabricada – Requisitos - Parte 2: Lajes bidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 14860-1**: Laje pré-fabricada – Pré-laje - Requisitos Parte 1: Lajes bidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 14860-2**: Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos Parte 2: Lajes bidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 14862**: Armaduras treliçadas eletrossoldadas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 9062**: Projeto e execuções em concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 6118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 2007.
- BORGES, J. **Crítérios de projeto de lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas**. São Paulo. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos. Projeto REENGE, EESC-USP, 2000.
- FERREIRA, A. C. **Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos**. Brasília. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, 2007.
- FREITAS, H. S. **Análise numérica de painéis pré-moldados de fechamento em edificações de pequena altura**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, UFU, 2012.
- GASPAR, R. Análise de segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção. **REIBRAC, 42-Ibracon**, p. 1-15, 2000.
- GOMES, D. I. S.; OLIVEIRA, L. M. F.; RAMALHO, M. A. Análise não linear de pórticos planos em concreto armado – Comparação de procedimentos de cálculo. **50º Congresso Brasileiro do Concreto, 50-Ibracon**, p. 1-10, 2008.

JACOMASSI, L. M. C. **Avaliação do Comportamento de Pilares de Concreto de Alta Resistência: Simulação Numérica Utilizando o Código de Cálculo CASTEM-2000**. 76 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 114 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LIMA, M. C. V.; GESUALDO, F. A. R.; CASTILHO, V. C.; CARVALHO, S. G. Escoramento para vigotas treliçadas protendidas. **3º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado**, São Carlos, 2013.

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

MOLINA, J. C.; CALIL, C. J. Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para os materiais. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 17, n. 2, p. 256-266, 2009.

SILVA, B. R. **Contribuições à análise estrutural de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012.