

Análise não linear do estágio construtivo

José de Moura¹, Calebe Paiva², Filipe Marinho³

¹Universidade Federal do Piauí / Departamento de Estruturas / jmoourarn@gmail.com

²Universidade Federal do Piauí / Departamento de Estruturas / calebepaiva@gmail.com

³Universidade Federal do Piauí / Departamento de Recursos Hídricos e Geotecnia e Saneamento Ambiental / filipemarinhon@gmail.com

Resumo

A fase de análise estrutural é primordial na elaboração de um projeto, fato que justifica as constantes buscas por análises mais realistas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é reforçar a importância da consideração da análise do estágio construtivo, e, portanto, da mudança evolutiva dos esforços durante a etapa de análise estrutural. O trabalho foi desenvolvido a partir da modelagem no *software* SAP2000, de uma viga protendida de seção “I” com 4 cabos de protensão, sendo submetida uma análise não-linear do estágio construtivo, na qual foram verificados os esforços solicitantes a cada adição de novos carregamentos e cabo protendido. Neste trabalho, foi possível verificar as tensões atuantes em uma viga protendida etapa a etapa, e como resultado, foram obtidas tensões finais inferiores às obtidas durante a construção, então, conclui-se a importância da verificação das tensões atuantes nas diversas fases do estágio construtivo para dimensionamento estrutural adequado.

Palavras-chave

Análise estrutural; Análise não linear; Método construtivo.

Introdução

A engenharia estrutural se mantém em constante busca por novas soluções e tecnologias, com objetivo de conceber estruturas de forma mais condizente com a realidade.

De acordo com KIMURA (2007), a análise estrutural é uma das atividades primordiais na elaboração de projetos estruturais. Quando realizada de forma incorreta, pode gerar resultados que não representam o real comportamento da estrutura.

Durante esta etapa é usual considerar apenas o caso em que o carregamento está atuando na estrutura finalizada, em sua fase final.

O método de análise utilizando o estágio construtivo leva em consideração as etapas construtivas da estrutura a ser executada, através de sucessivas aplicações de cargas.

Ao realizar uma análise não linear do estágio construtivo é possível obter esforços superiores aos obtidos na configuração final, fato que justifica sua utilização neste trabalho.

Desta forma, o estudo detalhado da evolução desses esforços e do quanto significativos eles são é de extrema importância, pois demonstrará que os efeitos dos mesmos devem ter uma maior atenção por parte dos projetistas.

Análise de uma viga protendida

A aplicação escolhida para o estudo do estágio construtivo é uma viga de pontes, com vãos isostáticos, em que todas as etapas construtivas foram verificadas, a fim de determinar as maiores tensões.

Características geométricas

A viga em questão possui um vão livre de 30,0 m. Nesta viga, o primeiro e o último metro apresentam uma seção transversal maior do que os 28,0 m centrais.

Materiais

Inicialmente, foi definido um material para representar o concreto. Denominado de “Concreto 30 MPa”, com as seguintes características:

- I. Tipo de material = *Concrete*
- II. Peso por unidade de volume = 25 kN/m^3
- III. Módulo de elasticidade = 26071594 kN/m^2
- IV. Resistência a compressão do concreto = 30000 kN/m^2

O próximo material definido foi o utilizado nos cabos de protensão, denominado “Protensão”, com as seguintes características:

- I. Tipo de material = *Tendon*
- II. Módulo de elasticidade = 195000000 kN/m^2
- III. Mínima tensão de escoamento = 1700000 kN/m^2
- IV. Mínima tensão de ruptura = 1900000 kN/m^2

Seções das barras

Nos dois tipos de seção (extremidade e central) foi atribuído o material “Concreto 30 MPa”. Tais seções foram definidas utilizando o próprio *template* de vigas pré-moldadas do programa. Na figura 1, estão demonstradas quais dimensões foram informadas na definição da seção.

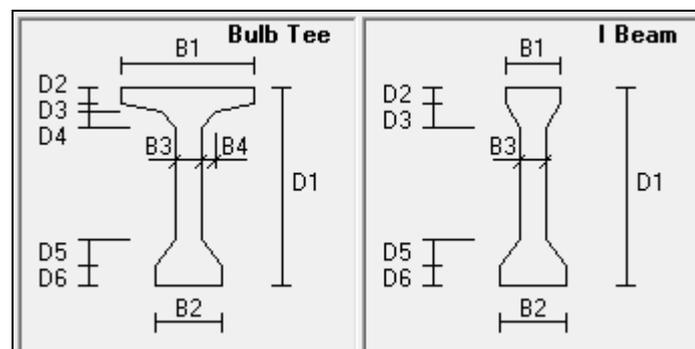


Figura 1 – Parâmetros para definição da seção.

Os valores utilizados para o preenchimento dos parâmetros relativos à definição das duas seções da viga estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na seção.

Parâmetro	Seção central	Seção de extremidade
B1 (m)	1,15	1,15
B2 (m)	0,65	0,65
B3 (m)	0,25	0,65
B4 (m)	0,00	0,00
D1 (m)	1,95	1,95
D2 (m)	0,15	0,15
D3 (m)	0,10	0,0556
D4 (m)	0,00	0,00
D5 (m)	0,20	0,00
D6 (m)	0,25	1,00

Seção dos cabos

A seção dos cabos, pode ser concebida de duas maneiras distintas: a primeira em que o cabo é entendido como um carregamento e a segunda em que o cabo é modelado como um elemento. Para o presente trabalho, todos os cabos foram modelados como carregamento.

Foi utilizado o material “Protensão”, criado anteriormente, para representar os cabos de protensão. E para área foi utilizado o valor de $1,200E-03 \text{ m}^2$, equivalente a um cabo composto por 12 cordoalhas de 12,7 mm (1 cm^2).

Carregamentos

Para realização desta análise foram criados 7 carregamentos: G1, G2, Q, Cabo 1, Cabo 2, Cabo 3 e Cabo 4, os quais serão definidos nos parágrafos seguintes.

O carregamento G1 representa o peso próprio da viga. Neste caso, tal carregamento é calculado pelo próprio *software*.

O carregamento G2 é utilizado para lançar o peso do tabuleiro e do pavimento. O mesmo possui o valor de 19,52 kN/m.

O carregamento Q representa a carga acidental decorrente do trem-tipo. Possui um carregamento distribuído de 12,26 kN/m e cargas pontuais relativas a cada eixo do veículo iguais a 63,62 kN.

Foi criado um carregamento diferente para aplicar a força de protensão de cada cabo, de modo a tornar possível realizar a análise construtiva.

Cálculo da força de protensão

Para o cálculo da força de protensão, inicialmente foi calculado o momento fletor máximo na situação final, com o tabuleiro incluído, sendo necessário para isso criar um caso de carregamento “G1+G2+Q”. O valor do esforço M3 obtido para tal caso foi igual a 7168,435 kN.m.

Os valores de área, centro de gravidade e momentos principais de inércia das seções centrais (com ou sem tabuleiro), são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades das seções centrais.

Seção	Área (m ²)	y _{cg} (m)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)
Sem tabuleiro	0,8075	1,0317	0,3799	0,0322
Com tabuleiro	1,4625	1,5228	0,8185	0,4052

Com estes dados foi possível calcular a força de protensão necessária para tornar nula a tensão de tração nas fibras inferiores. A equação (1) leva em consideração a tensão normal máxima devido ao momento solicitante, tensão normal máxima devido ao momento de protensão e a tensão normal devido à força axial de protensão.

$$\frac{7168,435 \cdot 1,5228}{0,8185} - \frac{P \cdot (1,5228 - 0,15) \cdot 1,5228}{0,8185} - \frac{P}{1,4625} = 0 \quad (1)$$

Após a resolução da equação (1), obteve-se em uma força de protensão necessária igual a 4119,03 kN. Ao estimar uma perda de protensão de 25%, foi concebida uma força de protensão efetiva de 5492,05 kN.

Como citado anteriormente, foram utilizados cabos de 12 cordoalhas de 12,7 mm RB-190, em que a força máxima aplicada deve ser 1710 kN. Portanto, foram necessários 4 cabos, resultando em uma força de 1373,01 kN em cada cabo.

Posicionamento dos cabos

Os cabos possuem parte de sua trajetória curva e parte retilínea, decisão tomada com intuito de diminuir as perdas. A trajetória curva escolhida é descrita por uma parábola cujo ponto mínimo corresponde à posição na qual o cabo adquire a configuração retilínea. O posicionamento dos cabos pode ser observado na figura 2.

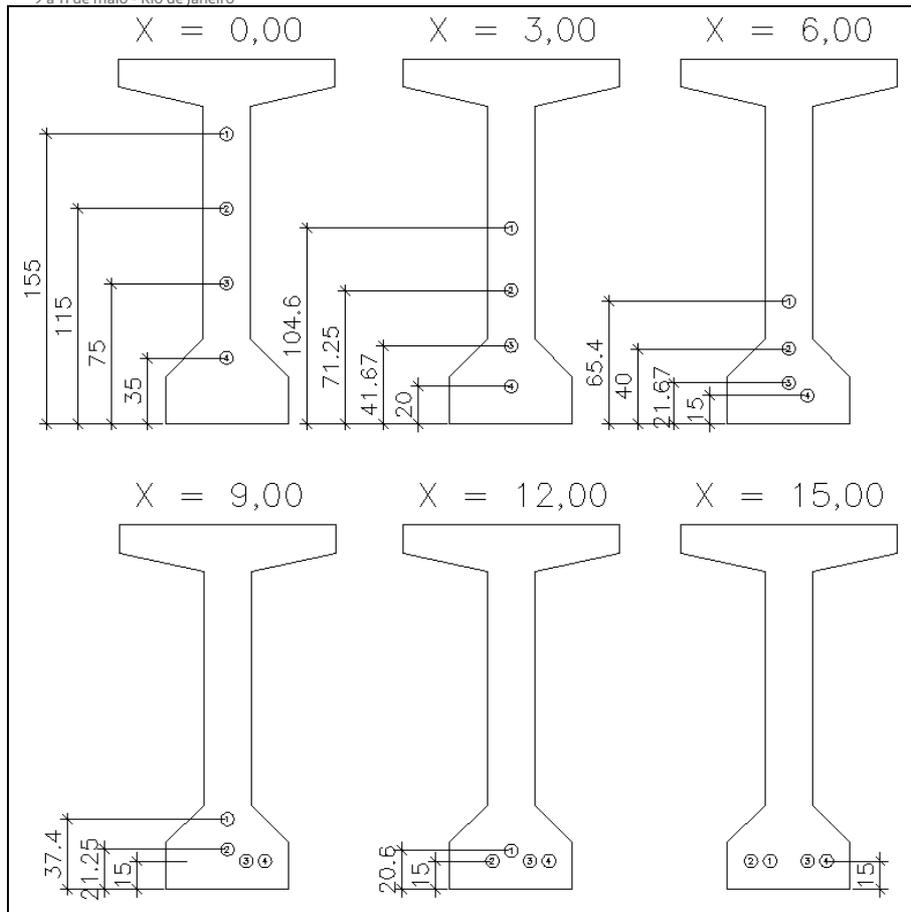


Figura 2 – Posicionamento dos cabos.

A equação do trajeto dos cabos, cuja origem se encontra no ponto de mínimo, vide figura 3, é dada pela equação (2).

$$y(x) = \frac{(h_0 - h_{\min})}{X_{\min}^2} \cdot x^2 \quad (2)$$

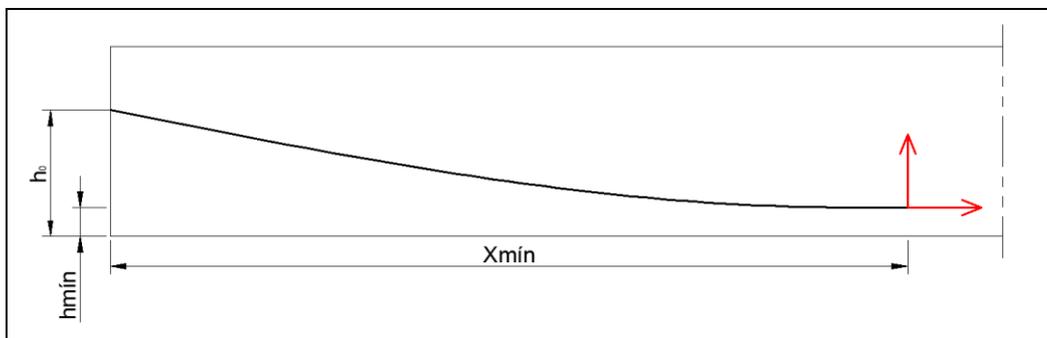


Figura 2 – Parâmetros para definição da seção.

Ao modificar a origem da equação (2) para o centro de gravidade da seção, valor que deve ser informado para o *software*, foi encontrada a (3):

$$\Delta(x) = y(x) - y_{CG} = \frac{(h_0 - h_{\min})}{X_{\min}^2} \cdot (x - X_{\min})^2 + h_{\min} - 103,17 \quad (3)$$

A partir da equação (3) foi organizada a tabela 3, com os valores informados no *software*, de todos os cabos a cada três metros até os quinze primeiros metros, uma vez que, é possível traçar um eixo de simetria no meio do vão.

Tabela 3 – Propriedades das seções centrais.

X (m)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
Cabo 1 (cm)	0,5183	0,0143	-0,3777	-0,6577	-0,8257	-0,8817
Cabo 2 (cm)	0,1183	-0,3192	-0,6317	-0,8192	-0,8817	-0,8817
Cabo 3 (cm)	-0,2817	-0,615	-0,815	-0,8817	-0,8817	-0,8817
Cabo 4 (cm)	-0,6817	-0,8317	-0,8817	-0,8817	-0,8817	-0,8817

Com todos os cabos já inseridos, a força de protensão de 1373,01 kN foi aplicada em cada carregamento separadamente.

Perdas de protensão

Como parâmetros para o cálculo das perdas, foram inseridos no programa o coeficiente de curvatura, o coeficiente Wobble (coeficiente que simula os desvios parasitários ao longo do cabo) e o recuo do cabo, respectivamente, 2E-1, 2E-3 m⁻¹ e 6E-3 m.

Com isso foi possível calcular o valor da protensão de cada cabo no meio da viga após as perdas de atrito e acomodação da ancoragem. Em seguida foi calculada a perda por deformação elástica no concreto:

$$P = 1217,50 + 1213,75 + 1214,44 + 1223,16 = 4868,85 \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{(2277,955 - 5110,64 \cdot 0,8817) \cdot 0,8817}{0,3799} - \frac{5110,64}{0,8075} = -11500,10 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{c,cor} = \frac{n-1}{2n} \cdot \sigma_c = \frac{4-1}{2 \cdot 4} \cdot -11500,10 = -4312,54 \text{ kN/m}^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_p \cong \varepsilon_c = \frac{\sigma_{c,cor}}{E_c} = \frac{4312,54}{30672463,22} = 0,00014 \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_p = E_p \cdot \varepsilon_p = 195000000 \cdot 0,00014 = 27300 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

Casos de carregamento

O caso de carregamento criado para realizar a análise foi denominado NLSTAT. A configuração do mesmo foi feita realizando a alteração dos seguintes parâmetros:

- 1) *Analysis Type* foi escolhido *Nonlinear Staged Construction*;
- 2) *Stage Definition*, onde foi adicionado a quantidade de etapas utilizadas, foram criados 6 estágios;
- 3) *Data for Stage* foi definido o que ocorrerá em cada estágio.

Na opção *Results Saved* optou-se por *End of Each Stage* para que o *software* armazene os resultados ao final de cada estágio.

Ao realizar a análise do perfil isolado, com o mesmo ainda no pátio e atuação apenas do peso próprio, cada cabo é protendido separadamente até que se atinja a protensão total. Posteriormente a viga é içada para sua posição final, onde passarão a atuar as cargas devido peso do tabuleiro e pavimento, assim como, a carga decorrente do trem-tipo.

A partir do sequenciamento acima, foi definido na tabela 4, como cada estágio foi definido.

Tabela 4 – Definição das etapas do caso NLSTAT.

Estágio	Acontecimento
01	Adição de todos os elementos e adição do carregamento “G1”.
02	Adição do carregamento “Cabo 1”.
03	Adição do carregamento “Cabo 2”.
04	Adição do carregamento “Cabo 3”.
05	Adição do carregamento “Cabo 4”.
06	Adição dos carregamentos “G2” e “Q”.

Resultados

Foi realizada uma comparação dentro do caso “NLSTAT”, em que se determinou a relação de tensões entre as etapas 5 e 6.

No quinto estágio, em que foi atingida a máxima força de protensão com atuação apenas do peso próprio da viga, apresentou um esforço M3 de -2107,05 kN.m na posição $x = 15,00$ m.

Com a utilização do *software*, foram obtidas as forças de protensão na região central da viga, após as perdas:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 4979,92 \text{ kN} \quad (9)$$

Tensão na fibra inferior:

$$\sigma_c = \frac{2107,05 \cdot 1,03170795}{0,3799} + \frac{4979,92}{0,8075} = 11889,27 \text{ kN/m}^2 = 11,89 \text{ MPa} \quad (10)$$

Tensão na fibra superior:

$$\sigma_c = \frac{-2107,05 \cdot 0,91829205}{0,3799} + \frac{4979,92}{0,8075} = 1073,93 \text{ kN/m}^2 = 1,07 \text{ MPa} \quad (11)$$

Valores bastante próximos dos resultados obtidos pelo *software* (11883,11 kN/m² e 1067,98 kN/m²), como pode ser observado na figura 3.

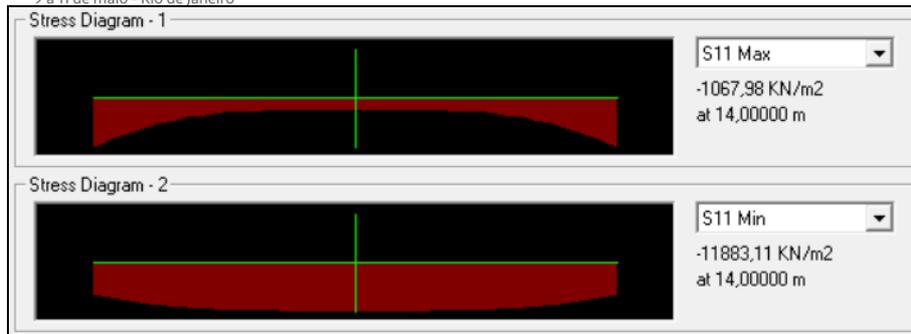


Figura 3 – Tensões máximas e mínimas no quinto estágio.

Foi então verificada a sexta etapa, em que o esforço M3 máximo foi 2775,1061 kN.m.

Uma vez que a modelagem realizada no estudo não contemplou a mudança de seção devido à adição do tabuleiro, foi necessário realizar uma correção no momento M3 fornecido no *software*, levando em conta a alteração no centro de gravidade do perfil composto.

$$M3_{cor} = 2775,1061 - 4979,92 \cdot 0,491098 = 329,477 \text{ kN.m} \quad (12)$$

Tensão na fibra inferior:

$$\sigma_c = \frac{-329,477 \cdot 1,52280627}{0,8185} + \frac{4979,92}{1,4625} = 2792,09 \text{ kN/m}^2 = 2,79 \text{ MPa} \quad (13)$$

Tensão na fibra superior:

$$\sigma_c = \frac{329,477 \cdot 0,72719373}{0,8185} + \frac{4979,92}{1,4625} = 3697,8 \text{ kN/m}^2 = 3,70 \text{ MPa} \quad (14)$$

Com as tensões dos cinco primeiros estágios retiradas do *software* e a do último estágio calculada manualmente foi possível organizar o gráfico 1, contendo a evolução das tensões nas fibras inferiores e superiores do concreto no decorrer da análise.

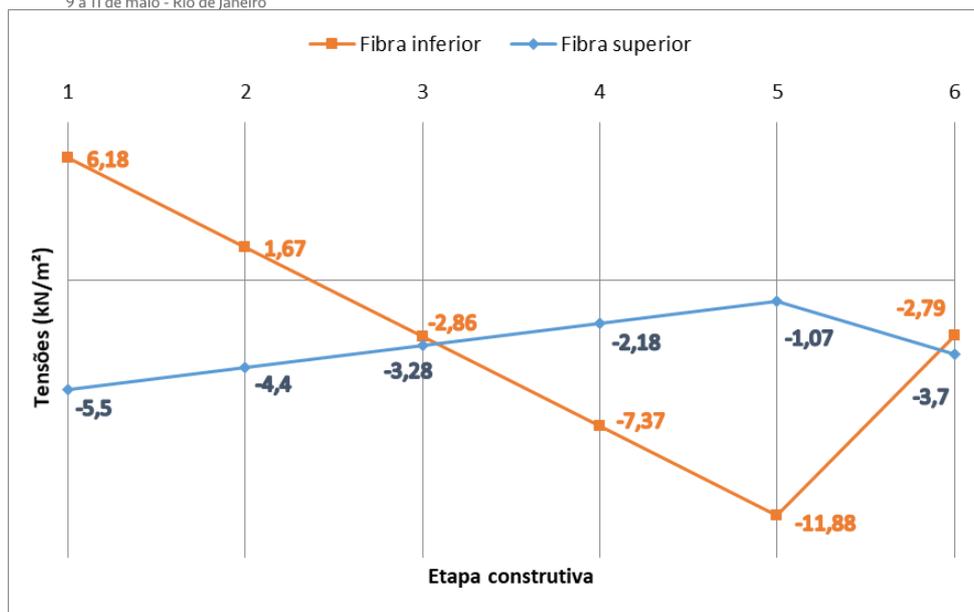


Gráfico 1 – Tensões máximas e mínimas no quinto estágio.

Conclusões

É bastante válido observar o suporte que a informática oferece à área de análise estrutural, visto que, seus avanços possibilitaram a verificação de estruturas mais complexas com maior precisão e produtividade.

A análise realizada neste trabalho enfatiza a possibilidade de obtenção de esforços durante a construção superiores aos existentes no estágio final. Por meio do *software* SAP2000, foi possível verificar as tensões atuantes em uma viga protendida etapa a etapa, e como resultado, foram obtidas tensões finais inferiores àquelas obtidas durante a construção.

Referências

- COMPUTERS & STRUCTURES INC. CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, and SAFE. Berkeley, California, 2011.
- GRABOW, Marko Justus. Construction Stage Analysis of Cable-Stayed Bridges. Hamburg: TUHH, 2004.
- KIMURA, Alio. Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: Pini, 2007.
- LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, Eduard. Construções de concreto, volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.