



ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS DE AÇO EM FORMA DE ARCO UTILIZADAS NO PROJETO DE COBERTURAS PROTENDIDAS

William Alfonso Piñerez Bettin

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

wapinere@hotmail.com

andrade@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

Rua Marquês de São Vicente, Nº 225, 22451-900, Gávea, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Resumo: *O efeito da protensão pode ser introduzido sobre estruturas de aço, de tal modo que é adicionado um estado de tensões oposto ao estado proveniente das cargas de sucção devidas a ação do vento atuante sobre a estrutura. Dentro deste escopo, este trabalho visa apresentar os resultados obtidos em um estudo teórico do comportamento estrutural de treliças de aço utilizadas no projeto de coberturas protendidas. Para tal, a modelagem numérica é realizada com base em formulações lineares, a partir do emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), com base no uso do programa computacional SAP2000-V17. Com base nos resultados obtidos através de uma análise linear, no que tange a comparações entre os valores de resistência das treliças protendidas investigadas, são estabelecidas conclusões e recomendações de projeto. Cabe ressaltar que a economia de material obtida na solução estrutural com base no uso da protensão é resultante do aumento dos níveis de esforços de tração nas barras da estrutura, diminuindo-se as de compressão que são menos eficientes. Neste sentido, as soluções estruturais com protensão apresentam diversas vantagens que compensam o custo adicional da protensão.*

Palavras-chave: *Treliças de aço protendidas, Efeito da protensão, Modelagem numérica.*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia para a aplicação da protensão em estruturas metálicas, de forma que se possa obter ganho econômico, sendo capaz de vencer grandes vãos, resistindo a carregamentos elevados com peso reduzido, menores dimensões de seções transversais e facilidade construtiva, começou a se estabelecer na Europa, mas ainda é considerada uma técnica nova para a grande maioria dos países. A aplicação da tecnologia da protensão pode ser usada também com a finalidade de reforçar e recuperar estruturas metálicas já existentes, como passarelas e, principalmente, pontes metálicas.

Um sistema de protensão em estruturas metálicas, segundo Troitsky (1990), foi utilizado inicialmente em 1837 por Squire Whipple, que aplicou a protensão aos elementos tracionados de treliças em ferro fundido que formavam o tabuleiro de uma ponte com o objetivo de tornar a estrutura mais dúctil. Na cidade de Johnstown, em Nova Iorque, uma réplica dessa ponte foi construída em ano de 1980 pelos estudantes de engenharia Civil “Union College Campus”, como apresentado na Fig. 1, em comemoração a contribuição de Whipple para a construção de pontes.

Cabe ressaltar que, apenas em meados da década de 1930, F. Dischinger na Alemanha, Gustave Magnel na Bélgica, entre outros pela Europa, iniciaram os estudos com base no desenvolvimento de análises teóricas e ensaios experimentais, utilizando-se a protensão, principalmente à construção de pontes. No entanto, somente a partir da década de 1950 são encontradas publicações de artigos técnico-científicos mais expressivos sobre o tema.



Figura 1. Squire Whipple Bridge at Union College
(Fonte: <<http://www.hmdb.org/Marker.asp?Marker=32344>>. Acesso em: 28 de jul.2014)

A utilização de aço de alta resistência para treliças protendidas é eficaz e econômica, uma vez que a força dos cabos de aço é de quatro a seis vezes maior que a do aço apesar do o custo ser apenas duas ou três vezes maior (Troitsky, 1990), Steel Bridges by Prestressing.

Belenya (1977), *Prestressed Load-Bearing Metal Structures*, relata que sistemas de treliça protendidas do tipo arco são eficazes para grandes vãos e cargas, cada uma das barras protendidas da estrutura pode fornecer uma economia de material de aproximadamente de 40 a 45%, mas a economia no que diz respeito ao custo total da treliça é de 8 a 10%. Também a protensão aumenta consideravelmente a rigidez da estrutura, quando uma das cordas ao longo da extensão do arco é carregada.

De acordo com o Post-Tensioning Institute of Australia Limited (PTIA, 2007), a grande vantagem da utilização de treliças protendidas se deve à redução do peso de aço em até 60%. Além disso, por serem protendidos, estes elementos conseguem vencer grandes vãos com economia, controlando-se a deflexão e aumentando-se a força. Pós-tensionamento dos cabos de aço dentro da estrutura proporciona o mecanismo de armazenamento de energia, mais importante quanto maior forem as cargas impostas associadas aos fenômenos naturais, tais como: terremotos, tornados e carregamento de neve. Este benefício pode ser obtido sem acréscimo de custos. A Fig. 2 apresenta uma cobertura protendida para hangares de aviões e também para instalações industriais, complexos desportivos desenvolvidos pelo Post-Tensioning Institute of Australia Limited.

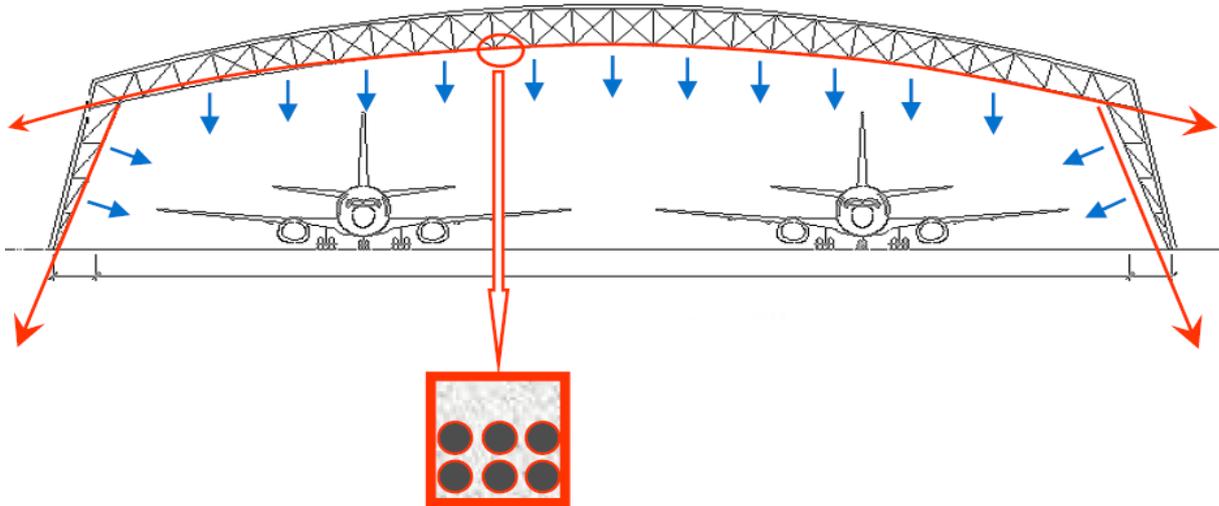


Figura 2. Cobertura de aço em forma de arco protendida (PTIA, 2007)

Com esta solução também economiza-se tempo de projeto, melhora-se a segurança de construção e o desempenho geral estrutural e usa-se menos carbono que evita emissões de CO₂ para a atmosfera. Na Fig. 3 mostra-se o detalhe de ancoragem dos cabos.

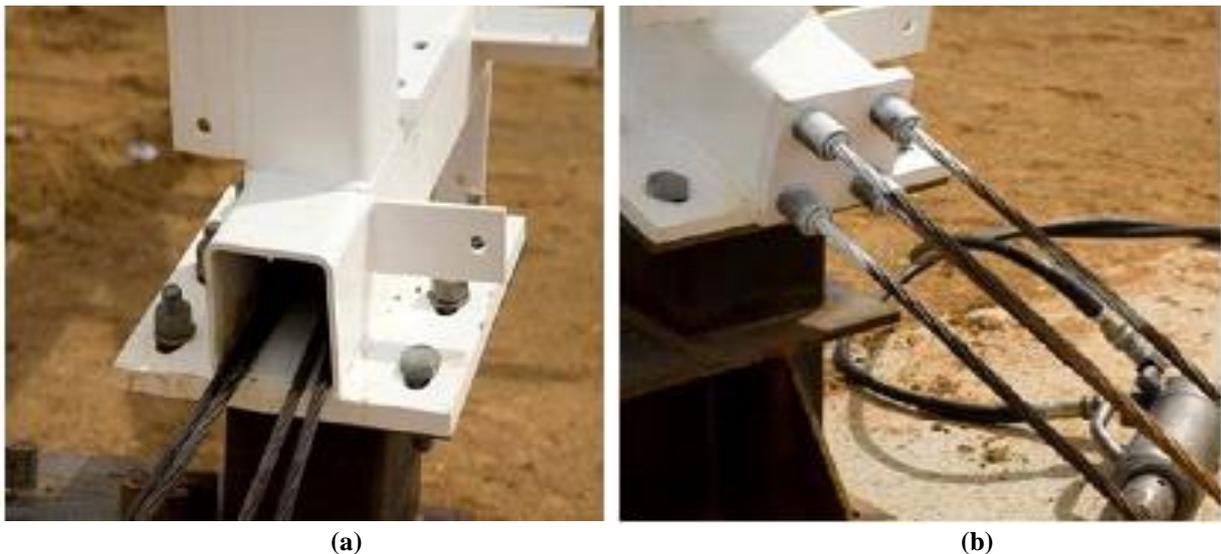


Figura 3. Ancoragem dos cabos de protensão na estrutura (PTIA, 2007): a) Colocação dos cabos e b) Cabos ancorados. (Fonte: <www.s-squared.com.au>. Acesso em: 20 de jul.2014)

Um caso de estudo recente de estruturas de aço protendidas de alta resistência e de grande importância é o caso da reconfiguração do estádio em 2003 “Olympic Sydney”. Localizado em Homebush, New South Wales, com vão livre de 114 m de seções de norte e sul do telhado e área total de cobertura de 7.000 m² (Fig. 4). A treliça protendida forneceu uma solução de alto grau de sustentabilidade, com redução de peso de aço de até 40% da estrutura.



Figura 4. Reconstrução Estádio Olímpico de Sydney (PTIA, 2007): a) Estruturas da treliça protendida e b) Cabos ancorados na treliça

E. Bhargavi e G. V. Rama (2015) apresentaram uma comparação de resultados entre o projeto de treliças protendidas com cabos de alta resistência e o projeto com o uso de treliças convencionais. A partir desta comparação, os autores mostraram que há uma considerável economia sendo feita para os membros de treliças individuais e melhoria notável no comportamento da estrutura. O uso da protensão em estruturas de aço tem por finalidade a obtenção de economia de material, ou em certos casos atender às imposições arquitetônicas ou construtivas. O princípio básico consiste em criar-se, em determinadas regiões da estrutura, tensões de sinais oposto às produzidas pelas cargas externas. Este efeito é obtido a partir do emprego de fios de aço de alta resistência que são ancorados na estrutura, de modo que estes possam ser pré-tensionados. Desta maneira, ocorre um aumento da capacidade resistente da peça, possibilitando-se a redução do tamanho dos perfis de aço e como consequência, a redução dos custos de construção. Deste modo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma modelagem numérica, a partir do emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), no que tange ao comportamento estrutural de treliças de aço em forma de arco utilizadas no projeto de coberturas protendidas.

2 COMPORTAMENTO DE COBERTURAS PROTENDIDAS

Neste item são apresentados os modelos estruturais das treliças de aço em forma de arco protendidas, incluindo-se as características dos materiais, as dimensões, especificações dos perfis e cabos de protensão, os modelos de carregamentos aplicados e as condições de contorno adotadas.

2.1 Descrição dos modelos

As treliças protendidas em forma de arco deste estudo são constituídas com perfil tipo W nas cordas superior, inferior e montantes. Nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas trabalhando como peça composta. A Fig. 5 mostra a geometria dos perfis utilizados. Nos modelos estruturais estudados foram considerados diferentes vãos livres (Tabela 1) e

diferentes configurações geométricas, mas manteve-se sempre constante o espaçamento entre treliças de 10,0 m. O aço empregado foi o ASTM A572 grau 50 que possui módulo de elasticidade $E = 200.000\text{MPa}$, tensão limite de escoamento $f_y = 345\text{ MPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A Fig. 6 apresenta-se um exemplo do modelo tipo A analisado, com 10m de vão.

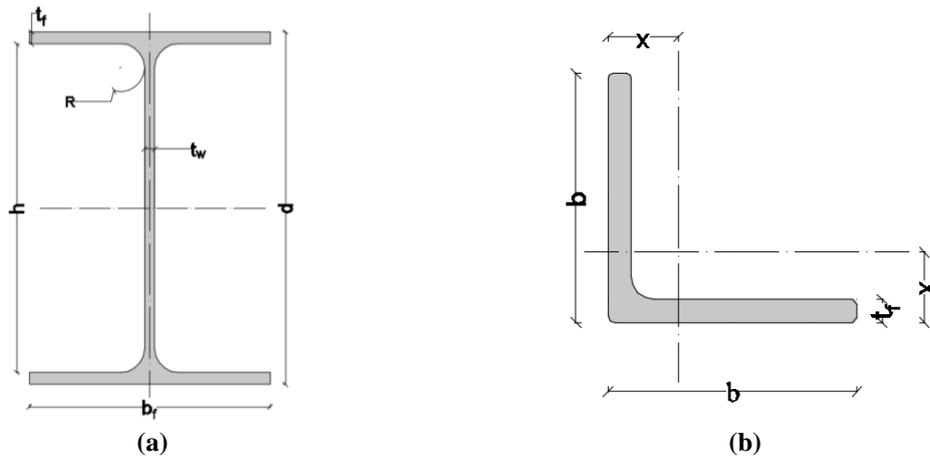


Figura 5. Perfis de aço: a) Perfil tipo W e b) Perfil tipo cantoneira

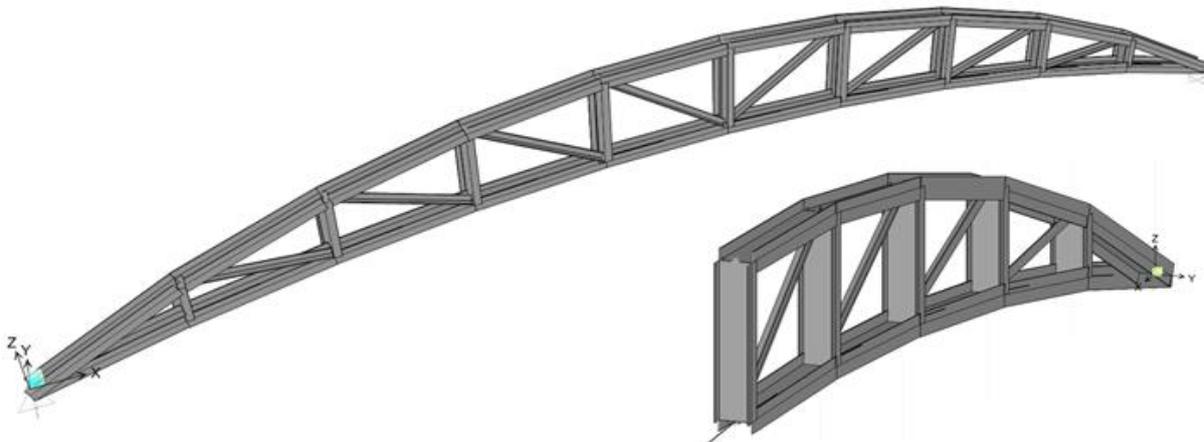


Figura 6. Modelo tipo "A" Treliça de aço em forma de Arco Protendida

Tabela 1. Os modelos das treliças estudadas

Modelos de Treliças	Flecha (m)	Vão (m)
Modelo A	0,7	10,0
Modelo B	1,5	21,0
Modelo C	3,0	40,0
Modelo D	5,5	80,0
Modelo E	7,5	120,0

2.2 Cargas atuantes sobre os modelos estruturais

Além das cargas gravitacionais atuam, também, sobre os modelos estruturais, os carregamentos devidos à ação do vento e devido à protensão aplicada na corda inferior da treliça.

2.2.1 Cálculo da pressão do vento

A NBR-6123 define a pressão do vento em função da velocidade média. Esta velocidade é definida pela Eq. (1):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (1)$$

Onde:

V_0 : É a velocidade básica - velocidade de uma rajada de 3 s, a 10m acima do terreno de categoria II, com um período médio de recorrência de 50 anos;

S_1 : Fator topográfico, que considera a influência da topografia nas vizinhanças da construção;

S_2 : Fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração;

S_3 : Fator probabilístico, que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da construção.

Para $V_0 = 35$ m/s valor assumido para o Rio de Janeiro, $S_1=1$ e $S_3=0,95$ (válidos para todos os modelos estudados). Com referência aos fatores S_2 calculados para os diferentes modelos estruturais, os seguintes valores foram encontrados: $S_{2A}=0,85$; $S_{2B}=0,87$; $S_{2C}=0,91$; $S_{2D}=0,94$ e $S_{2E}=0,96$. A pressão dinâmica (q_w) é determinada pela Eq. (2):

$$q_w = 0,613 V_k^2 \quad (2)$$

Para coeficiente aerodinâmico para cobertura curvas (Pressão interna e externa) para os casos $C_{pi}(90^0) + C_{pe}(+0,3)$. As ações devidas ao vento sobre a estrutura são representadas nas Figuras seguintes como cargas distribuídas atuantes nas treliças.

2.2.2 Cálculo da força de protensão

O nível de força de protensão ideal ($P_{opt,t}$) pode ser definido como aquele em que tanto os elementos da treliça como o cabo de protensão permaneçam no regime elástico, ou seja, a condição dada na Eq. (3):

$$\left(\frac{f_{cy}}{E_c} - \frac{P_{opt,t}}{A_c E_c} \right) = \frac{f_{ty}}{E_t} + \frac{P_{opt,t}}{A_t E_t} \quad (3)$$

Reorganizando-se a Eq. (3), em termos de $P_{opt,t}$, obtém-se a Eq. (4):

$$P_{opt,t} = \frac{A_t A_c}{A_t E_t + A_c E_c} (f_{cy} E_t - f_{ty} E_c) \quad (4)$$

Onde A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade, f_y é a tensão limite de escoamento e os subscritos “t” e “c” representam, respectivamente, o elemento do perfil e o cabo de protensão. Considerando-se diferentes valores de área da seção transversal para todos os modelos de treliça, então obtém-se diferentes valores para a força máxima de protensão. O módulo de elasticidade do cabo é $E_c=195.000$ MPa e $f_{cy}=1960$ MPa. Por outro lado, devido ao efeito da carga de vento sobre a estrutura deve-se avaliar a força de protensão mínima ($P_{prot,min}$) que é dada pela Eq. (5):

$$P_{prot,min} = \frac{q_w l^2}{8 f_{flecha}} \quad (5)$$

Onde f_{flecha} representa a flecha da corda da treliça de aço onde é aplicado o cabo de protensão.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para a análise estrutural linear das treliças de aço protendidas foi utilizado o programa SAP2000-V17. Para as barras da treliça e os cabos de protensão foi empregado o elemento tipo barra “Frame”. Este elemento é definido com dois nós, tendo seis graus de liberdade por nó (deslocamentos: U_x , U_y e U_z e rotações: Rot_x , Rot_y e Rot_z) no modelo 3D e quatro graus de liberdade por nó (deslocamentos: U_x e U_y e rotações: Rot_x e Rot_y) no modelo 2D.

3.1 Combinação de ações

Seguindo-se os critérios da NBR-8800/2008 foram adotadas as seguintes combinações de ações para avaliação dos esforços solicitantes mais desfavoráveis atuantes sobre as treliças e nos cabos.

$$\text{Evento 1} = 1,25 G_{\text{permanente}} + 1,40 W_{\text{vento}} \text{ (Combinação normal)}$$

$$\text{Evento 2} = 1,15 P_{\text{Próprio}} + 1,25 P_{\text{prot}} \text{ (Combinação da fase de construção)}$$

$$\text{Evento 3} = 1,25 G_{\text{permanente}} + 1,4 W_{\text{vento}} + 1,25 P_{\text{prot}} \text{ (Combinação normal)}$$

Onde:

$P_{\text{próprio}}$: peso próprio da estrutura de aço;

$G_{\text{permanente}}$: carga permanente, devida ao peso-próprio das terças, telhas, tirantes, e demais elementos que permanecem fixos sobre a estrutura;

W_{vento} : forças devidas ao vento.

As características dos cabos de protensão empregados neste trabalho de pesquisa estão associadas a cordoalhas de 3 e 7 fios de aço tipo 190 RB da Belgo Mineira. Na Tabela 2 são apresentados os valores das forças de protensão mínima, de acordo com a Eq. (5) e a força de protensão ideal, conforme Eq. (3), calculadas para os cinco modelos estruturais de treliças investigadas ao longo deste estudo (Modelos estruturais A, B, C, D e E).

Tabela 2. As área e forças de protensão em cada modelo

Modelo	Área do Perfil W(mm ²)	Área de Cabo (mm ²)	Tipo de Cabo (190 RB)	Força Protensão Equivalente P _{pro,min} (kN)	Força Protensão Ideal P _{opt,t} (kN)
A	1660,0	21,5	1- Ø3-3 fios	18,3	23,1
B	1660,0	101,4	1-Ø12,7-7 fios	54,6	104,2
C	3850,0	143,5	1-Ø15,2-7 fios	102,8	150,7
D	4780,0	304,2	3-Ø12,7-7 fios	243,8	311,8
E	11090,0	507	5-Ø12,7-7 fios	506,0	528,4

3.2 Modelo de treliça com 10 m de vão

O modelo tipo “A” previsto para ser testado experimentalmente foi feito com vão de 10,0 m e altura de treliça no centro de vão de 700 mm. Todas as treliças possuem a flecha no centro do vão (distância entre a corda inferior e a linha horizontal entre apoio) de 700 mm. A seção do perfil das cordas superior, inferior e montantes é W150 x 13,0 e nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas de 50,8 x 50,8 x 4,76 mm. A área da seção transversal do cabo é de $A_c = 21,5 \text{ mm}^2$, com força de protensão adotada de 23,1 kN. As Figs. 7 a 10 ilustram a distribuição do carregamento de sucção devido à ação do vento que atua sobre a estrutura e as condições de contorno utilizadas na modelagem.

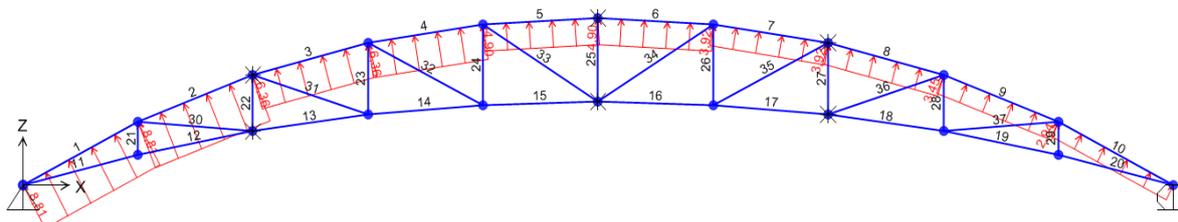


Figura 7. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo A

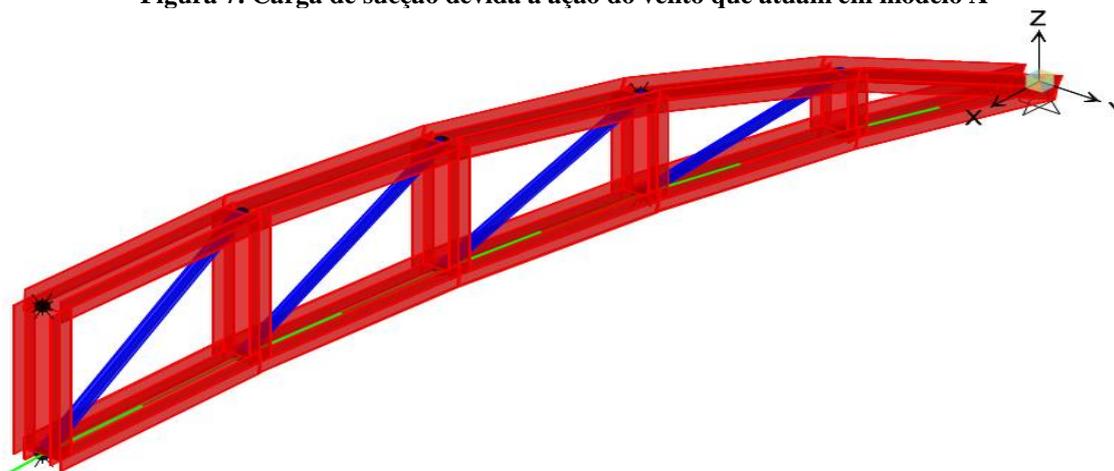


Figura 8. Plano de simetria X-Y do modelo A da treliça protendida

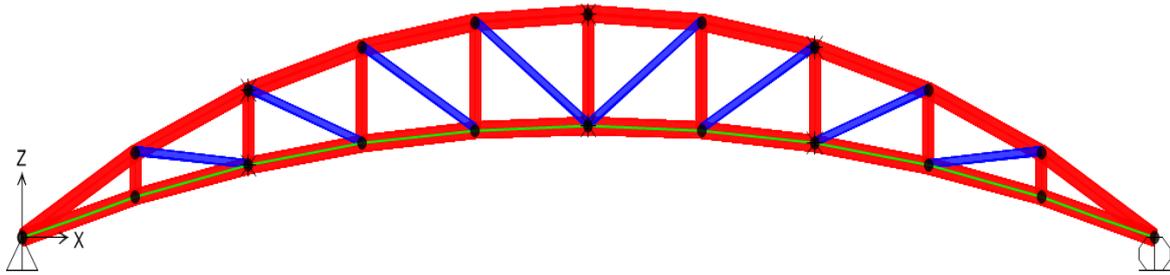


Figura 9. Vista lateral do Modelo A da treliça de arco protendida

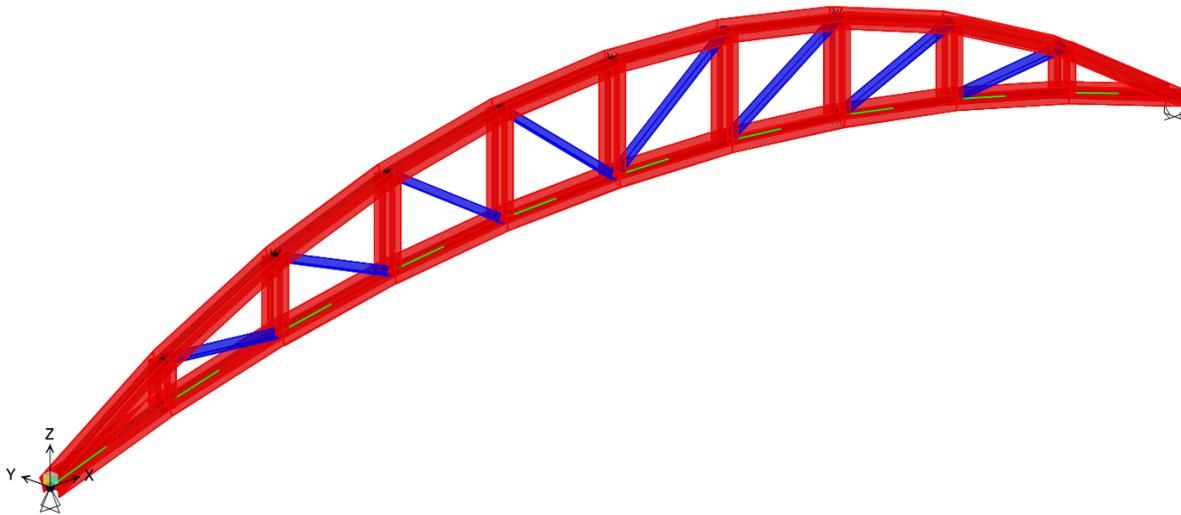


Figura 10. Perspectiva do modelo A da treliça protendida

3.3 Modelo de treliça com 21 m de vão

O modelo tipo “B” possui vão de 21,0 m e altura de treliça no centro de vão de 1500 mm. As dimensões do perfil das cordas superior, inferior e montantes é W150x13,0 e nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas de 63,5 x 63,5 x 6,35 mm. A área da seção transversal do cabo é $A_c = 101,4 \text{ mm}^2$, com força de protensão adotada de 104,2 kN. As Figs. 11 a 14 apresentam a distribuição do carregamento de sucção devido à ação do vento que atua sobre o modelo e as condições de contorno utilizadas na modelagem.

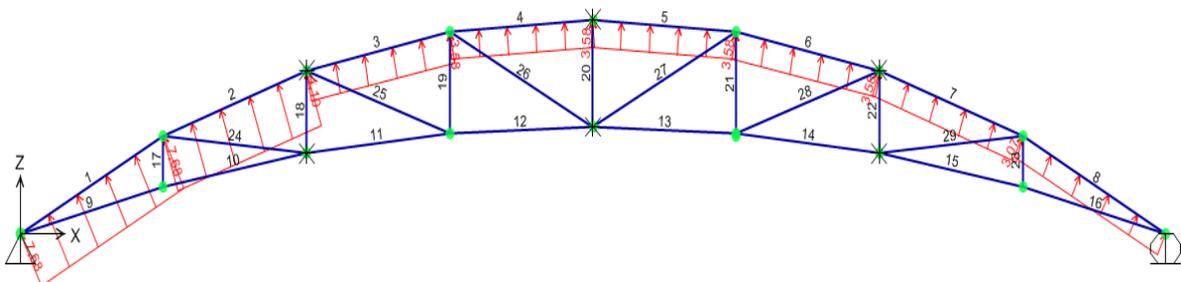


Figura 11. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo B

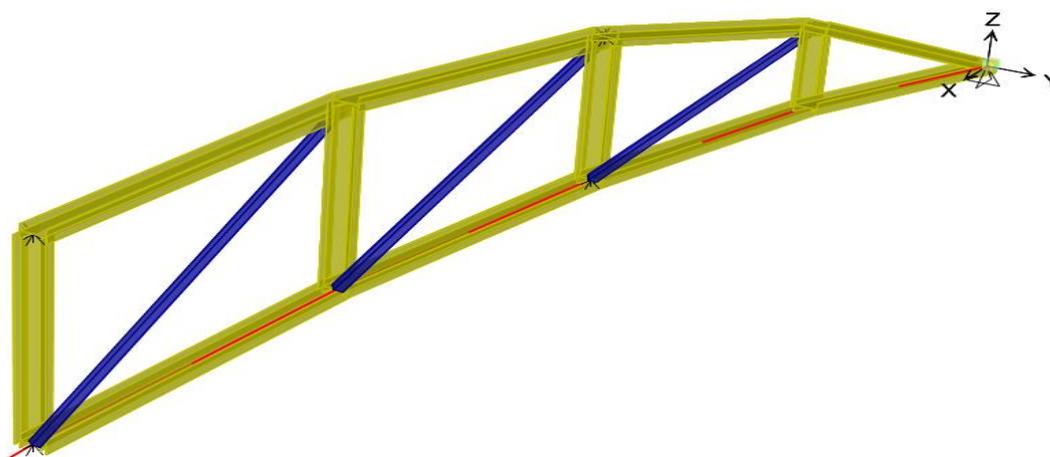


Figura 12. Plano de simetria X-Y do modelo B da treliça protendida

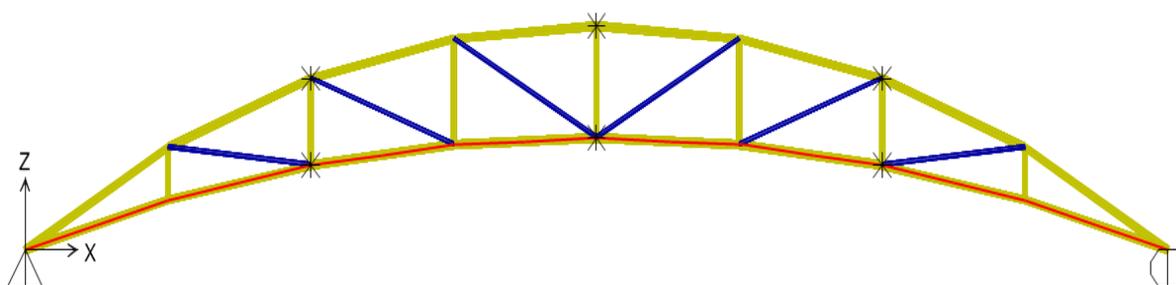


Figura 13. Vista lateral do Modelo B da treliça de arco protendida

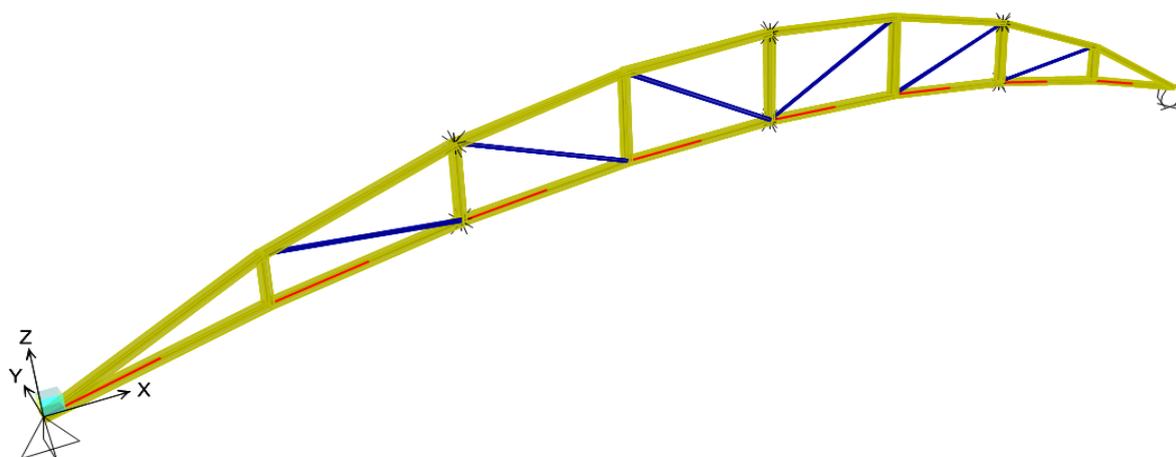


Figura 14. Perspectiva do modelo B da treliça protendida

3.4 Modelo de treliça com 40 m de vão

O modelo tipo “C” apresenta um vão de 40,0 m e altura de treliça no centro de vão de 3000 mm. As dimensões do perfil das cordas superior, inferior e montantes é W150 x 13,0 e nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas de 76,2 x 76,2 x 6,35 mm. A área da seção transversal do cabo é $A_c = 143,5 \text{ mm}^2$, com força de protensão adotada de 150,7 kN. As Figs. 15 a 18 apresentam os detalhes do distribuição do carregamento de sucção devido à ação do vento que atua sobre o sistema e as condições de contorno adotadas na modelagem.

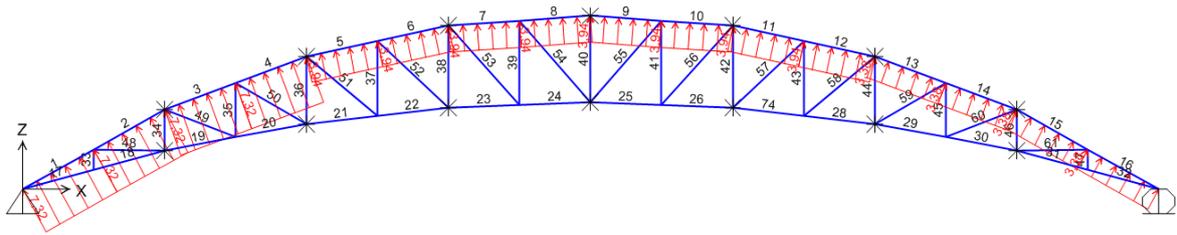


Figura 15. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo C

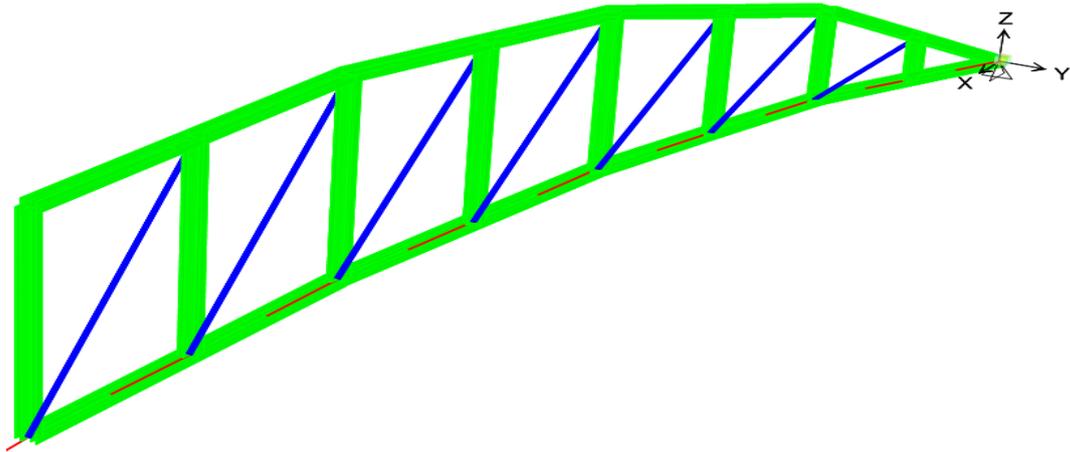


Figura 16. Plano de simetria X-Y do modelo C da treliça protendida

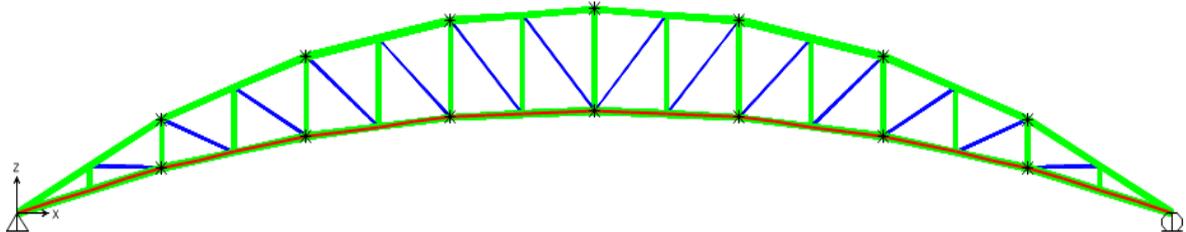


Figura 17. Vista lateral do Modelo C da treliça de arco protendida

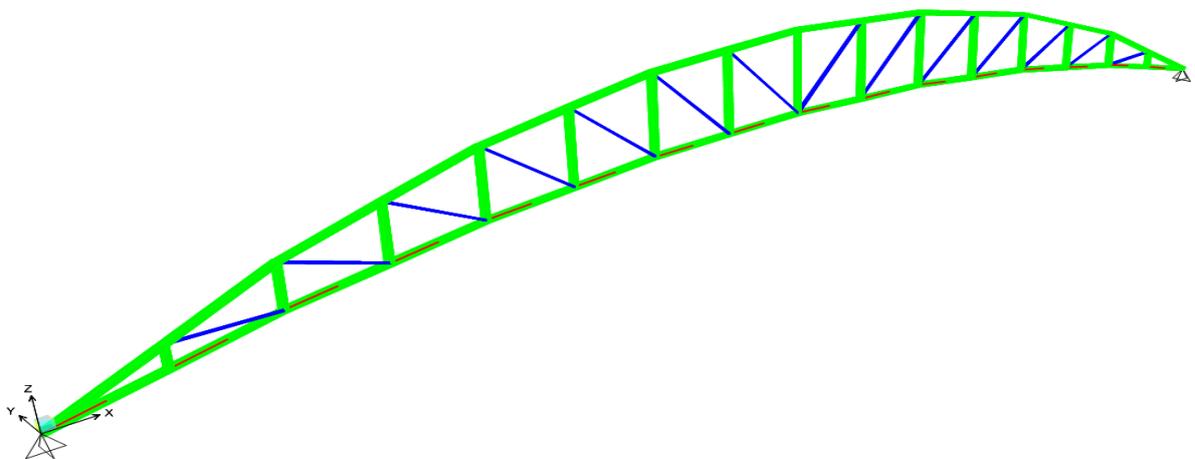


Figura 18. Perspectiva do modelo C da treliça protendida

3.5 Modelo de treliça com 80 m de vão

O modelo tipo “D” com vão de 80,0 m e altura de treliça no centro de vão de 5500 mm. As dimensões do perfil das cordas superior, inferior e montantes é W150 x 37,18 e nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas de 127 x 127 x 8 mm. A área da seção transversal do cabo é $A_c = 304,2 \text{ mm}^2$, com força de protensão adotada de 311,8 kN. As Figs.19 a 23 ilustram a distribuição do carregamento de sucção devido à ação do vento que atua sobre a treliça e as condições de contorno utilizadas na modelagem numérica.

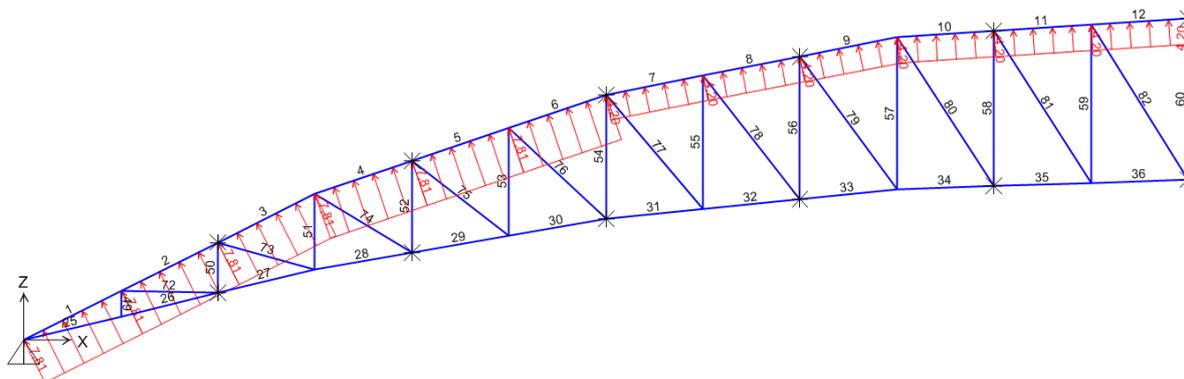


Figura 19. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo D, corte de 0 até 40 m

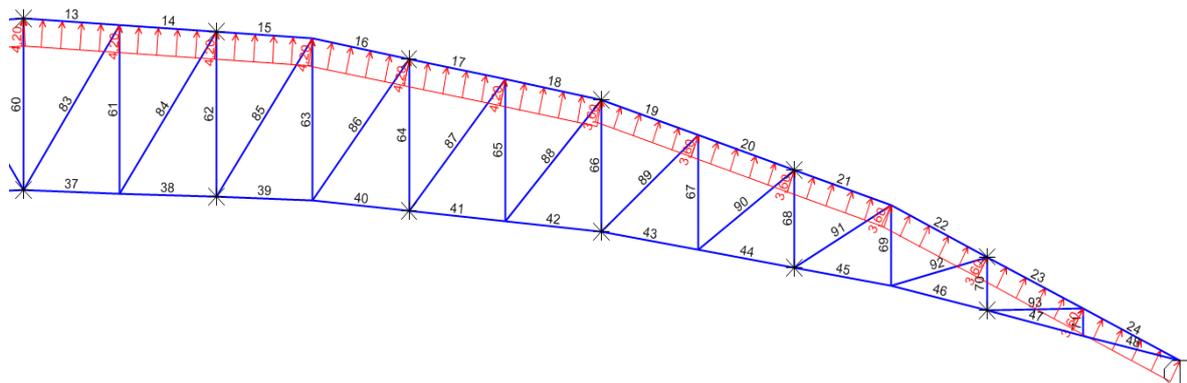


Figura 20. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo D, corte de 40 até 80 m

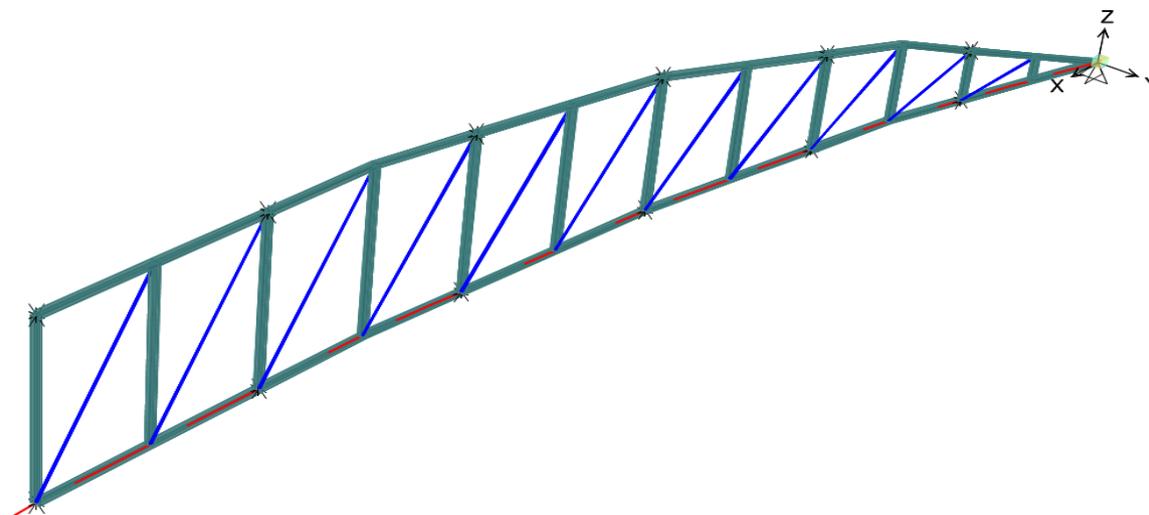


Figura 21. Plano de simetria X-Y do modelo D da treliça protendida

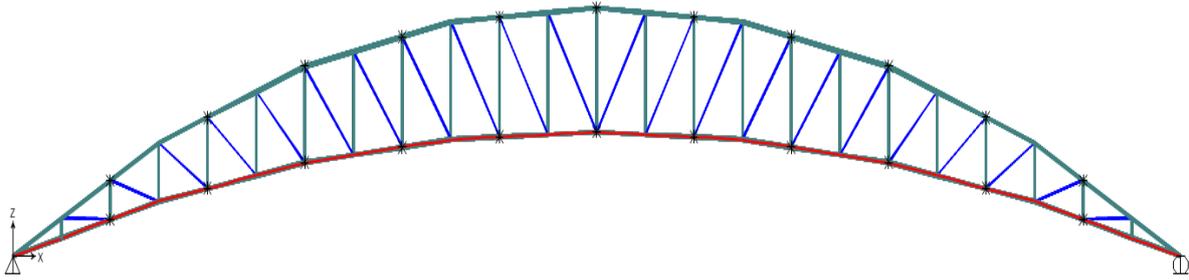


Figura 22. Vista lateral do Modelo D da treliça de arco protendida

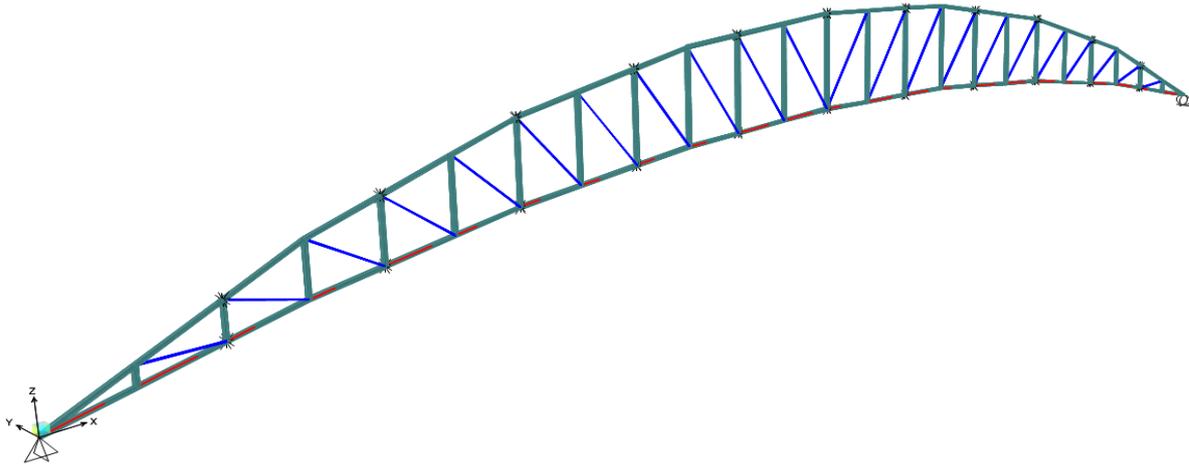


Figura 23. Perspectiva do modelo D da treliça protendida

3.6 Modelo de treliça com 120 m de vão

O modelo tipo “E” com vão de 120,0 m e altura de treliça no centro de vão de 7500 mm. As dimensões do perfil das cordas superior, inferior e montantes é W200 x 86 e nas diagonais foram empregadas cantoneiras duplas de 152,4 x 152,4 x 9,52. A área da seção transversal do cabo é $A_c = 507,0 \text{ mm}^2$, com força de protensão adotada de 528,4 kN. As Figs. 24 a 28 apresentam os detalhes da distribuição do carregamento de sucção devido à ação do vento que atua sobre a estrutura e as condições de contorno utilizadas na modelagem computacional.

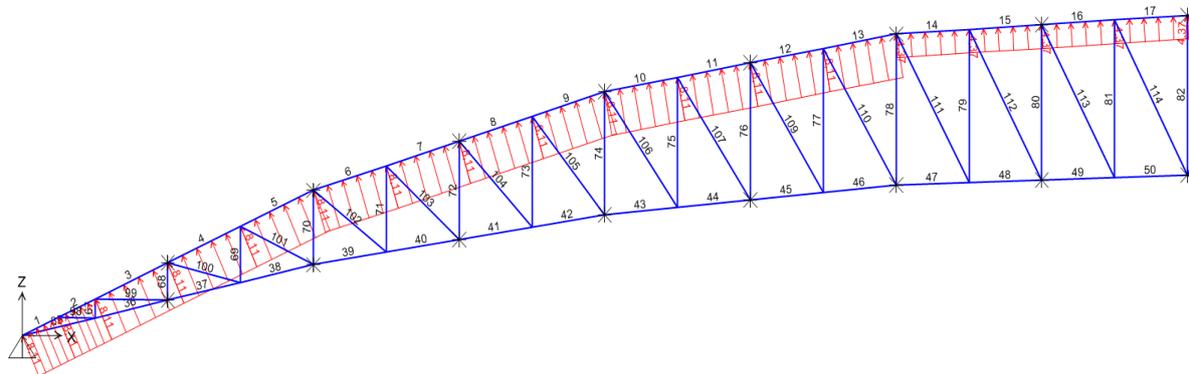


Figura 24. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo E, corte de 0 até 60 m

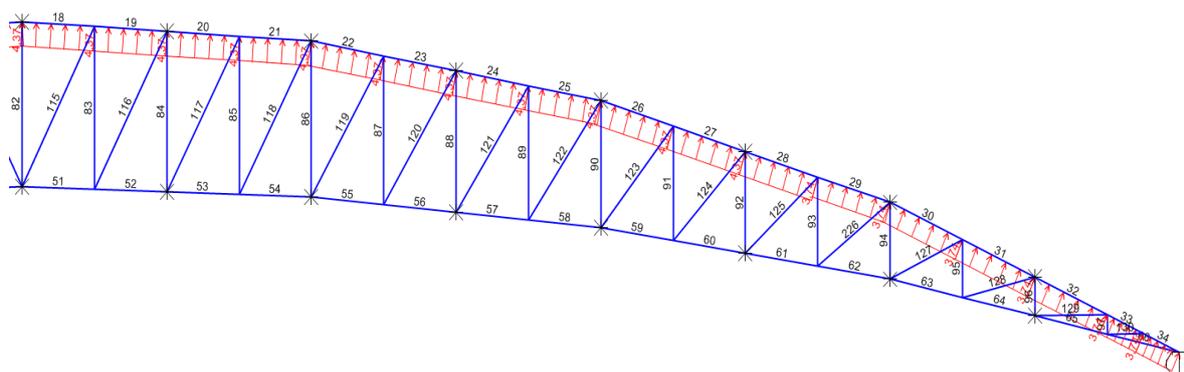


Figura 25. Carga de sucção devida à ação do vento que atuam em modelo E, corte de 60 até 120 m

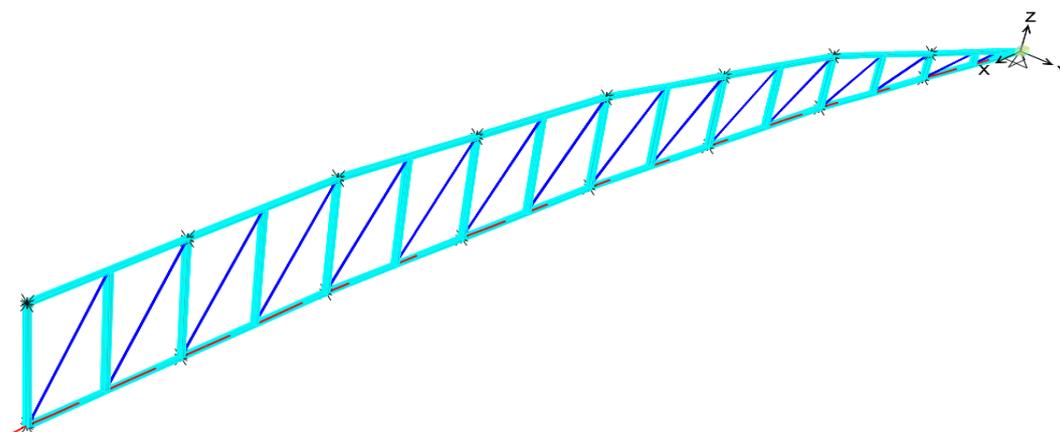


Figura 26. Cabo de protensão na Treliça E

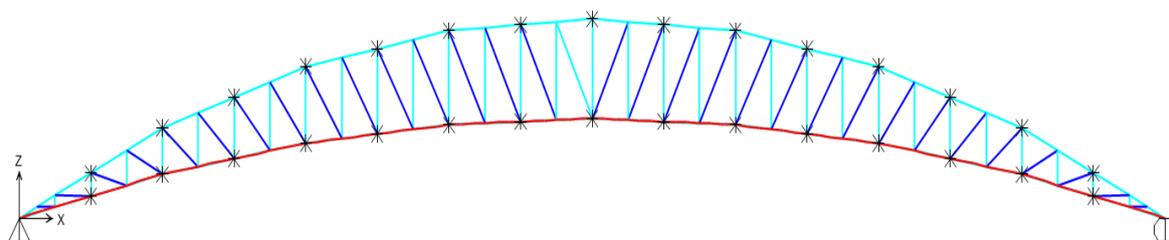


Figura 27. Vista lateral do Modelo E da treliça de arco protendida

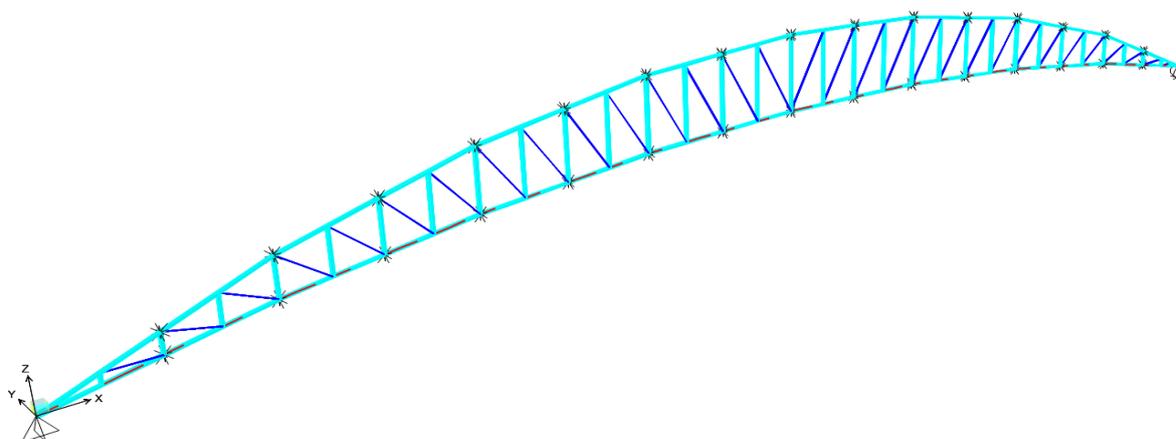


Figura 28. Perspectiva do modelo E da treliça protendida

3.7 Análise dos resultados dos modelos estruturais investigados

A Fig. 29 apresenta as forças de tração solicitantes máximas nas barras da corda superior para diferentes modelos estruturais da treliça protendida e da treliça sem protensão. Observa-se a diminuição das forças com base no emprego da protensão, como ilustrado na Fig. 29. A partir dos resultados obtidos na modelagem numérica desenvolvida neste estudo destaca-se:

Para o modelo estrutural A tem uma redução de força que passa de 123,8 kN a 58,7 kN, ou seja, uma diferença de 52,6 %;

O modelo estrutural B tem uma redução de força de 171,5 kN para 58,7 kN, ou seja, uma diferença de 62,8 %;

O modelo estrutural C tem uma redução de força 623,3 kN para 69,2 kN, ou seja, uma diferença de 88,9 %;

O modelo estrutural D tem uma redução de força de 779,7 kN para 93,4 kN, ou seja, uma diferença de 88,0 %;

O modelo estrutural E tem uma redução de força de 1.034,1 kN a 116,7 kN, ou seja, uma diferença de 88,7 %.

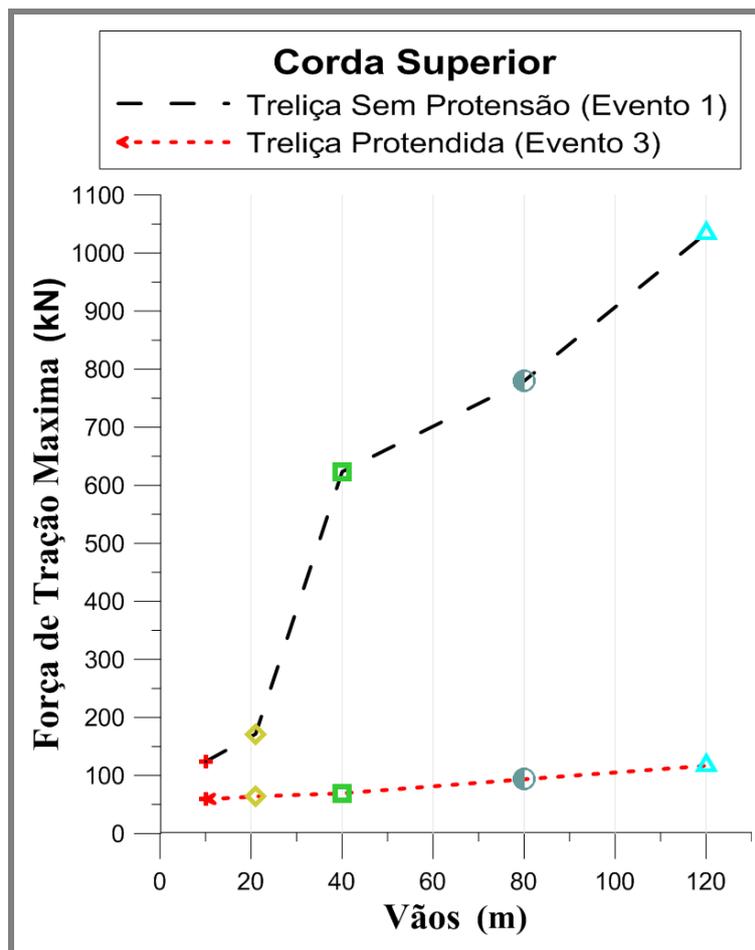


Figura 29. Forças de tração máximas solicitantes da corda superior para diferentes modelos

Em seguida, a Fig. 30, apresenta as forças de compressão solicitantes máximas nas barras da corda inferior para diferentes modelos estruturais da treliça protendida e da treliça sem protensão. Verifica-se a diminuição das forças com uso da protensão, como apresentado na Fig. 30. A partir dos resultados obtidos na modelagem numérica destaca-se:

Para o modelo estrutural A ocorre uma redução de força que passa de 123,8 kN para 58,7 kN, ou seja, uma diferença de 89,4%;

O modelo estrutural B apresenta uma redução de força de 171,5 kN a 58,7 kN, ou seja, uma diferença de 79,1%;

O modelo estrutural C apresenta uma redução de força de 623,3 kN a 69,2 kN, ou seja, uma diferença de 92,3%;

O modelo estrutural D apresenta uma redução de força de 779,7 kN a 93,4 kN, ou seja, uma diferença de 92,9%;

O modelo estrutural E apresenta uma redução de força de 1.034,1 kN a 116,7 kN, ou seja, uma diferença de 81,6%.

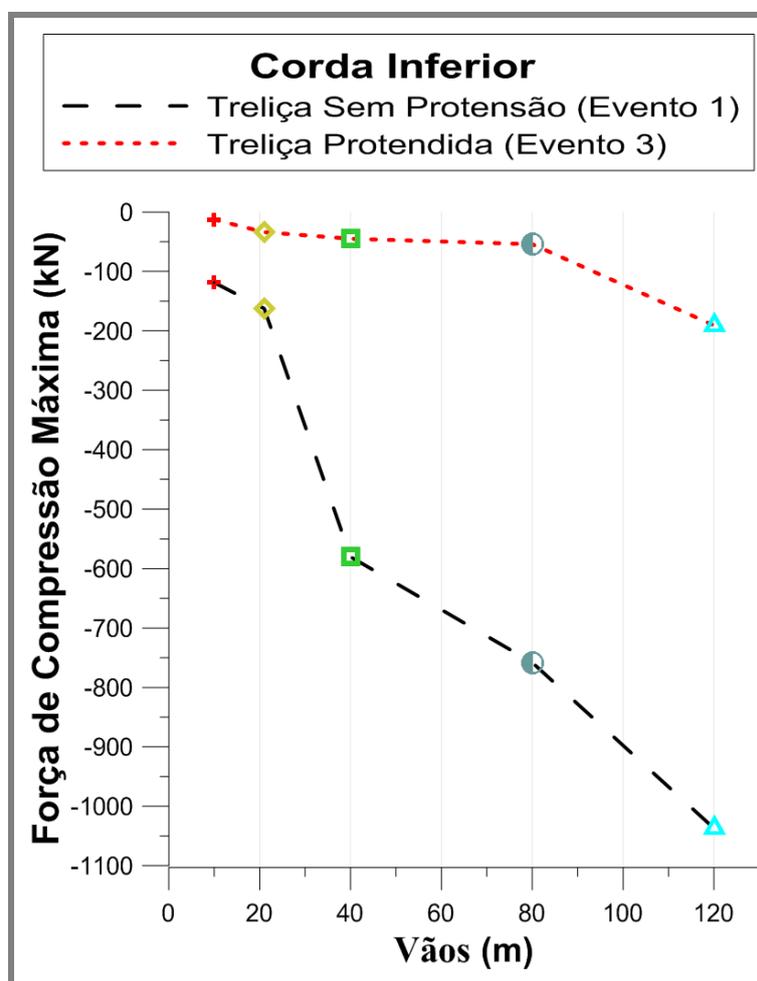


Figura 30. Forças de compressão máximas solicitantes da corda inferior para diferentes modelos

4 RESUMO DOS RESULTADOS

Na sequência do texto, as Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos através do emprego do programa SAP2000-V17, no que diz respeito às forças máximas nas cordas superior e inferior e os deslocamentos no centro do vão para os diferentes modelos estruturais de treliça (sem e com protensão).

Tabela 3. Resumo dos resultados acerca do comportamento da corda superior

Modelo	Treliça sem Protensão (Evento 1) Força (kN)	Treliça Protendida (Evento 3) Força (kN)	% Relação de Força
A	123,8	58,7	52,6%
B	171,5	63,9	62,8%
C	623,3	69,2	88,9%
D	779,7	93,4	88,0%
E	1034,1	116,7	88,7%

Tabela 4. Resumo dos resultados acerca do comportamento da corda inferior

Modelo	Treliça sem Protensão (Evento 1)		Treliça Protendida (Evento 3)		% Relação de Força
	Força (kN)	Deslocamento (mm)	Força (kN)	Deslocamento (mm)	
A	-118,6	14,6	-12,6	1,3	89,4
B	-162,4	37,2	-33,9	0,9	79,1
C	-580,2	94,1	-45,0	0,5	92,3
D	-758,3	206	-54,1	2,2	92,9
E	-1037,2	456,4	-190,7	-11,7	81,6

Os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 mostram as variações de esforços máximos nas cordas superior (tração) e inferior (compressão) da treliça. Observa-se que o efeito de protensão tende a proporcionar uma grande redução de esforço solicitante nas barras da treliça. Estes resultados confirmam as conclusões de Belenya (1997) e de Troitsky (1990) de que os sistemas de treliças protendidas são eficientes para grandes vãos e resultam em estruturas mais leves e econômicas e o uso de protensão também oferece grande redução de deslocamentos verticais da estrutura.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de pesquisa, os modelos numérico-computacionais foram desenvolvidos para diferentes treliças em forma de arco sem o uso de protensão e com protensão na corda inferior da estrutura.

Com base nos resultados obtidos ao longo do estudo pode-se concluir que a grande vantagem da utilização da protensão se deve à redução do peso de aço em até aproximadamente 90%. Foi demonstrado, também, para todos os casos estudados, que a introdução da protensão para a parte inferior da corda aumenta a capacidade de carga e diminui significativamente a correspondente deflexão. Este benefício é particularmente interessante para este tipo de geometria (treliça em forma de arco), uma vez que pode facilitar a concepção de estruturas especiais cobrindo grandes vãos.

As áreas de seção transversal dos cabos e forças de protensão ótima $P_{opt,t}$ (ver Tabela 2) sofrem variação dependendo dos diferentes vãos. Também foi observado que, adicionando-se o cabo, tanto a resistência quanto à rigidez da treliça sofre aumento, ainda que não tenha sido aplicada a força de protensão. Cabe ressaltar que o principal benefício da protensão é o aumento dos esforços de tração nas barras da corda inferior, com a consequente diminuição dos esforços de compressão da mesma e atenuação das forças da corda superior. Pode concluir-se que as soluções estruturais com protensão mostram vantagens econômicas, que compensam o custo da protensão.

Futuramente, convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os autores estão dando início a um extenso programa experimental, acompanhado de modelagens numéricas, no que diz respeito ao estudo do comportamento estrutural não linear de treliças de aço utilizadas para o projeto de coberturas protendidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES e CNPq, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT: Associação Brasileira de normas técnicas, 2006. NBR-6327: “*Cabos de Aço para Geral- Requisitos Mínimos*”.

ABNT: Associação Brasileira de normas técnicas, 2008. NBR-8800: “*Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mista de Aço e Concreto de Edifícios*”.

Belenya, E. 1977, “*Prestressing Load-Bearing Metal structures*”, Mir Publisher, Moscow.

Bhargavi. E.; Rama. G. V; “*Comparative Parametric Study of Steel Bridge Trusses by Applying External Prestressing*”, July, 2015. International Journal of Engineering Technology, Management and applied Sciences.

Dischinger, I. F. (1979), “*Prestressed Structural Steel*”, pp. 60-73. Technical University of Berlin, Germany.

Gkantou. M.; Theofanous. M.; Baniotopoulos. C., “*Optimisation of High Strength Steel Prestressed Trusses*” Congress on Computational Mechanics, 12 July, 2015.

Magnel, G. 1954. *Prestressed Concrete*, Third Edition, London.

PTIA, 2007. “*Post-Tensioning Institute of Australia Limited*”, Disponível em :www.s-squared.com.au>. Acesso em: 20 de jul.2014.

SAP2000-V17. “*Computers and Structures*”. *Finite Element Analysis-User’s Manual*.

Troitsky, M. S. _1990_. “*Prestressed Steel Bridges: Theory and Design*”, Professor of Engineering Concordia University, Montreal Van Nostrand Reinhold Company, New York.