

# Dimensionamento, Verificação e Modelagem de Sistemas de Protensão de Vigas Pré-Moldadas Isostáticas com Auxílio de Modelos Computacionais

Joaquim Eduardo Mota<sup>1</sup>

Hugo Câmpelo Mota<sup>2</sup>

## Resumo

Este estudo visa desenvolver uma metodologia computacional inovadora para o dimensionamento e verificação de sistemas de protensão isostáticos convencionais em vigas pré-moldadas utilizadas em tabuleiros de pontes, assegurando conformidade com as normas brasileiras vigentes. A metodologia proposta abrange todas as verificações técnicas essenciais, oferecendo uma solução computacional robusta e eficiente para o dimensionamento de longarinas pré-moldadas protendidas, garantindo segurança e qualidade nas construções. Após a validação do dimensionamento, o estudo propõe a incorporação do sistema de protensão em um ambiente de software BIM (*Building Information Modeling*) de forma paramétrica. Isso significa que os dados gerados durante a verificação serão utilizados para criar um modelo digital preciso e detalhado, facilitando a coordenação entre as diversas disciplinas envolvidas no projeto, como engenharia civil, arquitetura e construção. A aplicação do BIM permite a visualização detalhada do sistema de protensão nas etapas de projeto e construção, otimizando a coordenação entre as equipes envolvidas e proporcionando uma melhor integração dos dados. Além de garantir a conformidade com as normas brasileiras, a metodologia visa otimizar o processo de projeto e construção, reduzindo erros e retrabalhos, e melhorando a coordenação entre as disciplinas envolvidas. A integração dos sistemas de protensão no BIM proporciona uma comunicação mais eficaz entre as disciplinas, resultando em maior precisão no desenvolvimento do projeto. A utilização do BIM também facilita a detecção de possíveis conflitos e inconsistências no projeto, permitindo que sejam corrigidos antecipadamente, o que contribui para a eficiência e a qualidade do processo construtivo. Em resumo, esta pesquisa alia a precisão das normas técnicas com a eficiência das ferramentas computacionais e do BIM, promovendo avanços significativos no projeto e construção de pontes. Este estudo busca contribuir para o setor de construção, especialmente na engenharia de pontes, onde a segurança e a durabilidade das estruturas são fundamentais. A metodologia proposta assegura a conformidade com as normas e promove a inovação e modernização dos processos de projeto e construção, resultando em estruturas mais seguras, duráveis e eficientes.

**Palavras-chave:** Pré-moldado, BIM; modelagem; programação; dimensionamento; protensão.

## 1 Introdução

Ao examinar o mercado, podemos identificar vários softwares para análise de estruturas. No entanto, apenas alguns são apropriados para a verificação de elementos protendidos conforme as normatizações locais. Exemplos incluem o CSI Bridge (CSI America), o Structural Bridge Analysis (AUTODESK) e o MIDAS Civil (*MIDAS Engineering Software*). Embora essas ferramentas ofereçam análise estrutural e verificação paramétrica das tensões nos estados limites, elas não apresentam claramente a metodologia aplicada nem

permitem a modificação dos cálculos para atender a outras normas.

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma metodologia com uma estrutura de código aberta, de fácil compreensão e bem documentada. Isso permitirá a criação de diversas soluções estruturais e a resolução de problemas a partir de um modelador genérico. Além disso, a pesquisa visa possibilitar a exportação de estruturas de dados que permitam a criação e parametrização desses elementos dentro da metodologia BIM.

O estudo busca contribuir para o setor de

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro/arthur.blopes@outlook.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro/julioholtz@poli.ufrj.br

construção, especialmente na engenharia de pontes, onde a segurança e a durabilidade das estruturas são fundamentais. A metodologia proposta assegura a conformidade com as normas e promove a inovação e modernização dos processos de projeto e construção, resultando em estruturas mais seguras, duráveis e eficientes.

## 2 Desenvolvimento do Estudo de Caso

Para a formulação analítica do problema, foi concebido o seguinte exemplo para dimensionamento. Desta forma, conforme Figura 1 foi proposto uma ponte com vão de 32,00 m de extensão com seção transversal de 11,06 m conforme Figura 2.

Conforme geometria apresentada acima, o pré-dimensionamento segue conforme fórmula:

$$h = \frac{L}{18} \quad (1)$$

Para o vão é de 32,00m, a altura mínima da viga é de 180 cm. A Figura 3 apresenta a forma da viga utilizada para concepção da análise.

### 2.2. Propriedades Geométricas

Com o *software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 2024*, foram determinadas as propriedades geométricas da viga com base na Figura 3. A seção cheia, foi especificada para região do apoio com um comprimento de 2,50 m visto que na sollicitação de esforço cortante isto auxilia na resistência. A seção em formato “I”, foi especificado ao longo do vão para permitir um perfil mais leve e com uma inércia significativa para resistir a flexão.

A determinação das propriedades geométricas

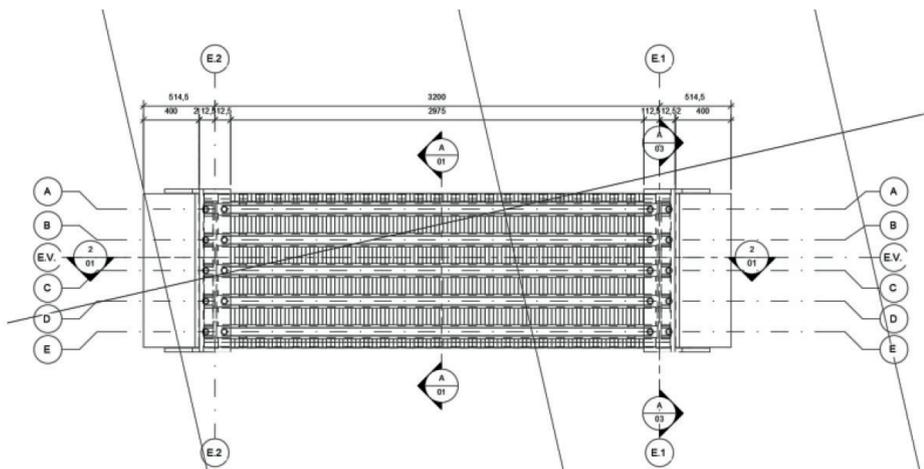


Figura 1 – Planta de formas.

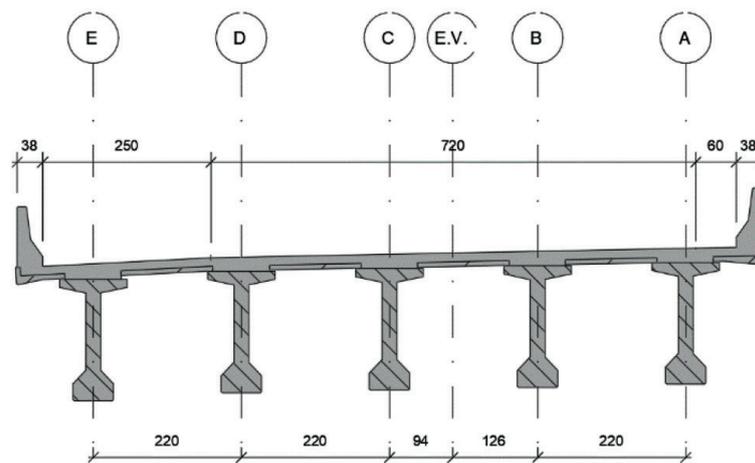


Figura 2 – Seção transversal da OAE.

é realizada de acordo com os conceitos amplamente aceitos na metodologia de cálculo aplicável a diversas geometrias. Para isto foi elaborado um código conforme as teorias citadas nos itens a seguir.

### 2.2.1. Área

Área é um conceito matemático fundamental para medir o espaço bidimensional de uma superfície. A forma mais simples de calcular a área é dividindo a superfície em quadrados de mesma medida e somando as áreas de todos esses quadrados.

Para calcular a área de uma geometria genérica, é necessário realizar uma divisão da superfície em partes menores e somar essas áreas. A precisão do cálculo pode ser ajustada conforme necessário.

### 2.2.2. Momento de Inércia

O momento de inércia é um parâmetro geométrico importante na análise de estruturas sujeitas a flexão. É calculado como a integral do produto das áreas de uma figura plana pelo quadrado das suas distâncias em relação a um eixo específico. Este valor, sempre positivo, mede a rigidez e resistência à flexão de uma seção transversal em engenharia. Para uma seção retangular, por exemplo, utiliza-se uma fórmula específica considerando os lados da seção e a posição do eixo.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2)$$

Aumentar a altura  $h$  de uma viga aumenta mais o momento de inércia do que aumentar a largura  $b$ ,

devido à dependência do quadrado das distâncias ao eixo. Ao flexionar, uma viga alonga-se no lado convexo e encurta no lado côncavo, gerando tensões de tração e compressão, respectivamente. O teorema de Steiner permite calcular o momento de inércia de um sólido em relação a um eixo paralelo ao seu centroide de massa, relacionando-o ao momento de inércia do eixo original, assim:

$$I'_x = I_x + A \cdot d^2 \quad (3)$$

### 2.2.3. Seção no apoio

A seguir estão apresentados os resultados obtidos pelo código elaborado a partir das instruções acima (Figura 4 e Figura 5 e Tabela 1 e Tabela 2).

## 2.3. Perdas Imediatas

Para determinar a perda de tensão por atrito conforme item 9.6.3.3.1 e 9.6.3.3.2 da NBR 6118/2023, foi definido um código responsável por determinar as perdas. No estudo, está sendo utilizado um sistema de pós tração, onde conforme item 9.6.3.3.2, é necessário determinar fundamentalmente três tipos de perdas:

### 2.3.1. Perdas por encurtamento imediato do concreto

Nos elementos estruturais com pós-tração, cada protensão de cabos provoca deformação imediata no concreto, levando ao afrouxamento dos cabos anteriores. Este valor é determinado conforme a tensão no concreto adjacente ao cabo resultante é provocada pelo efeito conjunto da protensão e da carga

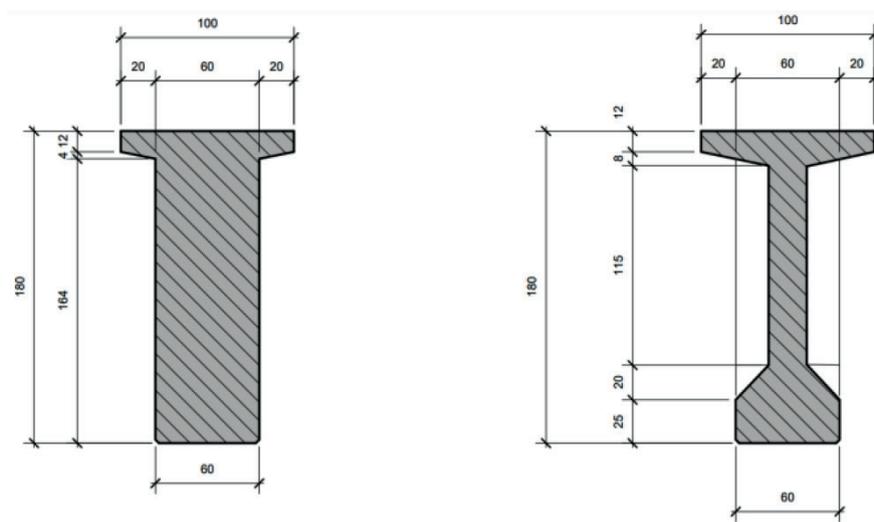


Figura 3 – Forma da viga conforme pré-dimensionamento.

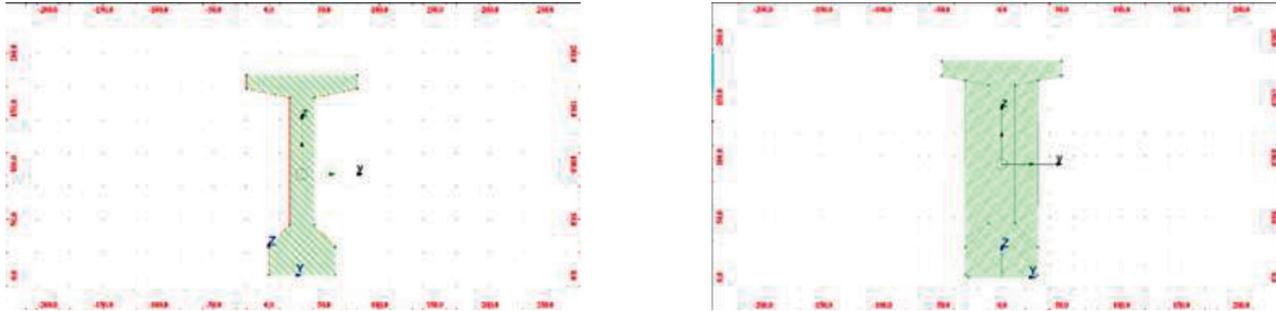


Figura 4 – Seção Simples da viga pré-moldada sem consolidação do tabuleiro.

Tabela 1 – Resultados obtidos para Seção Simples.

**Seção Apoio Simples**

y	[0,60,60,80,80,-20,-20,0,0]
z	[0,0,164,168,180,180,168,164,0]
x	[2.5000,27.5000]
Ac	1.1360e+04
Iy	3.2835e+07
Iz	4.1340e+06
Wys	3.8221e+05
Wzd	8.2680e+04
Wyi	-3.4897e+05
Wze	-8.2680e+04

**Seção Vão Simples**

y	1x13 double
z	1x13 double
x	[2.5000,27.5000]
Ac	6.5380e+03
Iy	2.6130e+07
Iz	1.9048e+06
Wys	2.9350e+05
Wzd	3.8096e+04
Wyi	-2.8724e+05
Wze	-3.8096e+04

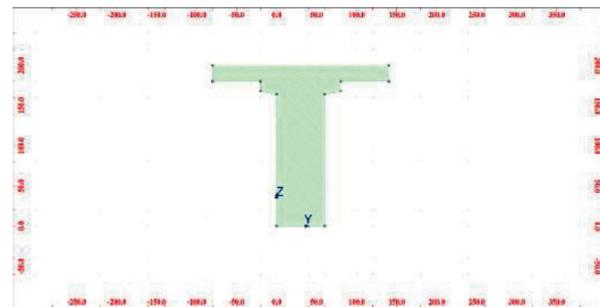
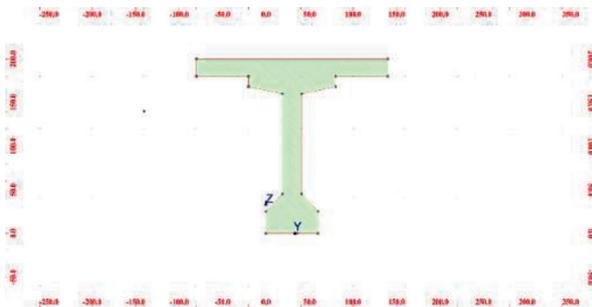


Tabela 2 – Resultados obtidos para Seção Composta.

**Seção Apoio Composta**

y	1x13 double
z	1x13 double
x	[2.5000,27.5000]
Ac	1.6522e+04
Iy	6.5170e+07
Iz	2.2964e+07
Wys	8.2390e+05
Wzd	2.0876e+05
Wyi	-5.3904e+05
Wze	-2.0876e+05

**Seção Vão Composta**

y	1x17 double
z	1x17 double
x	[2.5000,27.5000]
Ac	1.1469e+04
Iy	5.4592e+07
Iz	2.0628e+07
Wys	7.8946e+05
Wzd	1.8753e+05
Wyi	-4.1721e+05
Wze	-1.8753e+05

permanente. Para calcular a perda média de protensão por cabo, utilize a expressão seguinte:

$$\Delta\sigma_p = \alpha_p(t) \cdot \frac{n-1}{2 \cdot n} \cdot \sigma_{c,p0g}^* \quad (4)$$

2.3.1.1. Perdas por atrito

Nos elementos estruturais com pós-tração, a

perda por atrito pode ser determinada conforme item 9.6.3.3.2.2 da NBR 6118/2023. Os coeficientes de atrito aparente entre o cabo e a bainha e o coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo, na ausência de valores experimentais, podem ser utilizados os valores recomendados pelo item 9.6.3.3.2.2. Desta forma, o valor pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$\Delta P(x) = P_1 \cdot (1 - e^{-(\mu \cdot \Sigma a + k \cdot x)}) \quad (5)$$

### 2.3.2. Perdas por Deslizamento da Armadura na Ancoragem e Acomodação da Ancoragem

Conforme item 9.6.3.3.2.3, as perdas por encunhamento devem ser determinadas experimentalmente ou adotados os valores indicados pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragem.

Conforme catálogo da PROTENDE, a ancoragem PTC, de monocordoalhas, deve ser previsto uma deformação por acomodação das cunhas de ancoragem de 2,0 a 4,5 mm. As ancoragens MT, MTC ou MTAI deve ser adotado o valor de 6,0 mm.

## 2.4. Perdas Progressivas

### 2.4.1. Perdas por Relaxação do Aço de Protensão

A relaxação de fios e cordoalhas, conforme item 8.4.8 da NBR 6118/2023, para tensões variando de  $0,5f_{ptk}$  a  $0,8f_{ptk}$ , obtida conforme ensaios da NBR 7484, não pode ultrapassar os valores propostos da NBR 7482 e NBR 7483.

Para dimensionamento, os valores de  $\Psi_{1000}$  podem ser adotados conforme Tabela 8.3 da NBR 6118/2023. Conforme item 9.6.3.4.5 da NBR 6118/2023, a intensidade da relaxação do aço deve ser determinada pelo coeficiente  $\Psi(t, t_0)$ , calculado conforme:

$$\Psi(t, t_0) = \frac{\Delta \sigma_{pr}(t, t_0)}{\Delta \sigma_{pi}} \quad (6)$$

Os valores correspondentes a tempos diferentes de 1000h, sempre a 20 °C, podem ser determinados a partir da seguinte expressão, devendo o tempo ser expresso em dias:

$$\Psi(t, t_0) = \Psi_{1000} \cdot \left(\frac{t - t_0}{41,67}\right)^{0,1} \quad (7)$$

Para tensões inferiores a  $0,5f_{ptk}$ , admite-se que não haja perda de tensão por relaxação. Além disso, para tensões intermediárias não abordadas pela Tabela 8.3, pode ser feita a interpolação linear.

A NBR 6118/2023, no item 9.6.3.4.5 permite considerar para o tempo infinito o valor de  $\Psi(t, t_0) = 2,5\Psi_{1000}$ .

### 2.4.2. Perdas por fluência do concreto

Conforme item 9.6.3.4.2 da NBR 6118/2023, pode ser utilizado a simplificação para determinação

deste efeito quando satisfeitas as seguintes condições:

- a) a concretagem do elemento estrutural, bem como protensão, são executadas em fases suficientemente próximas para que seja desprezado os efeitos de protensões sucessivas;
- b) os cabos têm entre si afastamentos suficientemente pequenos em relação à altura da seção do elemento estrutural, de modo que seus efeitos possam ser supostos equivalentes ao de um único cabo.

Nesse caso, admite-se que no tempo  $t$  as perdas e deformações progressivas do concreto e do aço de protensão, na posição do cabo resultantes, com as tensões no concreto positivas para compressão e as tensões no aço positivas para tração, pela seguinte formulação:

$$\Delta \sigma_p(t, t_0) = \quad (8)$$

$$\frac{|\varepsilon_{cs}(t, t_0)| \cdot E_p + \alpha_p(t) \cdot \sigma_{c,p0g}(t, t_0) + \sigma_{c,p0\chi}(t, t_0)}{\chi_p + \chi_c \cdot \alpha_p \cdot \eta \cdot \rho_p}$$

$$\Delta \varepsilon_{pt}(t, t_0) = \frac{\sigma_{p0}}{E_p} \cdot \chi(t, t_0) - \frac{\Delta \sigma_p(t, t_0)}{E_p} \cdot \chi_p \quad (9)$$

onde,

$$\Delta \varepsilon_{ct}(t, t_0) = \frac{\sigma_{c,p0g}(t, t_0)}{E_{ci28}} \cdot \varphi(t, t_0) - \quad (10)$$

$$- \frac{\sigma_{p0}(t, t_0)}{E_{ci28}} \cdot \chi_c + |\varepsilon_{cs}(t, t_0)|$$

$$\chi(t, t_0) = -\ln(1 - \Psi(t, t_0)) \quad (11)$$

$$\chi_p = 1 + \chi(t, t_0) \quad (12)$$

$$\chi_c = 1 + 0,5 \cdot \varphi(t, t_0) \quad (13)$$

$$\eta = 1 + e_p^2 \cdot \frac{A_c}{I_c} \quad (14)$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} \quad (15)$$

$$\langle t \rangle = \frac{E_p}{E_{ci}(t)} \quad (16)$$

$$\langle t \rangle = \frac{E_p}{E_{ci}(t)} \quad (17)$$

Conforme item 9.6.3.4.3 da NBR 6118/2023, o processo do item 9.6.3.4.2 da NBR 6118/2023 pode ser substituído desde que satisfeitas as mesmas condições citadas e que a retração não difira em mais de 25% do valor de  $-8 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi(\infty, t_0)$ .

O valor absoluto da perda de tensão devido a fluência, retração e relaxação, com  $\sigma_{c,p0g}$  em MPa considerado positivo se for de compressão, é dado por:

a) para aços de relaxação normal (RN)

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 18,1 + \frac{\alpha_p}{47} (\varphi(t_\infty, t_0))^{1,57} \cdot (3 + \sigma_{c,p0g}) \Psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\Delta\sigma_{pi}} \quad (18)$$

b) para aços de relaxação baixa (RB)

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 7,4 + \frac{\alpha_p}{18,7} (\varphi(t_\infty, t_0))^{1,07} \cdot (3 + \sigma_{c,p0g}) \quad (19)$$

## 2.5. Protensão em Sistemas Isostáticos

Conforme pode ser analisado, as solicitações geradas na viga em um sistema isostático podem ser dados pelas equações de equilíbrio da seção visto que o encurtamento e/ou alongamento não gera solicitações como ocorre em sistemas hiperestáticos.

Desta forma, para determinar a tensão na seção de concreto devido a protensão. Para determinar as solicitações, é necessário determinar estes valores na face superior e inferior da viga afim de verificar os limites de tensão.

$$\sigma_p = \begin{cases} \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p}{W_s} \text{ (superior)} \\ \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p}{W_i} \text{ (inferior)} \end{cases} \quad (20)$$

Além disso, para determinar a tensão na seção devido as tensões no Estado Limite de Serviço tanto para situação permanente quanto para situação acidental seguem conforme formulação.

$$\sigma_g = \begin{cases} \frac{M_g}{W_s} \text{ (superior)} \\ \frac{M_g}{W_i} \text{ (inferior)} \end{cases} \quad (21)$$

## 2.6. Fases de Protensão

Para a análise do estudo de caso, é essencial definir as fases de protensão, a fim de estabelecer os valores limites de tensão durante o faseamento construtivo. Assim, são estabelecidas cinco fases de protensão para o ELS-F e duas fases para o ELS-D, conforme a metodologia construtiva adotada. O ELS-F (Estado Limite de Formação de Fissuração), de acordo com a NBR 6118/2023, item 3.2.2, é o estado em que se inicia a formação de fissuras. Já o ELS-D (Estado Limite de Descompressão) é o estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tensão de tração no restante da seção.

No caso do ELS-F, são definidas cinco fases de protensão conforme a metodologia construtiva aplicada. Na primeira fase, inclui-se o peso próprio da viga e a protensão, estabelecendo-se os limites de tensão conforme a verificação simplificada do item 17.2.4.3.2 da NBR 6118/2023. A segunda fase abrange o peso próprio da viga, a protensão e o peso da laje sem a consolidação com a viga, sendo adicionado o carregamento da laje às solicitações da fase um. A terceira fase considera o peso próprio da viga, a protensão e o peso da laje consolidada à viga. Na fase quatro, incluem-se as cargas permanentes da ponte, como pavimentação e barreiras, além dos elementos da fase três. Finalmente, a fase cinco agrega a carga móvel do veículo tipo da ponte às cargas da fase quatro.

Para o ELS-D, são consideradas duas fases de protensão. A primeira fase corresponde aos carregamentos da fase quatro do ELS-F; contudo, no Estado Limite de Serviço de Descompressão, não são permitidas tensões de tração na peça de concreto. A segunda fase corresponde aos carregamentos da fase cinco do ELS-F, mantendo a restrição de tensões de tração no concreto.

## 2.7. Análise do Estudo de Caso

### 2.7.1. Lançamento dos Cabos de Protensão

A partir do embasamento teórico apresentado, foi elaborado um código para determinar os efeitos. O traçado dos cabos propostos segue conforme Tabela 3 e Figura 6.

### 2.7.2. Perdas Imediatas

A partir do tópico 2.7.1, foi determinado as perdas por atrito conforme traçado proposto. Conforme código elaborado, foi calculado as seguintes perdas imediatas:

As perdas por protensão sucessiva foram determinadas separadamente e é possível analisar que elas não são relevantes quando comparadas as outras perdas.

### 2.7.3. Perdas Progressivas

Conforme o Anexo A e o item 8.4 da NBR 6118/2023, é calculado as perdas progressivas devido ao efeito de fluência/retração do concreto e de relaxação da cordoalha de protensão.

Desta forma, foi elaborado um código para o cálculo da perda percentual em cada ponto de cálculo de protensão é dada conforme Tabela 6.

### 2.7.4. Verificação dos Estado Limites de Serviço

Foi elaborado um código para determinar as tensões e os valores limites para cada fase na Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

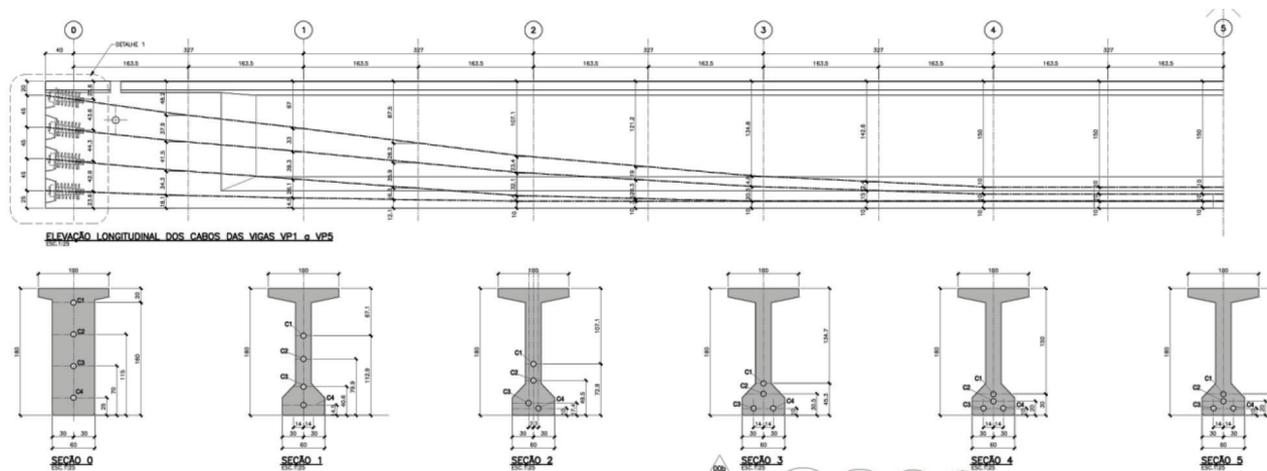


Figura 6 – Traçado dos cabos de protensão.

Tabela 3 – Traçado dos cabos de protensão do estudo de caso.

Informações da Viga			C1		C2		C3		C4	
Seção	x(m)	Tipo de Seção	Ang(°)	Vi(m)	Ang(°)	Vi(m)	Ang(°)	Vi(m)	Ang(°)	Vi(m)
0	0	Apoio	8	1,6	6	1,15	5	0,7	2	0,25
1	3,35	Vão	8	1,172	6	0,829	5	0,434	2	0,147
2	6,7	Vão	7,78	0,75	5,9	0,512	4,55	0,177	0	0,1
3	10,05	Vão	5,1	0,458	2,72	0,308	0	0,1	0	0,1
4	13,4	Vão	0	0,3	0	0,2	0	0,1	0	0,1
5	16,75	Vão	0	0,3	0	0,2	0	0,1	0	0,1
6	20,1	Vão	0	0,3	0	0,2	0	0,1	0	0,1
7	23,45	Vão	-5,1	0,458	-2,72	0,308	0	0,1	0	0,1
8	26,8	Vão	-7,78	0,75	-5,9	0,512	-4,55	0,177	0	0,1
9	30,15	Vão	-8	1,172	-6	0,829	-5	0,434	-2	0,147
10	33,5	Apoio	-8	1,6	-6	1,15	-5	0,7	-2	0,25

Tabela 4 – Resultado obtido pelo código para calcular as perdas imediatas (unidades em MPa).

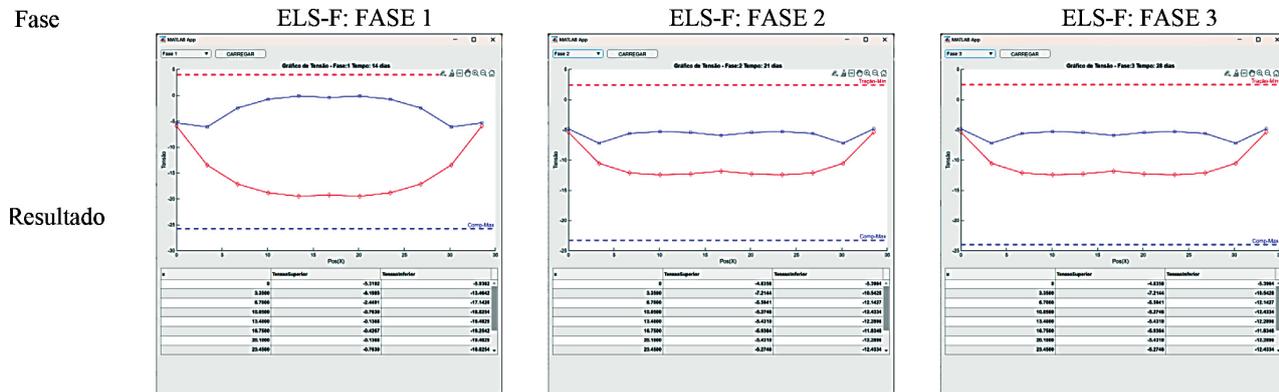
Seção		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C1	Perdas por Atrito	1400,00	1391,54	1381,13	1365,93	1343,23	1338,74	1343,23	1365,93	1381,13	1391,54	1400,00
	Perdas por Encunhamento	1277,48	1285,94	1296,35	1311,54	1334,25	1338,74	1334,25	1311,54	1296,35	1285,94	1277,48
C2	Perdas por Atrito	1400,00	1392,65	1383,04	1369,88	1352,68	1348,16	1352,68	1369,88	1383,04	1392,65	1400,00
	Perdas por Encunhamento	1287,30	1294,65	1304,26	1317,47	1334,62	1339,14	1334,62	1317,47	1304,26	1294,65	1287,30
C3	Perdas por Atrito	1400,00	1392,65	1383,04	1369,88	1352,68	1348,16	1352,68	1369,88	1383,04	1392,65	1400,00
	Perdas por Encunhamento	1287,73	1295,16	1307,65	1325,73	1330,29	1334,83	1330,29	1325,73	1307,65	1295,16	1287,73
C4	Perdas por Atrito	1400,00	1391,83	1380,97	1376,36	1371,75	1367,17	1371,75	1376,36	1380,97	1391,83	1400,00
	Perdas por Encunhamento	1306,99	1315,16	1326,01	1330,63	1335,24	1339,82	1335,24	1326,01	1315,16	1306,99	

**Tabela 5** – Resultado obtido pelo código para calcular as perdas por protensão sucessiva.

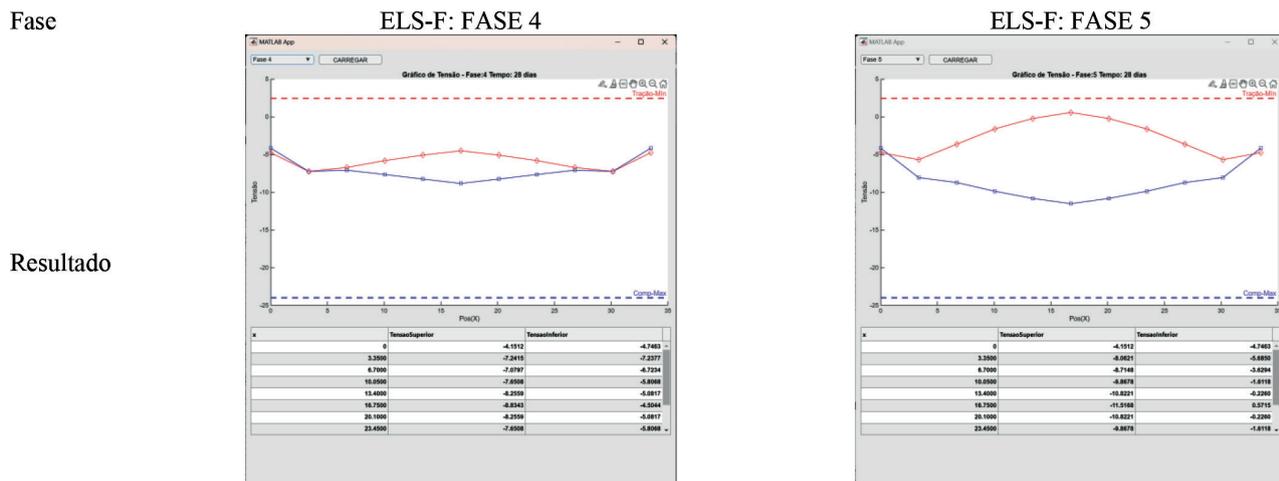
x (m)	Cabo 1 (MPa)	Cabo 2 (MPa)	Cabo 3 (MPa)	Cabo 4 (MPa)
0	-11,3	-4,47	-3,21	0
3,35	-16,05	-8,33	-3,5	0
6,7	-11,28	-7,73	-1,16	0
10,05	-5,13	-4,5	0,41	0
13,4	-1,14	-0,94	1,17	0
16,75	-0,35	-0,24	1,7	0
20,1	-1,14	-0,94	1,17	0
23,45	-5,13	-4,5	0,41	0
26,8	-11,28	-7,73	-1,16	0
30,15	-16,05	-8,33	-3,5	0
33,5	-11,3	-4,47	-3,21	0

**Tabela 6** – Perdas em percentual em cada ponto de cálculo.

Posição	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
$\Delta\sigma_{\text{pinf\_p0}}$	0,118	0,141	0,147	0,149	0,148	0,146	0,148	0,149	0,147	0,141	0,118



**Figura 7** – Resultados obtido pelo código de verificação do estado limite de formação de fissuras.



**Figura 8** – Resultados obtido pelo código de verificação do estado limite de formação de fissuras.

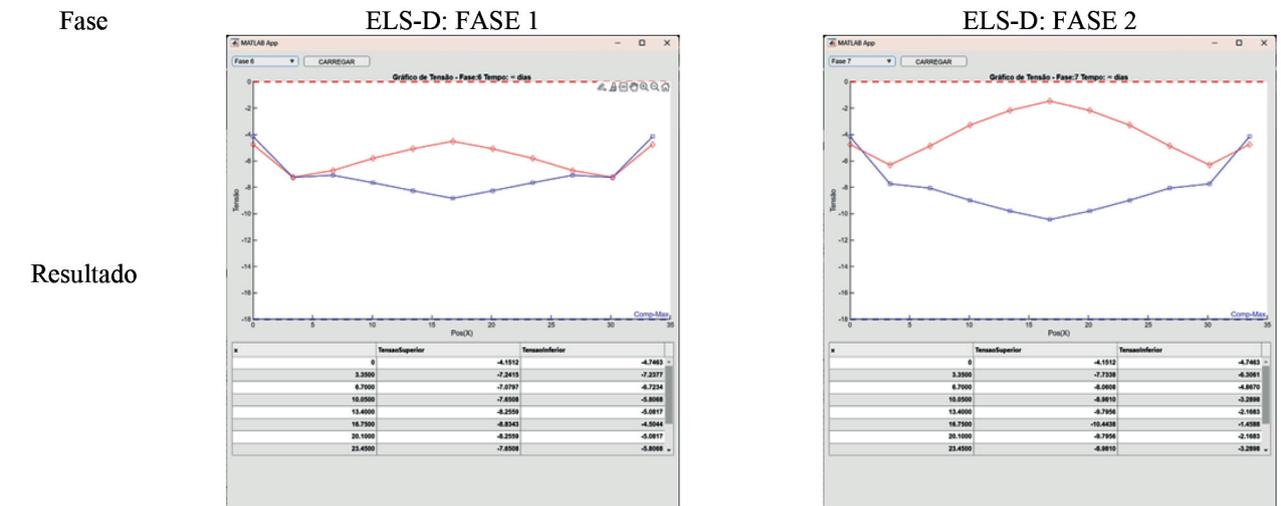


Figura 9 – Resultados obtido pelo código de verificação do estado limite de formação de fissuras.

## 2.8. Modelagem do Problema

A colocação de cabos de protensão em projetos de construção é uma tarefa essencial que exige precisão e atenção aos detalhes. No entanto, ao utilizar o *software Autodesk Revit*, amplamente empregado para modelagem da informação da construção (BIM), surgem desafios específicos. Este artigo abordará esses desafios e sugerirá possíveis soluções.

- **Complexidade Geométrica:** um dos principais desafios ao posicionar cabos de protensão no Revit é a complexidade geométrica envolvida. Os cabos frequentemente precisam seguir trajetórias curvas e tridimensionais, o que não é suportado pelas ferramentas padrão do Revit. Assim, é necessário empregar metodologias alternativas, como o uso do Dynamo, que permite a criação de *scripts* para gerar a geometria complexa dos cabos.
- **Precisão e Detalhamento:** alcançar a precisão necessária no Revit pode ser desafiador. O *software* requer um alto nível de detalhamento para garantir o correto posicionamento dos cabos. Além disso, a inserção de detalhes específicos, como tensões e ancoragens, pode ser trabalhosa e suscetível a erros.
- **Compatibilidade de Dados:** a compatibilidade de dados entre o Revit e outros *softwares* de análise estrutural é outro desafio. Frequentemente, os dados de protensão precisam ser exportados para verificação e análise, e qualquer discrepância ou perda

de dados durante essa transferência pode comprometer a integridade do projeto.

- **Limitações do Software:** as limitações inerentes ao Revit podem representar desafios adicionais. O *software* pode não possuir todas as ferramentas necessárias para um detalhamento preciso, exigindo o uso de *plugins* ou extensões adicionais. Além disso, a interface do usuário pode não ser intuitiva para todos os profissionais, necessitando de treinamento específico.

A modelagem correta dos cabos de protensão em elementos estruturais é fundamental para garantir a integridade e segurança das construções. Esta abordagem assegura não apenas a precisão do modelo, mas também facilita a inspeção visual, permitindo validar que todos os cabos estão devidamente alojados nos elementos estruturais ou no cobrimento especificado.

Para auxiliar neste processo, foi desenvolvido um código em Dynamo. O desafio em modelar o sistema de protensão não é apenas o posicionamento em relação à viga, mas também em relação ao modelo global. Dar-se dividir o problema em dois sistemas: o sistema de eixo global (coordenadas do modelo) e o sistema de eixo local (coordenadas baseadas no elemento).

O Dynamo trabalha originalmente no sistema de eixo global, onde a viga pode estar em qualquer posição. Entretanto, a análise dos cabos de protensão é sempre feita com referência ao eixo do elemento.

No Revit, foi criado um sistema de vigas em diferentes perspectivas. Isso garante que todas as possibilidades de ocorrência estejam contempladas

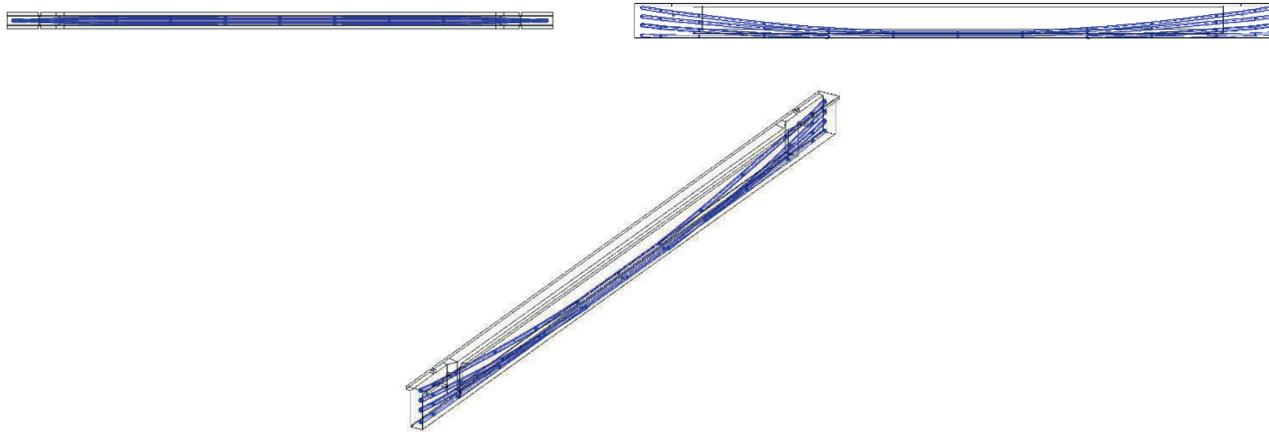


Figura 10 – Verificação do cabo de protensão em planta, elevação e 3D.

pelo código. A primeira parte da estruturação do código consiste na seleção dos elementos pré-moldados protendidos. Para isso, foi criado um parâmetro compartilhado “Elemento”, que nomeia os elementos do projeto como “LONGARINA PRÉ-MOLDADA PROTENDIDA”.

Com os dados obtidos anteriormente, utiliza-se o nó “*Element.GetLocation*” para adquirir a localização e a geometria base do elemento, definindo o ponto de início e fim do elemento selecionado. Em seguida, são computados todos os planos com a função “*Plane.Offset*”, definindo pontos de controle adicionais ao modelo de cálculo para garantir maior precisão no traçado do cabo.

Após definir os offsets dos planos, aplica-se uma rotação no vetor normal ao plano equivalente ao ângulo de rotação do cabo em relação ao alinhamento da viga. Utiliza-se duas funções:

- **Plane.ByOriginXAxisYAxis:** cria planos na origem dos planos estabelecidos no offset anterior, direcionando o alinhamento da viga pré-moldada protendida conforme “*Element.GetLocation*” em relação ao vetor no eixo Z (“*Vector.ZAxis*”).

- **Vector.Rotate:** gera o normal ao plano do alinhamento do cabo de protensão, recebendo os planos normais e rotacionados calculados anteriormente e os ângulos de rotação do cabo.

Com os dados anteriores, cria-se a geometria do cabo de protensão conforme o projeto, dividindo o código em três partes: região linear e duas regiões parabólicas. A capacidade de realizar uma vistoria visual no modelo é essencial para identificar inconformidades que possam comprometer a integridade da estrutura, sendo que o código permite essa análise precisa, conforme mostra a Figura 10.

### 3 Conclusão

Este estudo desenvolveu uma metodologia computacional para dimensionar e verificar sistemas de protensão isostáticos em vigas pré-moldadas para tabuleiros de pontes. A metodologia abrange verificações técnicas essenciais, assegurando segurança nas construções e integração eficiente no ambiente BIM (*Building Information Modeling*). A aplicação do BIM melhora a coordenação entre as equipes de engenharia civil, arquitetura e construção, otimizando o processo de projeto, reduzindo erros e retrabalhos, e garantindo conformidade com as normas brasileiras.

Em resumo, a pesquisa promove avanços no projeto e construção de pontes, combinando normas técnicas com ferramentas computacionais e BIM. Ao assegurar a conformidade com as normas e promover inovação nos processos, a metodologia proposta contribui para a criação de estruturas seguras e duráveis, beneficiando o setor da construção civil, especialmente na engenharia de pontes.

Com base nos resultados obtidos no estudo de caso apresentado, os valores foram satisfatórios e se mostraram próximos aos alcançados pela metodologia descrita anteriormente. Este estudo de caso foi conduzido em um cenário real, o que reforça a validade dos dados e confirma o comportamento observado durante o experimento. A aplicação prática das teorias estudadas comprovou a eficácia da metodologia, oferecendo resultados relevantes e confiáveis para futuras pesquisas e práticas no campo.

## 4 Referências

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC., **SAP2000**, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Version 14. CSI Inc, Berkeley, California, USA, 2010.  
SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S., **Estudo da Zonificação Sísmica Brasileira Integrada em um Con-**

**texto Sul-Americano**. XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, 2004.

SISTEMAS DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO – SIBI, 2022, **Manual para elaboração e Normalização de Trabalhos Acadêmicos**, Série Manual de Procedimentos no 5, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em [www.sibi.ufrj.br/index.php/manuais-e-publicações](http://www.sibi.ufrj.br/index.php/manuais-e-publicações). Acesso em: 21 de abril de 2023.