2018 XCBPE
X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
9 a 11 de maio - Rio de Janeiro

Análise comparativa entre longarinas pré-moldadas de concreto armado e protendido para pontes rodoviárias

Ataide Teixeira da Silva Junior[1], Daniel Lemos Mouço[2]
[1] Universidade Veiga de Almeida / ataideteixeira2@gmail.com
[2] Universidade Veiga de Almeida / daniel.mouco@uva.br

Resumo

As pontes compõem importante papel na logística de transportes nacional, promovendo a circulação de pessoas e mercadorias através da superação de obstáculos naturais ou artificiais. Tendo em vista a necessidade constante de aumento da malha rodoviária nacional, novas pontes deverão ser construídas, buscando aliar o desempenho econômico com as necessidades logísticas da região. O presente trabalho propõe uma análise comparativa do custo de produção de longarinas de pontes rodoviárias confeccionadas em concreto armado e concreto protendido. Serão comparados os custos de produção de longarinas com tamanhos de vãos variando de 15m a 60m. Todos os casos avaliados foram calculados para uma ponte, cujo tabuleiro foi concebido em concreto armado, com 2 faixas de rolamento, acostamento em ambos os lados e barreiras de proteção do tipo *New Jersey*. Foi desenvolvida a análise para vigas isostáticas, apoiadas nas extremidades e travadas por transversina, onde foram verificados: (1) o desempenho técnico da estrutura, avaliando as características geométricas adotadas, assim como o consumo dos materiais e o seu comportamento estrutural; e (2) o desempenho financeiro, com a contabilização do consumo total de materiais e serviços necessários para a construção das vigas. Para tal, foram aplicadas as planilhas de composição de custos SICRO do DNIT, com valores atualizados em setembro de 2017. Ao término do trabalho, verificou-se, do ponto de vista econômico, que as longarinas em concreto armado possuem um custo de produção inferior à de concreto protendido, mas que o concreto protendido consome menos materiais. Foram criadas curvas de pré-dimensionamento baseados na relação entre consumo de materiais pelo vão vencido.

Palavras-chave
Pontes; Dimensionamento estrutural; Concreto armado; Concreto protendido.

Introdução

As pontes são obras destinadas a superar obstáculos que se apresentem ao curso natural de uma via, tais como rios, lagos, braços de mar ou simplesmente outras vias, quando recebem então o nome de viadutos. (PFEIL, 1979, p.1).

São compostas pela superestrutura, pela mesoestrutura e pela infraestrutura, sendo tratado no presente artigo apenas o dimensionamento das longarinas que integram a superestrutura.

A concepção estrutural das longarinas para pontes rodoviárias deve considerar fatores como a largura do tabuleiro, vão a ser vencido e solução estrutural adotada, para que seja possível determinar as características geométricas que influenciarão diretamente

no comportamento da estrutura, em sua resistência aos esforços e nos cuidados de manutenção que deverão ser previstos durante sua vida útil.

Torna-se necessário, portanto, compreender o funcionamento do ponto de vista da engenharia, dessas estruturas que suportam tráfegos mais pesados, vencendo vãos maiores do que no passado e que necessitam de estudos mais elaborados sobre a evolução das técnicas empregadas, dos materiais disponíveis e dos veículos que as utilizam, contribuindo para a literatura sobre a construção de pontes.

Dados de projeto

Os casos analisados foram para estruturas isostáticas compostas por duas vigas longarinas biapoiadas confeccionadas em concreto armado (CA) e protendido (CP) pré-moldados, com vãos entre 15 e 60 m travadas por transversinas a cada 5 m, sustentando um tabuleiro com duas faixas de rolamento, acostamentos e barreiras do tipo *New Jersey* com largura total de 14,30 m.

O cálculo das cargas móveis que incidem sobre o tabuleiro foi feito utilizando o trem-tipo TB 450 conforme orientações e modelos presentes na NBR 7188(1982) para pontes rodoviárias.

Para a consideração da ação dos ventos sobre a estrutura, foram utilizadas as preconizações presentes na NBR 6123 (1988) para forças devido aos ventos em edificações, tendo as informações do estado do Rio de Janeiro como base para o desenvolvimento dos cálculos.

O concreto estrutural utilizado para todos os casos foi o C35, com armaduras passivas compostas por aço CA-50 de diâmetros comerciais com módulo de elasticidade (E_s) de 210000 MPa e armaduras ativas com cordoalhas CP190 RB de 15.2 com tensão de escoamento f_{pyk} =239 KN/cm², tensão de ruptura f_{ptk} =265,8 KN/cm², cordoalhas de baixa relaxação e módulo de elasticidade (E_{sp}) de 200000 MPa, aplicadas em um sistema de pré-tração completa com cordoalhas engraxadas dispostas no interior de bainhas de aço galvanizado.

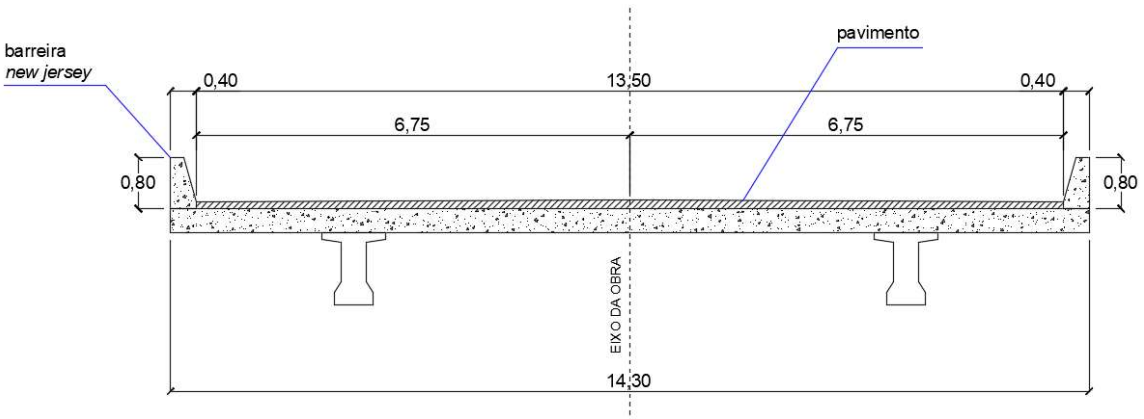

Figura 1 – Seção transversal tipo no meio do vão da ponte

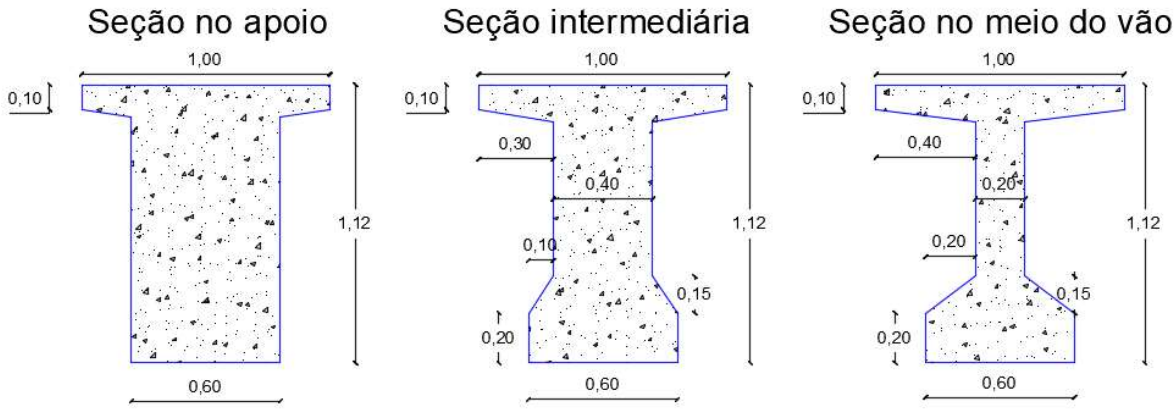

Figura 2 – Seção variável ao longo do comprimento para o exemplo de viga protendida de 30m

Longarinas em Concreto Armado

As longarinas confeccionadas em concreto armado foram dimensionadas para o Estado Limite Último (ELU) da estrutura e verificadas em relação à fadiga no Estado Limite de Serviço (ELS).

Para a determinação da largura da alma das vigas (b_w), foi igualado o valor da força solicitante de cálculo (V_{Sd}) com o valor da força cortante resistente de cálculo devido as bielas comprimidas (V_{Rd2}) e a partir disso obtido a largura através da equação:

$$V_{Rd2} = 0{,}27.\alpha_{v2}.f_{cd}.b_w.d \qquad (1)$$

Onde:
d → é a altura útil da viga;
f_{cd} → é o valor de cálculo da resistência do concreto à compressão;

Tabela 1 – Geometria das pontes em concreto armado

Vão (m)	H_{viga} (m)	b_w apoios (cm)	b_w meio vão (cm)	H_{laje} (cm)
15	1,25	40	20	38
20	1,67	40	20	38
25	2,08	40	20	38
30	2,50	40	20	38
35	2,92	40	20	38
40	3,33	50	30	38
45	3,75	60	30	38
50	4,17	60	30	38
55	4,58	70	30	38
60	5,00	80	40	38

Após determinada as larguras, foram reajustados os valores do peso próprio e obtidos todos os esforços solicitantes de cálculo para os momentos fletores e forças

cortantes a que a estrutura está submetida bem como os cálculos de armadura passiva de flexão baseada na tabela KMD e de cisalhamento.

Longarinas em Concreto Protendido

Assim como no caso das vigas em concreto armado, as longarinas em concreto protendido foram dimensionadas para o ELU e verificadas no ELS para a descompressão, que ocorre no momento em que a ação dos carregamentos externos gera tração nas fibras inferiores, caso indesejado na protensão total.

A largura da alma das vigas foi determinada seguindo o mesmo roteiro dos casos em concreto protendido, através da equação (1) apresentada anteriormente.

Tabela 2 – Geometria das pontes em concreto protendido

Vão (m)	H_{viga} (m)	b_w apoios (cm)	b_w meio vão (cm)	H_{laje} (cm)
15	1,10	50	20	38
20	1,25	50	20	38
25	1,40	50	20	38
30	1,50	60	20	38
35	1,75	60	30	38
40	2,00	60	30	38
45	2,25	60	30	38
50	2,50	60	30	38
55	2,75	60	30	38
60	3,00	60	30	38

A protensão aplicada é do tipo completa com aderência inicial, quando a armadura ativa é solicitada antes da aplicação do concreto, não sendo admitidas tensões de tração na estrutura. Por se tratar de um caso de pré-tensão, as perdas de protensão são previstas e compensadas antes mesmo do lançamento do concreto, fazendo com que a força de protensão em uso se iguale a força de protensão inicial.

$$F_p \geq \frac{M_d}{W_{inf}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{A}+\frac{e}{W_{inf}}\right)} \qquad (2)$$

Onde:
F_P → é a força de protensão que atuará na estrutura após as perdas;
M_d → é o momento solicitante de cálculo;
W_{inf} → é o modulo de resistência para flexão positiva.
A → é a área da seção solicitada;
e → é a excentricidade;

Devido à excentricidade em sua aplicação, a força de protensão ocasiona dois tipos de solicitações: compressão axial que gera uma tensão de compressão continua em toda seção (equação 3) e o momento de protensão que gera tensões de compressão na fibra inferior e de tração na fibra superior da seção. (equações 4 e 5)

$$\sigma_P = -\frac{F_P}{A} \tag{3}$$

$$\sigma_{MP,inf} = -\frac{F_P \cdot e}{W_{inf}} \tag{4}$$

$$\sigma_{MP,inf} = \frac{F_P \cdot e}{W_{sup}} \tag{5}$$

Onde:

σ_P → é a tensão axial de compressão;

σ_{MP} → é a tensão devido ao momento de protensão nas fibras inferiores e superiores.

Para que haja o sucesso na aplicação da protensão, basta garantir que a tensão total de compressão gerada por ela seja igual ou superior as tensões máximas de tração às quais a fibra inferior da viga está solicitada.

$$\sigma_P + \sigma_{MP,inf} \geq \sigma_{inf} \quad \therefore \quad -\frac{F_P}{A} - \frac{F_P \cdot e}{W_{inf}} \geq \frac{M_d}{W_{inf}} \tag{6}$$

É possível constatar que a estrutura se comporta da forma como planejado para uma protensão completa após o início de seu funcionamento, onde as cargas variáveis encontram-se em ação, não apresentando tensões de tração nas fibras sendo, portanto, verificada para o ELS-D (Estado Limite de Descompressão), conforme apresentado na Figura 3.

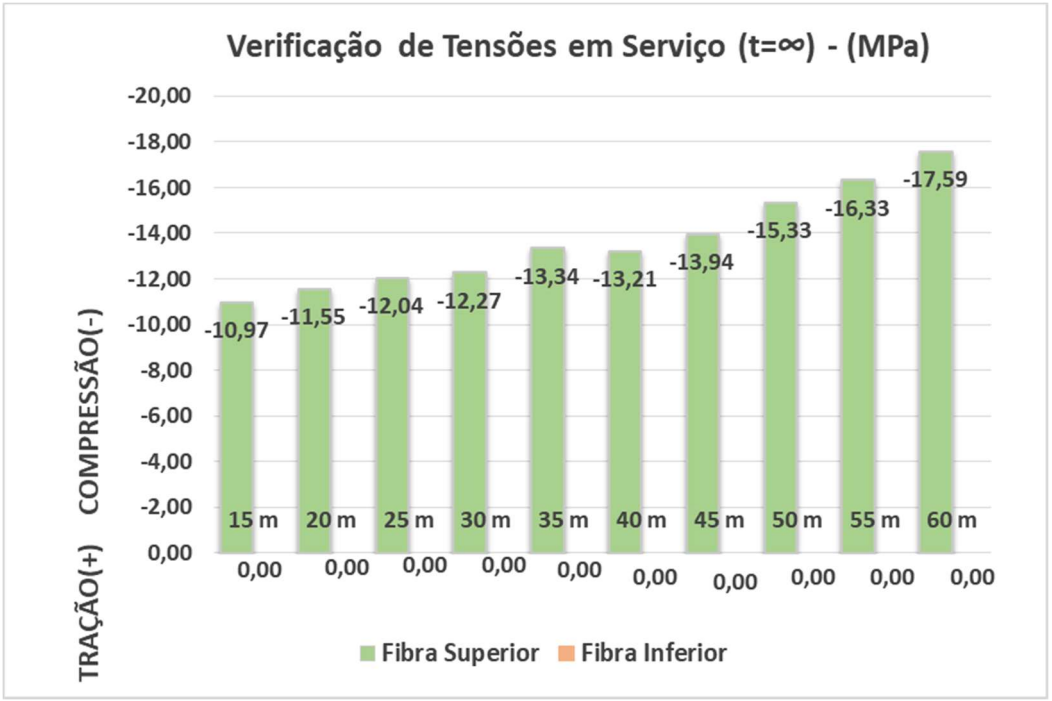

Figura 3 – Verificação de tensões em serviço.

Análise Comparativa

De posse dos dados de cada uma das soluções estudadas, foi possível obter valores referenciais comparativos entre as taxas de armadura (ρ_s) de flexão e transversal nas seções mais críticas através da relação entre a área de aço (A_s) e a área da seção da viga (A_{conc}), para os casos em concreto armado e protendido em todos os vãos analisados. Figuras 4 e 5.

Cabe ressaltar que as taxas de armadura máxima ($\rho_{s,max}$) e mínima ($\rho_{s,min}$) para flexão e cortante foram respeitadas em todos os casos analisados, não ultrapassando os valores preconizados pela NBR 6118(2003).

Armaduras de Flexão

$\rho_{s,max}$= 4% e $\rho_{s,min}$= 0,15%

Armaduras Transversais

$\rho_{s,min}$= 0,0013%

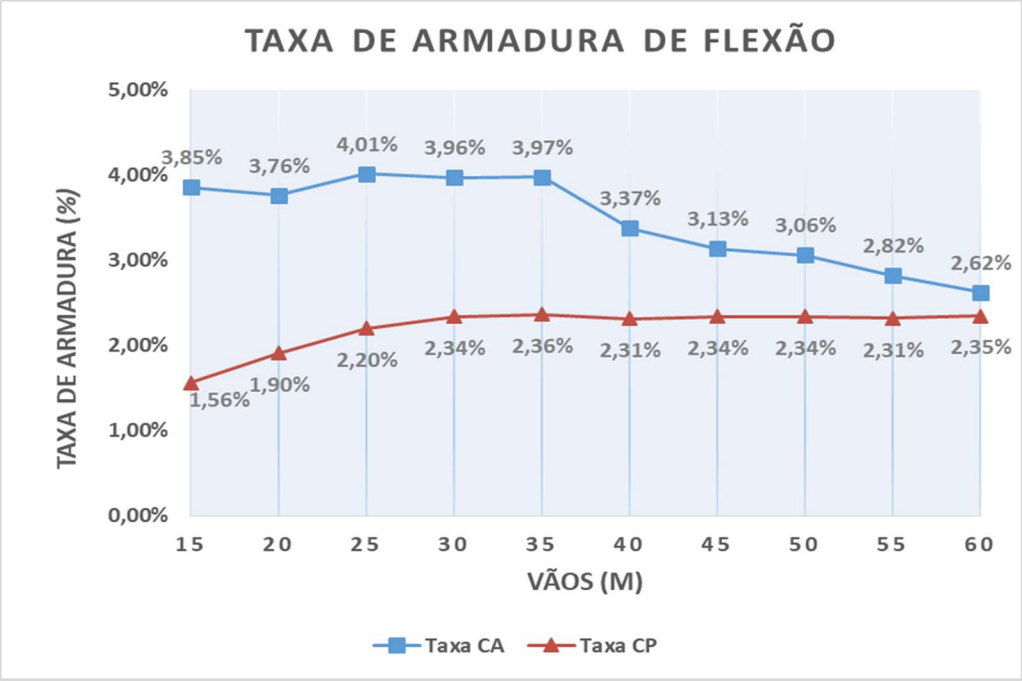

Figura 4 – Taxa de armadura de Flexão no centro das longarinas

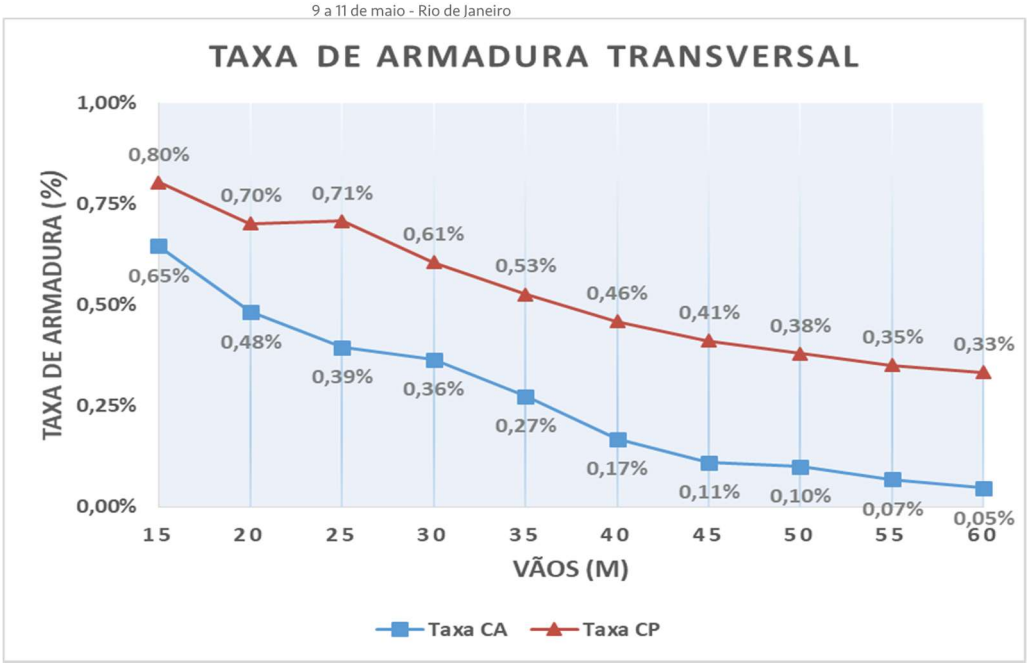

Figura 5 – Taxa de armadura Transversal nos apoios das longarinas

Os gráficos apresentados mostram que as longarinas em CP apresentam menores taxas de armadura de flexão se comparadas aos casos em CA ainda que aponte uma tendência de reversão desse quadro conforme o aumento dos vãos.

Já as taxas de armadura transversal das longarinas em CA e CP apresentam caráter descendente em todos os vãos analisados, tendo as vigas em CP maiores valores, o que pode ser explicado pelo fato de as vigas possuírem menores alturas úteis quando comparadas as vigas em CA, que apresentam maior capacidade de resistência aos esforços cortantes por mecanismos complementares aos da treliça.

Foi obtida também a relação de armadura total (kg) pelo volume de concreto por longarina (m^3) para todos os vãos analisados gerando um gráfico de curva de dimensionamento para vigas pré-moldadas em concreto armado e protendido, com uma consequente equação para dimensionamento.

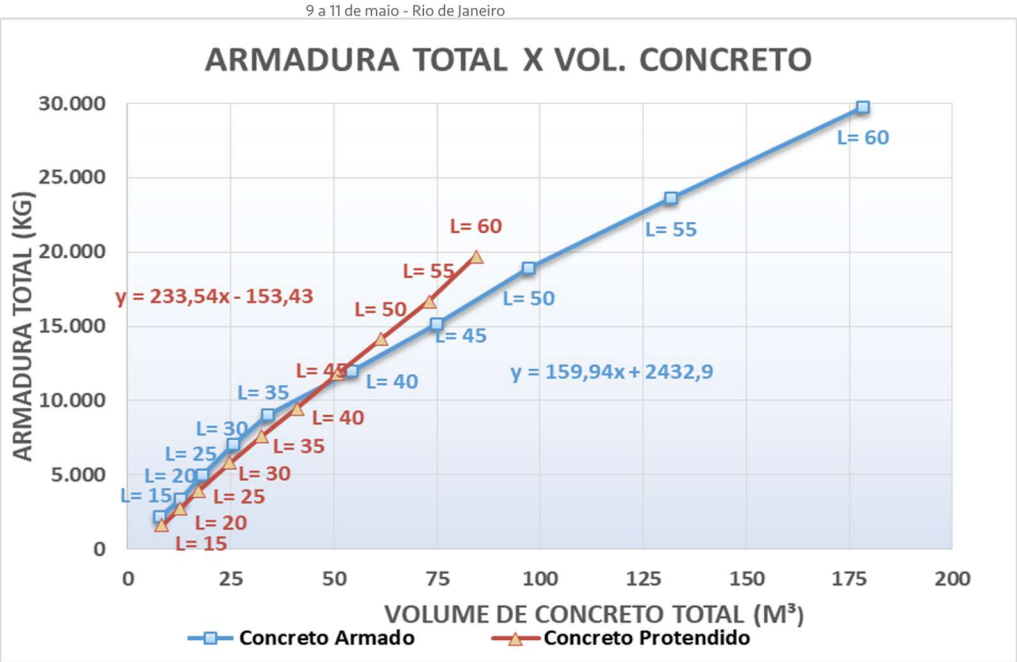

Figura 6 – Relação entre peso de armadura total e volume de concreto por longarina em CA e CP

Em relação ao custo final para a produção das longarinas pré-moldadas, utilizou-se as planilhas SICRO do DNIT para o Estado do Rio de Janeiro no mês de setembro de 2017, onde foi possível observar que as vigas de concreto protendido apresentam um custo superior em sua fabricação quando comparadas as vigas em concreto armado até os vãos de 50 m, tendo a partir de então a inversão na tendência atingindo as vigas de concreto armado até 127% do custo das vigas protendidas no vão de 60m. Tabela 3 e Figura 7.

Tabela 3 – Custo de duas longarinas pré-moldadas

Vão (m)	Concreto Armado (R$)	Concreto protendido (R$)
15	46.960,62	63.372,75
20	75.754,09	105.786,82
25	112.707,66	146.442,83
30	159.094,18	204.170,79
35	208.098,94	261.272,26
40	279.258,45	319.923,52
45	359.924,13	379.969,78
50	450.171,29	452.325,80
55	567.001,37	567.076,37
60	816.233,17	638.951,16

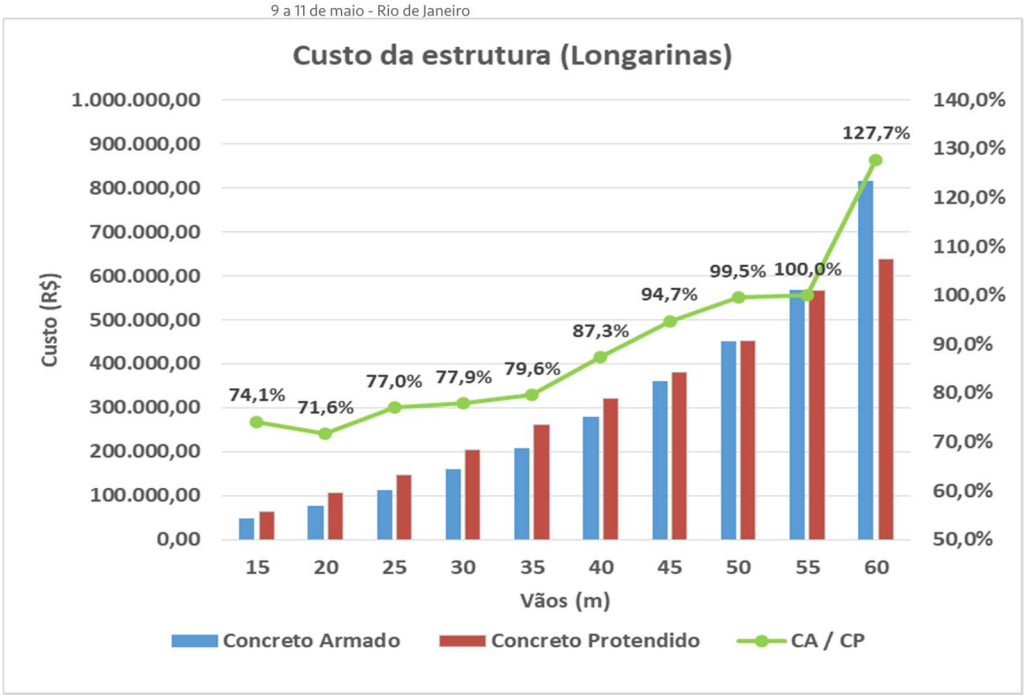

Figura 7 – Custo comparativo entre as longarinas pré-moldadas em concreto armado e concreto protendido

Tal fato indica que as estruturas em concreto protendido são mais vantajosas do ponto de vista econômico para os vãos de dimensões elevadas, além do gasto inferior de material e a facilidade de manuseio dessas vigas que atingiram no máximo 3 m de altura, em detrimento das vigas em concreto armado com 5 m de altura, pouco usuais do ponto de vista técnico, apresentando dificuldades em seu manuseio, transporte e colocação. Ressalta-se que estas dificuldades apresentadas impactam diretamento no custo de execução da obra e que estas características não foram levadas em conta neste estudo.

Conclusões

Com o desenvolvimento do presente trabalho, foi possível analisar comparativamente duas soluções estruturais bastante utilizadas na engenharia que apresentam vantagens e desvantagens em sua aplicação.

As vigas pré-moldadas em concreto armado possuem bom custo benefício nos vãos de pequena extensão, tendo vantagem financeira em seu uso sobre o concreto protendido até o vão de 50 m, ainda que apresentem consumo de material superior aos casos protendidos.

No entanto a partir dos vãos de 40 m, o concreto armado apresenta alturas superiores às vigas máximas em concreto protendido, o que pode limitar seu uso do ponto de vista funcional e operacional.

Já as vigas em concreto protendido possuem pequenas alturas se comparadas as de concreto armado, além de um consumo de material inferior sendo, no entanto, caras para os vãos menores. Sua aplicação passa a ser totalmente vantajosa, tanto técnica quanto financeiramente a partir de grandes vãos, quando a tecnologia da protensão supera o

concreto tradicional apenas com armadura passiva, sendo condizente com a literatura a respeito de pontes protendidas.

Cabe ressaltar que não existe uma tecnologia certa ou errada, dependendo de cada caso e da análise dos profissionais responsáveis, por projetarem e escolherem qual a técnica mais indicada para a situação que se apresenta.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 1980.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Força devido ao vento em edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de pontes em concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

BELGO MINEIRA, Catálogos. Fios e cordoalhas para concreto protendido. São Paulo, Bekaert Trefilarias, 1997.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. Concreto protendido: teoria e prática. São Paulo: PINI, 2013.

DIAS, R. C. O. Automatização do processo de dimensionamento de vigas protendidas. Revista Cognitio, Lins-SP, n.1, p 192 – 207, 2014.

DNIT. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Normas para o projeto de estradas de rodagem. Rio de Janeiro: Serviço de publicações, 1973.

DNIT. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Planilhas do Sistema de Custos referenciais de Obras - SICRO. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sudeste/rio-de-janeiro/2017/setembro/setembro-2017. Acesso em 25/02/2018.

LEONHARDT, F. Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. v. 6.

PFEIL, W. Concreto protendido. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.

PFEIL, W. Pontes em concreto armado: elementos de projeto, solicitações, dimensionamento. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.