



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Dimensionamento e Análise Comparativa de uma Viga Biapoiada em Concreto Protendido de uma Ponte Rodoviária

Rafaella Possamai Spessatto¹, Bruna Manica Lazzari², Paula Manica Lazzari³

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul / Departamento de Engenharia Civil /
rafaellaspessatto@outlook.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul / Departamento de
Engenharia Civil / bruna.ml@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Departamento de Engenharia Civil / p.manica.lazzari@gmail.com

Resumo

O artigo apresenta uma análise comparativa através da utilização de estruturas em concreto protendido com aderência inicial e pré-tração, variando o nível de protensão, em longarinas isostáticas de Obras de Arte Especiais. A ponte em estudo é do tipo ponte em viga, caracterizada por duas longarinas de concreto protendido apoiadas em pilares. A utilização da protensão é vantajosa em razão da sua capacidade de diminuição de fissuras e pela sua eficiência em projetar peças mais esbeltas e com consumo consciente de materiais com elevada resistência. O dimensionamento foi realizado obtendo os esforços atuantes na viga com o auxílio do FTool e utilizando uma planilha eletrônica automatizada no *software* Excel, elaborada através das formulações das normas brasileiras NBR 6118 (2014), NBR 7187 (2003), NBR 7188 (2013) e NBR 8681 (2003). Foram considerados os modelos de concreto protendido, com protensão completa e limitada, permitindo a verificação nos estados limites de serviço e estados limites últimos. O objetivo do trabalho foi analisar o comportamento dos sistemas estruturais, investigando a influência dos carregamentos permanentes e móveis e avaliando as perdas instantâneas e imediatas, através das propriedades geométricas, das características dos materiais e da variação do tempo de aplicação da força de protensão. Através do cálculo das áreas de armadura passiva e ativa para resistirem aos esforços cortantes e momentos fletores atuantes na viga, verificou-se que a planilha de dimensionamento utilizada é adequada para a verificação dos estados limites e para determinar que a protensão limitada se mostrou mais eficiente.

Palavras-chave

Concreto protendido; protensão; análise estrutural.

Introdução

Os projetos e a execução de Obras de Arte Especiais no Brasil são de estimado valor para o desenvolvimento da economia e da população, através do alívio do fluxo de automóveis das grandes cidades e das interligações entre as regiões, viabilizando o transporte de cargas e pessoas. Perante essa importância, ao longo dos anos, as pontes rodoviárias, principais estruturas utilizadas para vencer vãos sobre leitos de água, contribuíram para o desenvolvimento da engenharia civil através de soluções inovadoras e desenvolvimento de novos materiais e sistemas construtivos (ELLER, 2011). Assim, o concreto armado convencional se tornou uma alternativa para o avanço da engenharia. Porém quando se torna inviável a execução de uma estrutura com esse material, a protensão é uma alternativa utilizada.

Segundo Pfeil (1984), o conceito de protensão pode ser definido como “o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações”. Atualmente, o uso do concreto protendido em obras de infraestrutura está se popularizando, devido ao seu poder de vencer maiores vãos, melhorar o controle de abertura de fissuras no concreto e proporcionar rapidez na execução, devido a grande maioria das peças serem produzidas em canteiros de pré-moldados.

As estruturas protendidas, segundo Veríssimo e César (1998), são dimensionadas para o Estado Limite de Serviço (ELS) relativos à fissuração e classificadas, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme a intensidade da aplicação da força de protensão. O nível de protensão, por sua vez, define a proporção de armadura ativa em relação à armadura passiva, e, desta forma, tem relação direta com o custo final da peça. Assim, a utilização da protensão assegura resultados satisfatórios no desempenho das estruturas, perante as cargas elevadas que são encontradas nas pontes rodoviárias.

Logo, esse trabalho visa apresentar um estudo comparativo entre vigas biapoiadas de uma ponte rodoviária em concreto protendido, utilizando dois diferentes níveis de protensão. No presente artigo, foi possível realizar uma análise estrutural por meio da variação da força de protensão e da verificação dos Estados Limites de Serviço (ELS) e Estados Limites Últimos (ELU). Os carregamentos móveis da ponte rodoviária foram determinados analiticamente através do sistema de linhas de influência, resultando na envoltória final de carregamentos suportados pelas vigas.

Para a análise e o dimensionamento do presente trabalho, algumas normas devem ser seguidas, para garantir a segurança estrutural da estrutura. A NBR 6118 (ABNT, 2014) é responsável por determinar os procedimentos utilizados nos projetos de estruturas em concreto armado e protendido. Já a NBR 7187 (ABNT, 2003) disserta sobre o aparecimento de esforços nos elementos estruturais através da aplicação dos mesmos. Com isso, a NBR 8681 (ABNT, 2003) possibilita a classificação das ações em permanentes, variáveis ou excepcionais, sendo definidas por meio das linhas de influência. Por fim, a NBR 7188 (ABNT, 2013) uniformiza os valores das cargas móveis atuantes em pontes rodoviárias.

Estrutura analisada

A ponte rodoviária analisada no estudo é do tipo ponte em viga e apresenta duas vigas isostáticas biapoiadas, executadas em concreto protendido pré-moldado. Esse tipo de sistema estrutural é caracterizado por vigas apoiadas em pilares que descarregam seus esforços em fundações, conectadas diretamente ao solo. A longarina escolhida para o estudo possui 25,70 m de comprimento (L) e um volume teórico (V) de 28,20 m³. A estrutura conta com duas faixas de rolamento e duas faixas de passeio, totalizando uma largura de 11,30 m, conforme figura 1.

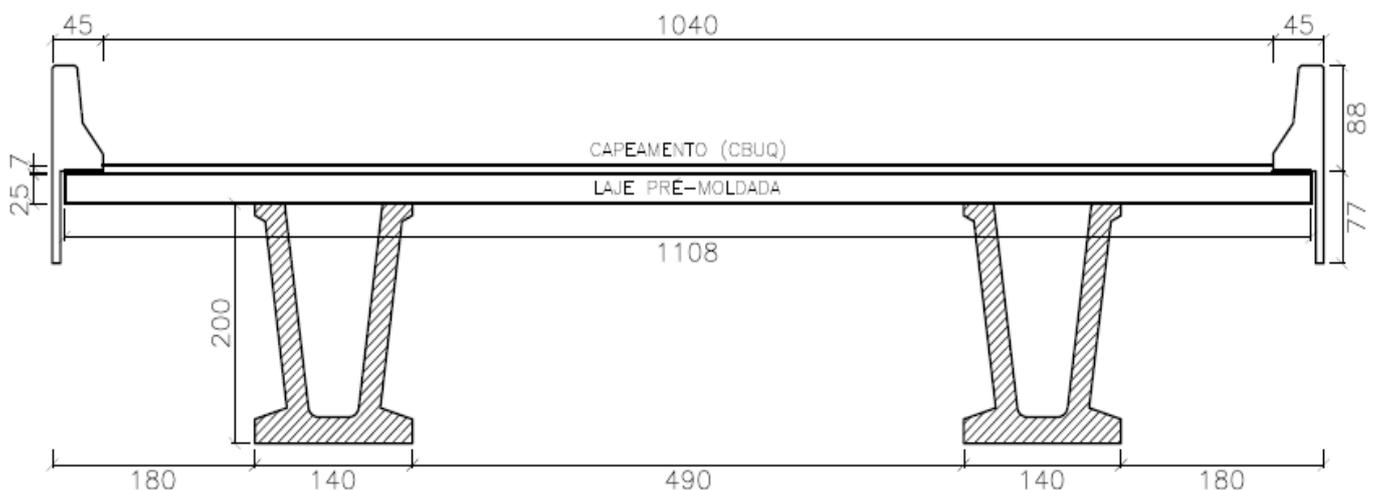


Figura 1 - Seção transversal da ponte rodoviária (cm).

No projeto original, as vigas apresentam as seguintes características: resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) de 45 MPa e aço CP 190-RB de diâmetro 15,2 mm. A seção da viga é em formato de “V” (figura 2) e apresenta suas propriedades geométricas na tabela 1.

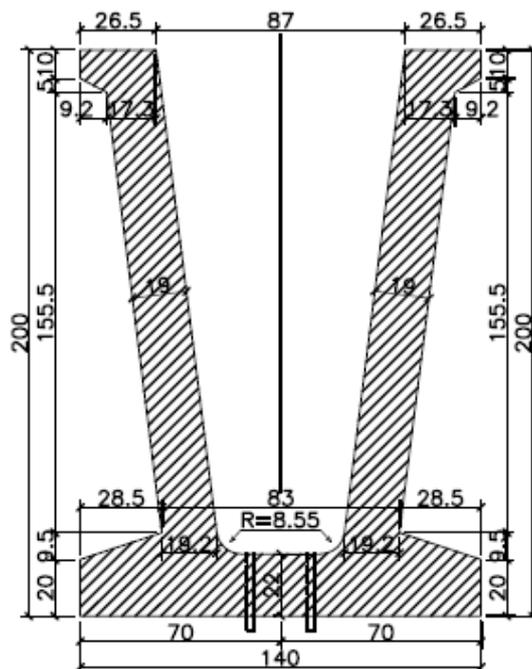


Figura 2 - Seção transversal da longarina protendida (cm).

Tabela 1 - Propriedades geométricas do projeto original da seção transversal da viga.

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO DO PROJETO					
Seção	Base (cm)	Altura (cm)	A_i (cm ²)	y_i (cm ²)	I (cm ⁴)
"V"	140	200	10.293	81,13	42.529.976,63

Para o dimensionamento elaborado nesse estudo, a análise foi realizada de forma analítica a partir de uma simplificação da seção “V”, adotando geometria retangular. Para tanto, foi calculado a área (A_i) e o momento de inércia (I) da seção originalmente projetada, e com base nessas propriedades, foi proposta uma nova geometria para a viga em estudo, adotando as propriedades da tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades geométricas da seção transversal da viga em estudo.

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO ADOTADA					
Seção	Base (cm)	Altura (cm)	A_i (cm ²)	y_i (cm ²)	I (cm ⁴)
Retangular	100	200	20000	100	66666666,67

Começou-se determinando o carregamento total devido as cargas permanentes atuantes na estrutura, oriundos do peso próprio das lajes pré-moldadas, do capeamento de CBUQ e dos guarda-rodas de cada passeio da viga. Após, foi realizada a determinação das cargas móveis, calculadas através das preconizações da NBR 7188, utilizando o trem-tipo TB 450 e o posicionado no local onde exercerá maior esforço na estrutura.

Com esses resultados, foi possível determinar os esforços cortantes e o momento fletor máximo atuante na viga, através do método das linhas de influência. Segundo a NBR 7187 (ABNT, 2003), foram consideradas duas combinações de carga para a determinação dos esforços, sendo que a primeira considera a carga permanente da estrutura e a segunda apresenta a carga permanente da ponte rodoviária com os carregamentos móveis. Dessa forma, e com o auxílio do *software* FTool, determinou-se os esforços atuantes na viga em estudo.

Modelo de cálculo

A metodologia adotada para o dimensionamento da longarina em concreto protendido foi a proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014), em que se verifica as forças de protensão da estrutura para o Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU). Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2001), é importante que a análise seja realizada no Estádio III, pois assim a armadura de flexão é calculada por meio do estado limite de ruína, permitindo à estrutura resistir aos esforços de forma econômica. Portanto, elaborou-se uma planilha eletrônica no *software* Excel para o desenvolvimento de cada etapa da análise e dimensionamento.

Para a sua utilização, primeiro é realizado o cálculo das propriedades geométricas da peça, através da informação da geometria da viga que será estudada. Após, entra-se na planilha com os dados relacionados às propriedades dos materiais aço e concreto. Para o concreto, é informado o cimento e o agregado utilizado na composição, além da sua resistência característica à compressão (f_{ck}). Para o aço ativo, de relaxação baixa (RB), deve-se informar a resistência característica à ruptura por tração (f_{ptk}), tensão de escoamento convencional (f_{pyk}), o módulo de elasticidade (E_s) e a área de armaduras de protensão (A_{pi}). Já para o aço passivo, é preciso conhecer a tensão de escoamento característica do aço (f_{yk}). Além disso, é necessário conhecer o cobrimento nominal das armaduras (c), os fatores de combinações de ações (Ψ_1 e Ψ_2) e os momentos obtidos pelos carregamentos permanentes e móveis.

Para o ELS e com as informações já disponibilizadas, foi possível encontrar o valor das forças de protensão mínima e máxima, possibilitando dimensionar o número de cordoalhas necessárias para atender aos esforços atuantes na estrutura. No passo seguinte, são calculadas as perdas de protensão, através da verificação do rendimento. Para as perdas instantâneas, ele foi verificado somente pela deformação por encurtamento elástico do concreto. E para as perdas progressivas, foram calculados os coeficientes de retração e fluência do concreto e a relaxação do aço.

Por último, são feitas as verificações para o ELU, determinando a posição da linha neutra. Assim, permite-se verificar a necessidade ou não da utilização de armadura passiva na peça estrutural.

Entrada de Dados

Nesta etapa foi adotado o concreto com resistência a compressão de 45 MPa, cimento CP V-ARI com abatimento entre 5 e 9 cm e considerando o basalto como agregado graúdo ($\alpha_E = 1,2$) com coeficiente s igual a 0,20. A estrutura apresenta também Classe de Agressividade Ambiental II, em ambiente com umidade relativa de 90% e temperatura média do mesmo como sendo 20°C, sabendo-se que a estrutura será executada na cidade de Porto Alegre.

Outros fatores que influenciam no cálculo estão relacionados as armaduras passivas e ativas utilizadas na peça. Para a armadura passiva, foi utilizado aço CA-50, de $f_{yk} = 500$ MPa. Já para a armadura ativa, considerou-se cordoalhas CP 190-RB de diâmetro 15,2 mm, com resistência característica a tração de 190 kN/cm² e tensão de escoamento de 171 kN/cm².

Foi aplicado um sistema de pré-tração com aderência inicial, considerando um tempo de 3 dias desde que a força de protensão foi aplicada até o posterior corte dos cabos, permitindo a transmissão da força de protensão dos cabos para o concreto. Para as cargas atuantes na longarina e utilizando o método das linhas de influência, dividiu-se a viga em 14 seções, permitindo determinar os esforços através do *software* FTool. Assim, foi considerado que o momento referente aos carregamentos permanentes, devido ao peso próprio da estrutura, equivale a 8.057 kN.m e para as cargas variáveis vale 6.240 kN.m, conforme a figura 3.

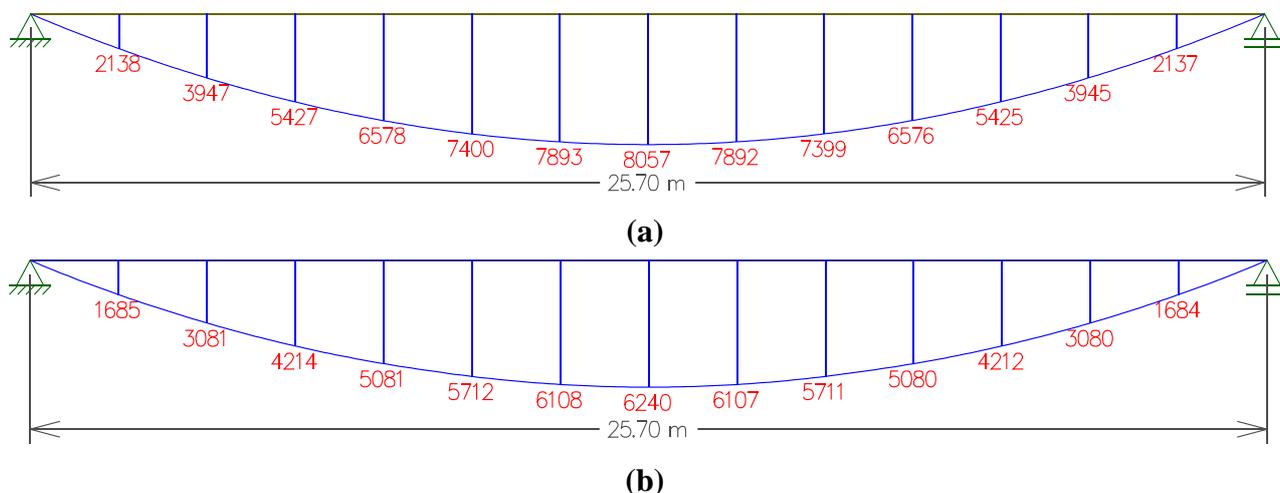


Figura 3 - Envoltória do diagrama de momentos fletores, sem a majoração de esforços, devido: a) ao peso próprio; b) às cargas móveis.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que os níveis de protensão estão relacionados com a classe de agressividade ambiental e com os principais estados limites de serviço relativos à fissuração. O estado limite de descompressão (ELS-D) apresenta tensão normal nula em um ou mais pontos da seção transversal, não admitindo tensão de tração no restante da seção. No estado limite de formação de fissuras (ELS-F), as fissuras ocorrem por meio das solicitações na estrutura, até que elas atinjam o valor limite da resistência à tração na flexão do concreto. Assim, na primeira análise da viga, em que foi submetida a protensão completa, é possível notar a necessidade de verificação da mesma para uma combinação rara (ELS-F) e uma frequente (ELS-D). Já na viga submetida a protensão limitada, verifica-se a longarina para uma combinação frequente (ELS-F) e uma combinação quase permanente (ELS-D).

Resultados

Com os dados de entrada e com as variadas propostas de dimensionamento realizadas na planilha, substituindo as dimensões de base e altura da viga, foi possível obter os melhores resultados da performance da longarina, obtendo valores coerentes com o retratado em projeto e apresentando uma solução benéfica para as diferentes intensidades de protensão. Da mesma forma, pretendeu-se estabelecer a menor quantidade de cordoalhas, subdivididas em menos camadas possíveis, para assim, aumentar a excentricidade da armadura ativa. Na tabela 3 são apresentados os principais resultados obtidos.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 3 – Resultados encontrados utilizando os dois níveis de protensão.

	PROTENSÃO COMPLETA	PROTENSÃO LIMITADA
Base (b_w) =	100 cm	100 cm
Altura (h) =	200 cm	200 cm
e_p =	83,3 cm	84,6 cm
P_0 mínimo =	13.596,73 kN	10.263,79 kN
P_0 máximo =	15.264,13 kN	14.543,01 kN
Número de cordoalhas =	67 cordoalhas	51 cordoalhas
Quantidade de camadas =	4 camadas	3 camadas
Área das cordoalhas =	93,80 cm ²	71,40 cm ²
Armadura de flexão =	45,63 cm ²	45,63 cm ²
Detalhamento =	10 Ø 25	10 Ø 25
nº camadas =	1 camada	1 camada
Armadura de pele =	5 cm ² /face	5 cm ² /face
Detalhamento =	11 Ø 8	11 Ø 8
Armadura de cisalhamento =	13,57 cm ² /m	13,57 cm ² /m
Detalhamento =	Ø 10 c/ 11	Ø 10 c/ 11
Perdas instantâneas =	0,9271	0,9423
Perdas progressivas =	0,7983	0,8275

Com os dados obtidos acima, é possível concluir que será imposto a aplicação de uma carga mínima de protensão de 13.596,73 kN na viga com protensão completa e 10.263,79 kN na viga com protensão limitada, sendo que esses valores determinam a quantidade de cordoalhas adotadas em cada longarina em estudo. Considerando as condições estabelecidas na NBR 6118 (ABNT, 2014) e na literatura utilizada, a força inicial máxima de protensão que pode ser aplicada na peça é de 15.264,13 kN para a protensão completa e 14.543,01 kN para a protensão limitada, garantindo que a estrutura não exceda as tensões limites na borda mais tracionada e na borda mais comprimida. E considerando a estrutura no ELS, a intensidade da força no ato da protensão também influencia nas perdas instantâneas e progressivas, pois quanto menor for a força aplicada, menores serão as perdas.

As perdas totais da protensão também são influenciadas pelo efeito da idade do concreto no ato da protensão. Verifica-se que as perdas diminuem conforme a passagem do tempo desde a concretagem da peça até a transferência dos esforços de protensão para a viga. Este fato acontece porque quanto maior for o tempo da cura do concreto, menor será a sua deformação por retração, e conseqüentemente, menor será o coeficiente de fluência. Assim, o concreto alcança o seu módulo de elasticidade final, acarretando em menores perdas progressivas.

A conferência dos resultados para os dois níveis de protensão, completa e limitada, permitiu concluir que ambos apresentaram rendimentos satisfatórios para as condições pré-estabelecidas. Esse fato indica que as vigas em concreto protendido, do ponto de vista econômico, são vantajosas para vãos de grandes dimensões. Elas apresentam facilidade no manuseio das peças, devido a sua esbeltez e menor altura, facilitando a logística e a colocação da estrutura *in loco*.

Porém, foi possível perceber que a protensão limitada se mostrou mais vantajosa que a completa, pois apresenta uma menor quantidade de cordoalhas, possibilitando a redução das dimensões da seção e contribuindo na diminuição do peso total de armadura ativa. É importante ressaltar que as dificuldades encontradas para a execução da obra não foram levadas em consideração no estudo. Na figura 4 é retratado um croqui da viga, com a distribuição das armaduras ativas, passivas, de pele, montagem e dos estribos.

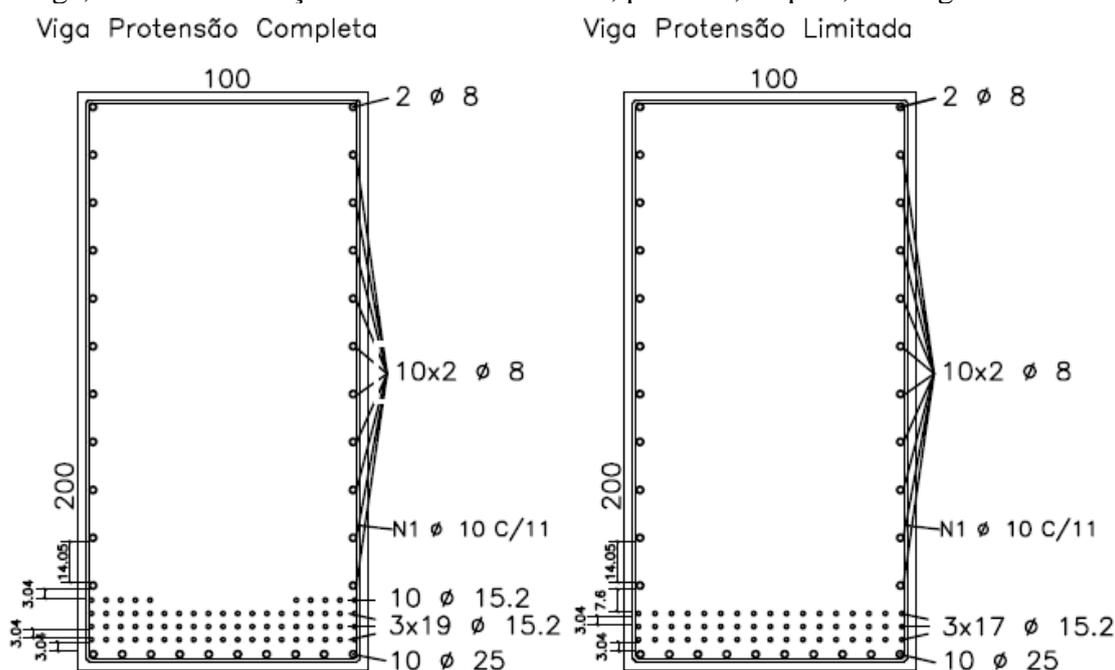


Figura 4 - Croqui da seção transversal das vigas em concreto protendido.

A protensão limitada também apresenta uma maior excentricidade em relação ao centro de gravidade da seção ao centro de gravidade da armadura passiva, que causa uma tensão de tração na borda superior anulada pela tensão de compressão da carga permanente da viga. Logo, uma maior excentricidade da força de protensão resulta em uma diminuição da tensão de compressão no bordo superior da viga, possibilitando um menor custo de armadura de protensão, além da diminuição do peso total de armadura ativa.

A estrutura também foi verificada para o ELU, com o intuito de evitar o colapso ou outra forma de ruína estrutural, para assim não comprometer o seu uso. Dessa forma, calculou-se a capacidade máxima resistente da seção (M_{ud}) e a solicitação máxima dos carregamentos (M_{sd}), sendo que M_{ud} deve ser igual ao maior que M_{sd} . Assim, analisando os resultados da tabela 4, verificou-se que os momentos obtidos satisfazem a condição mínima do ELU.

Tabela 4 - Valores dos momentos limites e últimos.

	PROTENSÃO COMPLETA	PROTENSÃO LIMITADA
$M_{sd} =$	15647,8 kN.m	15647,8 kN.m
$M_{ud} =$	22002,94 kN.m	17540,18 kN.m



Determinados os momentos, garantiu-se a segurança dos carregamentos limites e últimos e foi comprovado que não há a necessidade de se dimensionar armadura passiva em nenhum dos casos analisados. Com isso, foi adotada somente a armadura mínima proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para ambos os casos, em virtude dos mecanismos complementares ao da treliça serem capazes de suportar as forças cortantes atuantes. Isso ocorre por efeito da protensão, que aplica tensões de compressão na estrutura, reduzindo as tensões de tração e diminuindo a necessidade da utilização da armadura transversal.

Deste modo, os resultados indicados mostram que, em referência à quantidade do material aço empregado, a longarina dimensionada em concreto protendido com protensão limitada apresenta um melhor resultado em relação à longarina dimensionada para a protensão completa. Para a armadura passiva longitudinal, os dois níveis de protensão exibiram os mesmos resultados, sendo necessário empregar a armadura mínima, com área de aço de 45,63 cm² e que pode ser solucionada com 22 barras de aço com diâmetro de 25 cm. Já para a armadura ativa, a protensão completa necessita de 93,80 cm² de área de cordoalhas enquanto a limitada utiliza apenas 71,40 cm², apresentando uma redução na quantidade de aço. Em nenhum caso foi considerado a área da armadura transversal, porque em todos se obteve a mesma quantidade de estribos.

Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi o de realizar um dimensionamento e análise de duas propostas de longarinas pré-moldadas em concreto protendido, variando o seu nível de protensão em completa e limitada, e possibilitando comparar os resultados obtidos de forma analítica. A planilha desenvolvida foi capaz de satisfazer as condições estabelecidas nas normas e na literatura, resultando em valores satisfatórios para a verificação nos estados limites de serviço e estados limites últimos, em comparação aos dados já existentes do projeto da ponte em estudo.

Comprovou-se que a protensão limitada é a mais favorável em comparação à quantidade de armadura ativa, apresentando uma redução de 22,88% de cordoalhas em relação à protensão completa. Logo, foi possível concluir que as estruturas em concreto protendido surgiram com o propósito de otimizar o uso de materiais, como aço e concreto, além de contribuírem para uma redução na fissuração das peças, possibilitando uma melhora no seu desempenho estrutural. A principal desvantagem desse tipo de estrutura é um maior grau de dificuldade no dimensionamento, que apresenta diferentes variáveis que afetam o resultado final, além da necessidade de uma tecnologia especial na sua execução, com uma mão-de-obra técnica e especializada.

É importante destacar, como sugestão para pesquisas futuras, otimizar a seção da peça, através da avaliação de outras seções transversais da viga, em formato “I”, “U” ou “T”. Também podem ser analisados os efeitos de outro nível de protensão, ou ainda, comparar a utilização do concreto protendido com o concreto armado. Já para obter resultados mais próximos ao do projeto, é sugerido que a estrutura seja lançada em um programa de elementos finitos, com todas as cargas incidentes na ponte, apresentando valores mais próximos possíveis aos reais.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- _____. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 11p.
- _____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. 2 ed. Rio de Janeiro, 2013. 14p.
- _____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 15 p.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. São Paulo: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2001.
- ELLER, P. M. Pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto para pontes de pequeno porte. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2011.
- PFEIL, W. Concreto Protendido: Introdução. Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984.
- VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JR, K. M. L. Concreto Protendido: fundamentos básicos. 4ª ed. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, 1998.