

---

**PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS EM CONCRETO  
PROTENDIDO**

Lucas Aparecido de Oliveira Santos<sup>1</sup>

Marcos Vinício de Camargo<sup>2</sup>

**RESUMO**

A protensão em elementos de concreto consiste na aplicação de uma força, através de armadura especialmente projetada para este fim, que irá comprimir a peça de maneira contínua. Esse processo é realizado visando a otimização do uso dos materiais envolvidos, principalmente no que diz respeito a capacidade de resistência à compressão do concreto. Almeja-se no presente artigo a abordagem dos principais conceitos relacionados ao dimensionamento de estruturas dessa categoria, seguido da apresentação de uma planilha desenvolvida para auxiliar no dimensionamento de vigas em concreto protendido. O artigo será limitado em vigas isostáticas com protensão de aderência inicial, sendo esta completa ou limitada. Além disso, será possível trabalhar com a alteração da resistência do concreto (entre 25 e 45 MPa), do tipo de aço da armadura passiva e ativa, além das considerações relacionadas às perdas de protensão, estimadas inicialmente em 20%. As verificações serão realizadas visando a flexão do elemento, tanto no Estado Limite de Serviço, como no Estado Limite Último, ambos nas situações de serviço, no estado vazio e no ato da protensão. A necessidade do desenvolvimento dessa ferramenta parte principalmente da quantidade de variáveis envolvidas na atividade e a influência geradas por elas no resultado final após todas as considerações de cálculo, o que tornaria o processo manual exaustivo. Constatou-se que a facilidade resultante das verificações efetuadas pela planilha permite o entendimento mais aprofundado dos conceitos e a influência de cada uma das variáveis relacionadas ao dimensionamento das estruturas protendidas. Por fim, ressalta-se a importância das delimitações no estudo deste tema, tendo em visto sua complexidade e a variedade de possibilidades na adaptação da estrutura no decorrer do processo de dimensionamento.

145

**Palavras-chave:** Protensão. Concreto protendido. Armadura Ativa. Vigas isostáticas com protensão de aderência inicial. Programação de planilha.

---

<sup>1</sup> Graduando no curso de Engenharia Civil – UniFil – Londrina / PR – lucas.aosec@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. Especialista no curso de Engenharia Civil – UniFil – Londrina / PR – marcos.camargo@unifil.br

**ABSTRACT**

The protension in concrete elements consists in the application of a force, through specially designed armor for this purpose, that will compress the piece in a continuous way. This process is carried out in order to optimize the use of the materials involved, especially with respect to the compressive strength of the concrete. The aim of this article is to approach the main concepts related to the dimensioning of structures of this category, followed by the presentation of a worksheet developed to assist in the dimensioning of beams in prestressed concrete. The article will be limited in isostatic beams with initial adhesion pretension, being complete or limited. In addition, it will be possible to work with the change in concrete strength (between 25 and 45 MPa), steel type of the passive and active reinforcement, in addition to the considerations related to the losses of the pretension, initially estimated at 20%. The checks will be carried out aiming at the flexing of the element, both in the Service Limit State Service and in the Ultimate Limit State, both in service situations, in the empty state and in the act of protension. The need for the development of this tool is mainly based on the amount of variables involved in the activity and the influence generated by them on the final result after all calculation considerations, which would make the manual process exhaustive. It was verified that the ease resulting from the verifications carried out by the spreadsheet allows a more in-depth understanding of the concepts and the influence of each one of the variables related to the dimensioning of the prestressed structures. Finally, the importance of the delimitations in the study of this theme is emphasized, considering its complexity and the variety of possibilities in the adaptation of the structure in the course of the dimensioning process.

146

**Keywords:** Protension. Prestressed concrete. Active reinforcement. Isostatic beams with initial adhesion pretension. Worksheet programming.

**INTRODUÇÃO**

Atualmente observa-se que as estruturas em geral são cada vez mais exigidas, seja pelo aumento dos carregamentos ou pela necessidade de vencer maiores vãos, a fim de otimizar a construção e aumentar o espaço útil no interior das edificações tanto residenciais quanto comerciais (CHOLFE; BONILHA, 2016).

Neste viés, a técnica de protensão encaixa-se perfeitamente nas solicitações atuais, ao proporcionar um elemento de concreto com desempenho otimizado em relação ao concreto armado tradicional. Esse processo permite alcançar seções com maior esbeltez e a otimização do uso dos materiais e consiste em tracionar uma armadura ativa posicionada no interior da seção transversal, de uma forma que ela

exerça uma força de compressão sobre o elemento estrutural. Esta pode ser excêntrica ou centrada, tendo cada caso suas particularidades (CARVALHO, 2012).

O dimensionamento de estruturas em concreto protendido é realizado, principalmente, observando as condições de fissuração no elemento e isso tem relação direta com o estágio do concreto. A NBR 6118/2014 apresenta os limites relacionados às fissuras permitidas para os diferentes casos de dimensionamento em concreto protendido. Assim, os métodos de dimensionamento de elementos em concreto protendido se apresentam como processos iterativos pautados em conceitos da resistência dos materiais, que testam hipóteses de combinação entre materiais, tensões e meios de trabalho a fim de se chegar ao melhor resultado para determinadas combinações de cargas.

Além disso, os tipos de protensão ditam como será feito o procedimento descrito acima. Estes dividem-se em protensão de aderência inicial, protensão de aderência posterior, protensão sem aderência e protensão exterior sem aderência. Ademais, a intensidade da protensão também pode ser considerado como um fator classificativo (HANAI, 2005).

147

A partir disso, o uso de softwares que auxiliem na automatização destes processos, conforme o tipo de caso que está sendo estudado o uso de protensão, mostra-se como uma alternativa viável e que aumentará consideravelmente a velocidade de obtenção de resultados ou a escolha da melhor tipologia de protensão.

## **OBJETIVOS**

O objetivo geral do artigo será apresentar a programação de uma planilha que possibilitará o dimensionamento de vigas em concreto protendido com aderência inicial.

Especificamente, os objetivos específicos a serem alcançados são:

- a) Caracterizar os principais conceitos e normas vigentes referentes à protensão de vigas em concreto;
- b) Apresentar uma planilha programada para auxiliar no dimensionamento de vigas de concreto protendido com aderência inicial.

## **JUSTIFICATIVA**

A utilização da protensão em elementos de concreto no canteiro de obras cresce constantemente. Isso deve-se especialmente a otimização que a técnica oferece ao trabalhar com o concreto no estádio I, seguido das vantagens ao resistir à maiores carregamentos com a utilização de seções mais esbeltas (em comparação com o concreto armado), vencer maiores vãos e proporcionar alto desempenho estrutural.

No entanto, o processo de dimensionamento deste tipo de estrutura envolve iterações constantes com várias etapas executadas durante o método de cálculo, o que torna exaustivo o procedimento manual – através de tentativa e erro ou por meio de tabelas – para a otimização de todos aspectos envolvidos em uma estrutura dessa categoria.

Dessa forma, o desenvolvimento de uma planilha para o cálculo de vigas em concreto protendido, com o uso de recursos de programação, automatizaria as iterações necessárias para o dimensionamento destes elementos, proporcionando maneiras otimizadas de verificar como a estrutura reagiria às mudanças em sua geometria, nos materiais utilizados ou na técnica de protensão, por exemplo.

148

## **DELIMITAÇÕES**

O artigo aqui apresentado delimita-se ao desenvolvimento de uma planilha com recursos de programação na linguagem Visual Basic for Applications (VBA) para o dimensionamento de vigas isostáticas de concreto protendido, através de protensão com aderência inicial. Serão considerados concreto com resistência característica entre 25 e 45 MPa, aços específicos para este tipo de operação (barras, cordões ou cordoalhas) e a utilização de traçados de protensão retos. Além disso, as perdas relacionadas à protensão serão estimadas de acordo com as recomendações da bibliografia pertinente e as verificações realizadas na viga estarão ligadas à flexão tanto no Estado Limite de Serviço como no Estado Limite Último, na situação de serviço, de estado vazio e no ato da protensão.

## **PROTENSÃO**

De acordo com Cholfe e Bonilha (2016), nas últimas décadas o avanço da construção civil em termos estruturais foi evidente, principalmente nos exemplos que nos cercam diariamente, como enormes arranha-céus, pontes com grandes vãos, túneis extremamente longos e grandes centros de eventos com estruturas desafiadoras. Isso deve-se essencialmente pelo avanço significativo de três áreas ligadas intrinsecamente à engenharia estrutural: materiais, projetos e procedimentos construtivos.

A pesquisa e o aprimoramento dos materiais existentes, além da criação e consolidação de técnicas construtivas permitem a constante evolução das estruturas envolvidas na construção civil. Esses fatores, aliados às novas ferramentas computacionais que possibilitam a simulação e a análise estrutural, elevam de forma contínua o progresso na otimização do uso da matéria prima em novas construções. Neste viés, a técnica da protensão encaixa-se perfeitamente nas três grandes áreas, tendo em vista que o seu desenvolvimento se deu a partir da necessidade de vencer maiores vãos, com a otimização da estrutura e a criação de materiais de alto desempenho que suportassem os esforços de uma nova magnitude. Além disso, o auxílio de métodos computacionais consolidará tal técnica, devida a grande quantidade de iterações exigidas (CHOLFE; BONILHA, 2016).

O processo de protender uma peça de concreto consiste em aplicar uma tensão de compressão nas suas extremidades, que se dará a partir de uma armadura especialmente projetada para este fim, com o auxílio de técnicas e ferramentas particulares ao caso. O processo é realizado com o objetivo de otimizar diversos pontos das estruturas em concreto armado, como àqueles relacionados à fissuração, espaçamento entre apoios ou geometria da estrutura, por exemplo (HANAI, 2005). Internamente, é possível dividir a protensão em três categorias distintas, sendo elas, protensão com aderência inicial, protensão com aderência posterior e protensão sem aderência. Além disso, existem casos em que é adotada a protensão exterior sem aderência, principalmente em reforços estruturais (CHOLFE; BONILHA, 2016). Outra forma de classificação é o nível de protensão utilizado, e será definido de acordo com a classe de agressividade do ambiente e a aderência utilizada entre o aço da armadura ativa e o concreto, ambos abordados na NBR 6118/2014, em que a protensão completa

se dará quando não existir fissuração na peça, garantindo a proteção total da armadura ativa e passiva, a protensão limitada ocorrerá em situações onde houver a formação de fissuras, mas sem avanço para a fase de abertura e a abertura de fissuras na peça constituirá a protensão parcial.

Os materiais utilizados em uma estrutura protendida devem ser verificados com grande atenção, dada a necessidade do alto desempenho para que suportem os esforços internos e externos que ocorrem de maneira contínua na estrutura. O concreto e o aço utilizados tanto em estruturas de concreto armado, quanto àquelas protendidas possuem representatividade total em estruturas convencionais - sem adição de outras substâncias como isopor e fibras de carbono, por exemplo (CARVALHO, 2012).

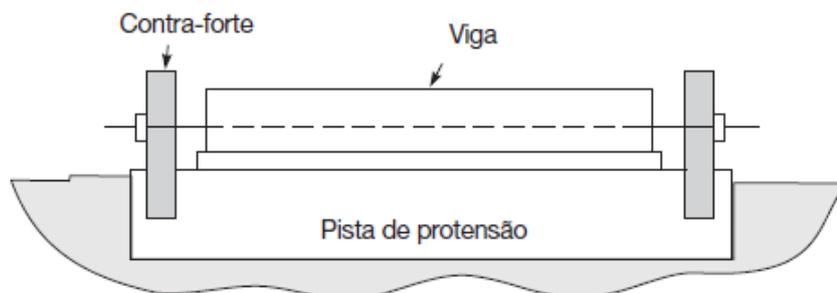
Alguns exemplos de uso do concreto protendido na atualidade acontecem principalmente em elementos pré-moldados, pontes, viadutos, pisos industriais, pista de aeroportos, rodovias e lajes e vigas que necessitem superar grandes vãos.

## **PROTENSÃO COM ADERÊNCIA INICIAL**

150

A protensão com aderência inicial consiste em posicionar a armadura passiva e ativa antes do lançamento do concreto. Essa técnica é amplamente empregada em pistas de protensão. A armadura ativa é posicionada e, em seguida, aplicam-se as tensões de acordo com os esforços previstos em projeto. Após essa etapa, realiza-se o lançamento do concreto no elemento e é aguardada a sua cura até que atinja a resistência adequada, executando-se o corte da armadura ou a liberação da ancoragem no contra-forte, conforme ilustra a figura 1:

**Figura 1 - Protensão com aderência Inicial**



Fonte: (VASCONCELOS; CAUDURO, 2003)

O corte ou a liberação da ancoragem da armadura fará com que o aço retorne ao seu estado original, encurtando-se. No entanto, a aderência adquirida entre o concreto e a armadura impede esse processo, redistribuindo os esforços em toda a viga. Neste tipo de situação, a verificação dos esforços internos do momento da liberação da ancoragem até o momento de uso da estrutura é essencial, tendo em vista que, caso a protensão do aço alcance um valor excessivo, surgirão fissuras na face superior da viga. Ademais, este método é utilizado principalmente em vigas e lajes pré-moldadas (CHOLFE; BONILHA, 2016).

Em relação à tração aplicada no aço, a NBR 6118/2014 limita este valor no item 9.6.1.2.1, onde os valores de tensão máxima  $\sigma_p$  que atuam na armadura ativa não devem superar  $0,77 \times f_{ptk}$  e  $0,90 \times f_{pyk}$  para aços de relaxação normal e  $0,77 \times f_{ptk}$  e  $0,85 \times f_{pyk}$  para aços de relaxação baixa.

## **PERDAS DE PROTENSÃO**

151

A protensão de uma peça de concreto pode ocorrer em vários momentos durante a sua execução ou como forma de reforço em um momento posterior. No entanto, a aplicação das tensões que resultarão na compressão da peça acontece em um período curto de tempo e, após finalizada, permanece sem acréscimos de tensões durante toda sua vida útil.

Dessa forma, mesmo que sejam de caráter permanente, as técnicas utilizadas para a aplicação da protensão estão sujeitas às variações de intensidade ao longo do tempo, causadas a partir de origens específicas ou combinadas. De modo geral, pode-se chamar este efeito de perda de protensão e suas particularidades estarão diretamente ligadas às características de relaxação do aço e a fluência e retração do concreto (CARVALHO, 2012).

Assim, é possível classificar as perdas de protensão em perdas iniciais, perdas imediatas e perdas progressivas. Usualmente a diferença entre as três categorias consiste, essencialmente, no momento em que a perda de tensão na estrutura se inicia e qual a sua duração até a estabilização do efeito (CHOLFE; BONILHA, 2016).

As perdas iniciais de protensão restringem às reduções nas tensões encontradas em estruturas pré-tracionadas, do momento em que a armadura é lançada e estirada, até

o momento em que ocorre a liberação dos dispositivos de tração, após a cura do concreto (HANAI, 2005).

As perdas relacionadas na categoria imediata são fenômenos causados aos elementos protendidos a partir do momento em que ocorre a transferência da força de protensão para a seção do concreto (CHOLFE; BONILHA, 2016) e são consequências diretas das propriedades elásticas do aço e do concreto (CARVALHO, 2012). Os efeitos finais irão variar de acordo com o sistema de protensão utilizado.

Por fim, as chamadas perdas progressivas são aquelas que ocorrem na protensão ao longo de anos de utilização da estrutura (CHOLFE; BONILHA, 2016). Carvalho (2012), cita cada uma das perdas progressivas, salientando a origem do fenômeno e quais são as causas para cada elemento que estrutura o concreto protendido, conforme o quadro 1:

**Quadro 1** - Efeito reológicos do concreto e do aço

Fenômeno	Atuação-origem	Causa	Efeito no concreto	Efeito no aço
Retração	Concreto	Variação do volume	Encurtamento	Perda de tensão
Fluência	Concreto	Tensão permanente	Encurtamento	Perda de tensão
Relaxação	Aço	Deformação permanente	-	Perda de tensão

Fonte: CARVALHO, 2012 (Quadro 5.1, p. 155)

## **DIMENSIONAMENTO – MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES**

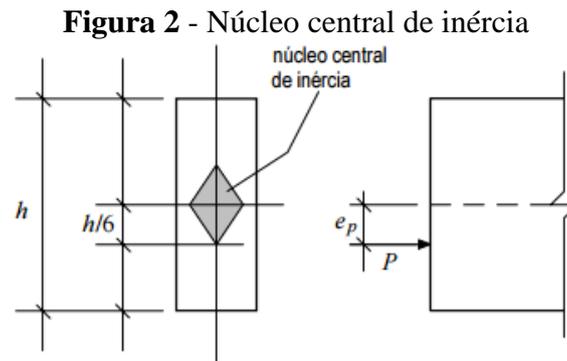
Usualmente o dimensionamento de estrutura de concreto é realizado a partir das limitações do ELU e, em seguida, é verificado se as condições de serviço ELS são satisfeitas. No caso de vigas protendidas, esse processo é invertido, onde são feitas as verificações necessárias para comprovar o desempenho em relação ao ELS e só então que são confirmadas se as condições limitantes do ELU são alcançadas (VERÍSSIMO et al., 1999a). Isso ocorre tendo em vista que os elementos protendidos estão sujeitos a diversas tensões internas que podem levar à formação de fissuras. Estas devem ser impedidas ou limitadas neste tipo de estrutura e, após a verificação desta particularidade, as vigas serão analisadas conforme as recomendações normativas do ELU.

O estado limite de serviço (ELS) de uma estrutura é definida principalmente de acordo com os aspectos de utilização, durabilidades e aparência dos elementos, ou seja, busca limitar os parâmetros de deformação máxima a fim de que se mantenha o conforto durante o seu uso. A NBR 6118/2014 a partir do item 3.2.1 define cada um dos estados limites de serviço, sendo destacados a seguir àqueles essenciais ao dimensionamento de estruturas de concreto protendido:

- Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F): estado no qual ocorre a formação de fissuras no elemento estrutural devido às solicitações na estrutura alcançarem o valor limite da resistência à tração do concreto na seção transversal.
- Estado-limite de descompressão (ELS-D): estado em que as tensões em um ou mais pontos da seção transversal devem ser nulas ou esforços de compressão.

De acordo com a NBR 6118/2014, o estado limite último (ELU) está relacionado com o colapso ou qualquer outra forma de ruína da estrutura, que comprometa o seu uso de alguma forma. Na situação apresentada neste artigo, estará relacionado entre a capacidade máxima resistente da seção, representada por  $M_{rd}$ , e a solicitação máxima dos carregamento, conforme a combinação última normal e representada por  $M_{sd}$ , em que o primeiro deve igualar ou superar o segundo.

A partir disso, são essenciais conhecimentos que envolvam as fórmulas geométricas que fornecerão os valores da área ( $A$ ), da Inércia ( $I$ ), módulo de resistência ( $W$ ), além das informações para o cálculo dos esforços internos na estrutura ( $M$ ,  $V$ ,  $N$ ) e das tensões ( $\sigma$ ) resultantes destes. No caso do estudo de protensão em vigas, o conceito do núcleo central de inércia é essencial para o entendimento do funcionamento da protensão na seção transversal de concreto.



Fonte: (VERÍSSIMO et al., 1999b)

Conforme o demonstrado na figura 2, o núcleo central de inércia caracteriza-se por uma distância de igual a altura total da viga dividida em seis partes onde, a partir do centro forma-se uma região com  $h/6$  – situação válida em seções retangulares – ou pela relação entre a área da seção e o módulo de resistência ( $A/W$ ). Caso a excentricidade  $e_p$  da protensão posicione-se nessa região, as tensões de tração formadas na face superior serão nulas ou de compressão (CHOLFE; BONILHA, 2016).

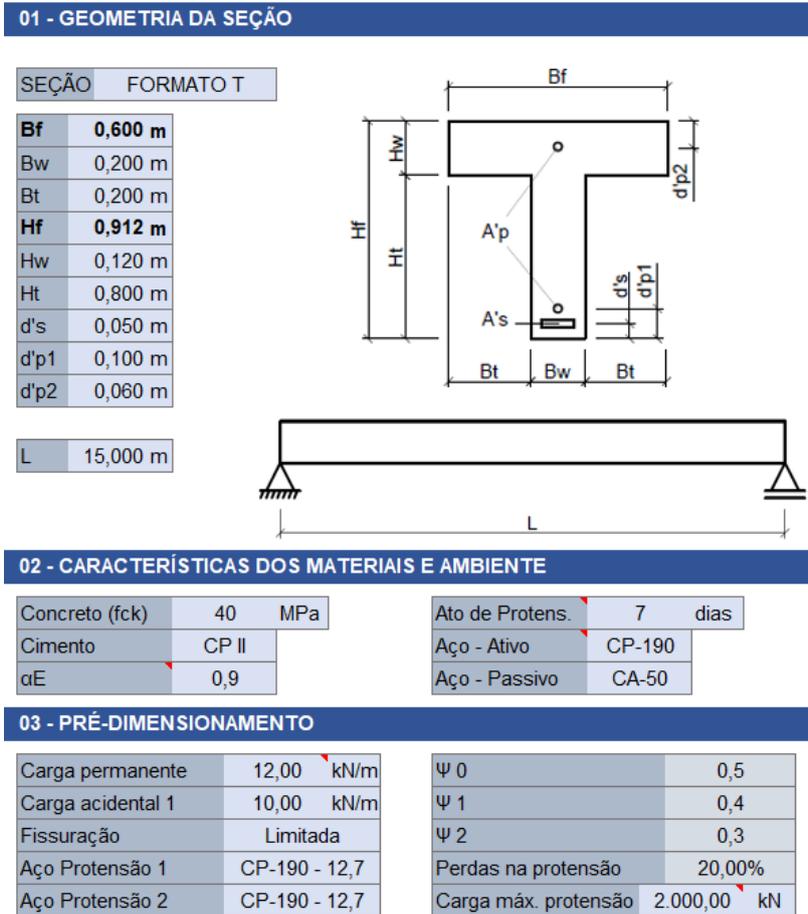
154

Ademais, são necessários os conceitos abordados nas tabelas 11.3 e 11.4 da NBR 6118/2014, responsáveis por definir as combinações de cargas últimas e de serviço pertinentes a cada situação. Tais combinações são essenciais para o dimensionamento de vigas em concreto protendido devido aos estados em que o elemento está sujeito desde a moldagem até o momento de aplicação da protensão e das cargas externas. Esses estados podem ser resumidos no ato da protensão (somente a protensão atua), o estado vazio (protensão atua junto do peso próprio) e o estado de serviço (protensão atua junto do peso próprio e dos carregamentos de serviço).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O dimensionamento inicial de estruturas em concreto protendido com uso da planilha desenvolvida neste artigo pode ser acompanhado no exemplo abaixo, em que será pré-dimensionada uma viga nas delimitações do Estado Limite de Serviço, com seção transversal formato T para as verificações no Estado Limite Último.

**Figura 02** - Entrada de dados na planilha (seção T)



**Fonte:** Elaborada pelo autor

Conforme apresentado na figura 02, na seção 01 devem ser informadas as características geométricas da viga estudada, bem como seu comprimento total. Essa etapa se dá primeiramente partir da seleção do formato da seção (retangular, formato T ou formato I), seguido do preenchimento das células subsequentes.

As características dos materiais utilizados deverão ser informadas na seção 02 e abordarão o  $f_{ck}$  do concreto aos 28 dias, o tipo de cimento utilizado, o parâmetro  $\alpha_E$  (irá variar em função da natureza do agregado, conforme item 8.2.8 da NBR 6118/2014), os aços utilizados na armadura ativa e passiva, além da informação do dia em que será realizada a liberação das ancoragens, momento onde a protensão passará a atuar em conjunto com o concreto.

Na seção 03 será solicitado o preenchimento dos carregamentos (a carga permanente não deve considerar o peso próprio da seção, essa característica é calculada de maneira separada), da classe de protensão, dos coeficientes das combinações de

cargas, da perda estipulada na protensão e das dimensões do aço utilizado na armadura ativa.

Por fim, é preciso informar um valor de “Carga máx. protensão”, que irá equivaler à máxima protensão que poderá ser testada pelo programa de dimensionamento. Este valor pode ser alterado para adequar-se a estrutura.

Em seguida, na figura 03 são apresentados os resultados da planilha.

**Figura 03 - Resultados da planilha (seção T)**

04 - RESULTADOS		
Tipo de protensão	Pré-tração	
Traçado da cordoalha	Reto	
Tensão Máx. concreto	-22,19	MPa
Carga Máx. Protensão 1	1370,00	kN
Carga Máx. Protensão 2	850,00	kN
<b>PROTENSÃO 1</b>		
Características do aço	CP-190 - 12,7 RB	
Quantidade	10	un
Carga máxima por unid.	137,000	kN
Tensão máxima por unid.	1388,045	MPa
<b>PROTENSÃO 2</b>		
Características do aço	CP-190 - 12,7 RB	
Quantidade	6	un
Carga máxima por unid.	141,667	kN
Tensão máxima por unid.	1435,326	MPa
<b>ARMADURA PASSIVA</b>		
Características do aço	CA-50	
Quantidade	1,23	cm <sup>2</sup>
<b>ALONGAMENTO DA ARMADURA</b>		
Protensão 1 - Δε <sub>pi</sub>	6,7531	‰
Protensão 1 - Δε <sub>pd</sub>	5,9258	‰
Protensão 1 - ε <sub>pd</sub>	12,6789	‰
Protensão 1 - ε <sub>pyd</sub>	7,2675	‰
Protensão 2 - Δε <sub>pi</sub>	6,6657	‰
Protensão 2 - Δε <sub>pd</sub>	6,3856	‰
Protensão 2 - ε <sub>pd</sub>	13,0514	‰
Protensão 2 - ε <sub>pyd</sub>	7,2675	‰
Relação x/d	0,3713	
Altura linha neutra	0,3045	m
Altura mínima domínio 3	0,2124	m
Altura máxima domínio 3	0,5153	m

INFORMAÇÕES COMPLEM.	
Tensões no concreto	
Estado de Serviço	
C.Q.P. (face superior): -16,61 MPa	
C.Q.P. (face inferior): -1,43 MPa	
C.F. (face superior): -17,41 MPa	
C.F. (face inferior): -0,88 MPa	
C.R. (face superior): -22,19 MPa	
C.R. (face inferior): 2,45 MPa	
Estado Vazio	
C.Q.P. (face superior): -4,64 MPa	
C.Q.P. (face inferior): -9,75 MPa	
C.F. (face superior): -4,64 MPa	
C.F. (face inferior): -9,75 MPa	
C.R. (face superior): -4,64 MPa	
C.R. (face inferior): -9,75 MPa	
No ato da protensão	
C.Q.P. (face superior): -0,01 MPa	
C.Q.P. (face inferior): -16,21 MPa	
C.F. (face superior): -0,01 MPa	
C.F. (face inferior): -16,21 MPa	
C.R. (face superior): -0,01 MPa	
C.R. (face inferior): -16,21 MPa	
Mrd As: 1094,85 kN.m	
Msd As: 1094,63 kN.m	
Resistência do concreto	
fcd 7 dias: 22,25 MPa	
fcd 28 dias: 28,57 MPa	
fct,m inf 7 dias: 1,91 MPa	
fct,m sup 7 dias: 3,55 MPa	
fct,m inf 28 dias: 2,46 MPa	
fct,m sup 28 dias: 4,56 MPa	
Resistência do aço	
σ <sub>sd</sub> : 434,78 MPa	
σ <sub>p1d</sub> : 1453,5 MPa	
σ <sub>p2d</sub> : 1453,5 MPa	
Encurtamento do concreto	
ε <sub>cd</sub> : 3,5 ‰	

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados apresentados acima permitem concluir que será necessária uma carga máxima de protensão de 1370 kN para a região inferior ou 10 cabos do tipo escolhido e de 850 kN para a região superior ou 6 cabos do tipo definido. As condições de necessárias à protensão limitada foram satisfeitas, conforme a tabela 12.1 da NBR 6118/2014 em que, para a combinação frequente o ELS-F não poderia possuir valores de solicitação à tração que alcançassem a resistência a tração máxima do concreto e, para a combinação quase permanente, o ELS-D não permitiria esforços à tração na estrutura. Observa-se na figura 03, a direita, que todos os esforços atuantes nos 3 estágios da protensão são de compressão, respeitando ambas as delimitações da norma vigente. Além disso, como pôde ser observado,  $M_{rd}$  é superior a  $M_{sd}$  devido a adição de 1,23 cm<sup>2</sup> de aço de armadura passiva, satisfazendo a condição mínima do ELU.

Ressalta-se que é importante verificar a relação  $x/d$  e o se o aço da armadura passiva estará atingindo o escoamento, a fim de se certificar que a seção trabalhe nos domínios 2 ou 3 e os limites normativos estabelecidos sejam respeitados no processo de dimensionamento com verificação da flexão.

Outro ponto importante, para a otimização do dimensionamento, é o campo “Tensão máxima do concreto”. Este informará qual a tensão máxima que concreto estará sujeito e isso possibilitaria a redução do  $f_{ck}$  em situações em que ocorrer o mau aproveitamento da resistência total do concreto, isto é, com solicitações causadas pelo carregamento muito abaixo do que o material poderia resistir.

A planilha informará em seus resultados o valor de  $\varepsilon_{pd}$ , que consiste no alongamento total que o aço deverá sofrer para atingir a carga esperada de protensão. Essa informação pode ser utilizada como mais uma forma de verificar o processo de alongamento da armadura ativa, através da multiplicação deste valor pelo comprimento total da viga. O resultado indicará aproximadamente a quantia que o aço deverá ser esticado em relação ao seu tamanho original.

Caso ocorra uma situação onde não sejam encontrados valores para a protensão 1 e 2 no interior da seção transversal que satisfaçam todas as condições serviço esperadas pelos parâmetros normativos, será solicitado ao usuário a alteração das variáveis para uma nova tentativa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas, de maneira geral, sempre apresentaram uma grande complexidade no seu dimensionamento, principalmente devido ao número elevado de variáveis envolvidas, seja na escolha dos materiais ou ao definir a geometria da seção, além dos limites normativos estabelecidos, que podem sofrer alterações conforme a região e o ambiente em que a estrutura será executada.

Neste viés, uma das categorias estruturais que busca de maneira constante a otimização do uso dos materiais e tema deste artigo, são as estruturas em concreto protendido. Esta divide-se ainda em diversas categorias, que podem variar conforme o momento em que ocorre a aderência entre os materiais envolvidos (aderência inicial ou posterior), se existe ou não aderência entre esses materiais e em relação ao nível de protensão (completa, limitada ou parcial), que diz respeito às fissuras que serão permitidas na estrutura final.

A técnica consiste essencialmente em comprimir o elemento de concreto, a fim de que este passe a trabalhar constantemente com sua característica mais marcante, a resistência a compressão. Para isso, são utilizados aços especiais em seu interior que resistam ao longo do tempo às grandes tensões aplicadas, conhecidos como aços de relaxação baixa.

No entanto, a localização, bem como a intensidade deste esforço no interior da seção transversal do elemento protendido influenciará de maneira decisiva no desempenho estrutural, favorecendo sua durabilidade e estabilidade ou levando-o à ruína prematura, ainda na fase de execução. Isso ocorre pois, as tensões geradas internamente podem superar às resistidas pelo concreto, sejam elas esforços de compressão ou tração.

Assim, é evidente que a otimização deste tipo de estrutura resulta em um processo de cálculo exaustivo, tendo em vista o grande número de variáveis definidas na fase inicial de dimensionamento, que afetam de maneira decisiva o resultado final. Como exemplo é possível citar a excentricidade da armadura ativa em relação ao centro de gravidade da seção transversal, que é escolhida antes do início do procedimento de cálculo, porém influencia constantemente nas tensões geradas internamente e que deverão ser resistidas pelo concreto. Caso a excentricidade definida não se adeque à

estrutura, esta deverá ser alterada, e grande parte dos cálculos exigiriam uma nova resolução, devido a alteração dos valores.

Portanto, estabelecer uma rotina de programação que auxilie nas verificações e a encontrar os valores mais adequados para as estruturas em concreto protendido torna-se essencial neste tipo de dimensionamento.

A automatização das verificações era o objetivo inicial deste artigo e provou-se como uma excelente ferramenta para auxiliar no dimensionamento. Isso é exemplificado em situações de cálculos manuais, onde os valores adotados inicialmente não alcancem a resistência estipulada em norma para a estrutura, e as variáveis devem ser alteradas repetidamente, até que as condições sejam satisfeitas, exigindo que a maioria dos cálculos sejam refeitas. No entanto, isso não acontece na planilha, onde o processo se resume na entrada de dados e a verificação dos resultados. Caso haja irregularidades, o procedimento para testar uma nova configuração da seção transversal da estrutura é facilitado.

Além disso, a possibilidade de testar as variações resultantes da alteração de uma única variável na estrutura auxilia de maneira decisiva no entendimento e compreensão dos conceitos envolvidos na protensão de elementos, posto que é visível a intensidade da influência dela para determinadas situações estruturais.

As dificuldades encontradas no decorrer do trabalho, relacionaram-se principalmente ao funcionamento da planilha. Sucedeu-se dessa forma posto as diversas variáveis envolvidas no dimensionamento de estruturas protendidas e sua influência no resultado final, isto é, em dado momento a planilha apresentava erros de funcionamento e a quantidade de variáveis envolvidas impossibilitava a agilidade em encontrar os problemas. Tais situações acabaram por ser contornadas a partir da delimitação do tema, partindo da conclusão do funcionamento de casos mais simples para os mais complexos.

Deste modo, conclui-se que o desenvolvimento dos objetivos definidos inicialmente resultou em uma ferramenta que poderá ser útil para o pré-dimensionamento de vigas em concreto protendido, além de todo o conhecimento adquirido até chegar neste ponto, que proporcionou um enriquecimento sem igual em relação à protensão de elementos de concreto.

Sugere-se, para trabalhos futuros envolvendo este tema, definir inicialmente situações específicas que podem auxiliar no desenvolvimento final, isto é, o foco em um

tipo de estrutura auxiliará no entendimento inicial dos conceitos de protensão e proporcionará um esboço do que deve ser contido no trabalho final. A partir disso, é possível continuar a expandir o trabalho para novas situações na área de protensão. Exemplificando-se nesta programação, foi abordado inicialmente uma seção retangular para a pré-tração completa ou limitada e, após a conclusão desta etapa, foram abordados outros tipos de seção e que poderiam continuar em outros tipos de protensão ou em um tratamento diferente para as perdas de protensão, em uma possível continuação do trabalho.

### REFERÊNCIAS

- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido**: Pré-tração, Pós-tração, Cálculo e Detalhamento. São Paulo: Pini, 2012.
- CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto Protendido**: Teoria e Prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 2016.
- CICHINELLI, G. **Como fiscalizar protensões em tabuleiros de pontes**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/19/artigo267610-2.aspx>>. Acesso em: 1 jun. 2017.
- HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos, 2005.
- RUDLOFF. **Catálogo Rudloff de concreto protendido**. Disponível em: <[http://www.rudloff.com.br/downloads/catalogo\\_concreto\\_protendido\\_rev-06.pdf](http://www.rudloff.com.br/downloads/catalogo_concreto_protendido_rev-06.pdf)>. Acesso em: 14 maio. 2017.
- VASCONCELOS, A. C. DE; CAUDURO, E. L. **Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas**. 2. ed.. [S.l: s.n.], [2011?].
- VERÍSSIMO, G. DE S. et al. **Concreto protendido**: Fundamentos Básicos. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999a.
- VERÍSSIMO, G. DE S. et al. **Concreto Protendido**: Perdas de protensão. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999b.
- VERÍSSIMO, G. DE S. et al. **Concreto protendido**: Estados Limites. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999c.