

ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS EM VIGAS DE COBERTURA PRÉ-TRACIONADAS E PÓS-TRACIONADAS NÃO ADERENTES EM UM ARMAZÉM DE FERTILIZANTES

Fabricius Eduardo Danieli Fritsch¹

¹ Uffpr/ IDD/ Projetista estrutural/ fabriciusfritsch@gmail.com.

Fábio Albino de Souza²

² Unicamp / IDD/ EBPX / Departamento de Estruturas – DES / fabio@ebpx.com.br

Resumo

Na indústria de fertilizantes a utilização de vigas protendidas de cobertura são recorrentes pelo fato das baias de armazenamento do produto fertilizante possuírem vãos de 10 a 20 metros, além de ser um ambiente agressivo onde concreto armado fissurado possui uma baixa durabilidade. Com isso a temática principal deste trabalho constitui-se em uma análise técnica e econômica entre vigas com sistema de pré-tração e pós-tração não aderente, através de um estudo de caso utilizando o software comercial VPRO®. Assim foram modeladas duas vigas com mesma seção I e vão de 19,98 metros para os dois sistemas protendidos propostos, a fim de atender a exigências da NBR 6118:2014 a fissuração e extrair os quantitativos de concreto, aço e fôrmas. Por fim verificou-se os resultados das tensões nas vigas. No geral, utilizando-se de protensão completa em ambos os sistemas, para as combinações rara e frequente as fibras inferiores e superiores das vigas apresentaram apenas tensão de compressão e não há fissuração. No ato da protensão a viga com pré-tração apresentou uma pequena tração de 0,69 MPa, estando dentro do limite de 3,16 MPa da NBR 6118:2014. Com os quantitativos de materiais se elaborou orçamento para visualizar o custo de cada viga, sendo o sistema com pré-tração 15,65% mais econômico. Ao final deste estudo mesmo com a viga pré-tracionada tendo um custo menor de produção, considerou-se a viga com pós-tração não aderente uma solução viável já que a mesma atingiu as exigências da NBR 6118:2014, não depende de transporte até a obra e não exige um alto investimento financeiro inicial.

Abstract

In the fertilizer industry, the use of prestressed roof beams is recurrent due to the fact that the storage bays for the fertilizer product have spans of 10 to 20 meters, in addition to being an aggressive environment where cracked reinforced concrete has a low durability. Thus, the main theme of this work is a technical and economic analysis between beams with a non-adherent pre-tension and post-tension system, through a case study using the commercial software VPRO®. Thus, two beams with the same section I were modeled and span 19.98 meters for the two proposed prestressed systems, in order to meet the requirements of NBR 6118: 2014 for cracking and extract the quantities of concrete, steel and formwork. Finally, the results of the stresses in the beams were verified. In general, using complete prestressing in both systems, for the rare and frequent combinations, the lower and upper fibers of the beams showed only compression tension and there is no cracking. During prestressing, the beam with pre-tension showed a small tension of 0.69 MPa, being within the limit of 3.16 MPa of NBR 6118: 2014. With the quantitative of materials, a budget was elaborated to visualize the cost of each beam, being the system with pre-tension 15.65% more economical. At the end of this study, even with the pre-tensioned beam having a lower production cost, the beam with non-adherent post-tension was considered a viable solution since it reached the requirements of NBR 6118: 2014, it does not depend on transport until work and does not require a high initial financial investment.

Introdução

Atualmente nos deparamos com uma arquitetura cada vez mais ousada, exigindo estruturas esbeltas e com grandes vãos, trazendo para a engenharia a necessidade de cada vez mais utilizar elementos estruturais protendidos. A temática principal deste trabalho é comparar técnica e economicamente duas vigas de cobertura de um armazém de fertilizantes, uma no sistema de pré-tração e outra com pós-tração não aderente, onde o vão da baia de armazenamento possui 20 metros de vão e está em contato direto com produto fertilizante, classificando o ambiente como agressivo e trazendo problemas de durabilidade em estruturas fissuradas. Essa comparação surgiu após levantarmos questionamentos sobre a eficiência das vigas pré-tracionadas no emprego destas edificações, onde podemos verificar que as cordoalhas nuas ficavam expostas nas extremidades da viga pela forma em que as mesmas são cortadas no sistema de pré-tração, causando preocupações com a corrosão, além de altos custos de transporte até as obras que geralmente são em regiões agrícolas afastadas.

Fundamentação Teórica

Concreto protendido com aderência inicial (pré-tração):

As cordoalhas e fios são tracionadas antes do lançamento do concreto, sendo esta força suportada por estruturas colocadas nas extremidades (cabeceiras e contrafortes). Posteriormente o concreto é lançado, envolvendo os fios e/ou cordoalhas nuas, assim que o concreto atingir cerca de 75% da resistência especificada, as cordoalhas são cortadas das cabeceiras, transferindo a força de protensão para os elementos estruturais através de aderência efetiva concreto/ aço de protensão. (ALBINO, 2018)

Concreto protendido sem aderência (pós-tração):

O aço de protensão é posicionado nos elementos estruturais e é feito o lançamento do concreto, quando o mesmo atingir 75% da resistência especificada, as cordoalhas são tracionadas. Nesse sistema a cordoalha possui uma envoltória de graxa e revestimento em PEAD (polietileno de alta densidade) extrudado diretamente sobre a cordoalha já engraxada em toda sua extensão, fazendo com que o concreto não tenha aderência com as cordoalhas. Desta forma a força de protensão se mantém confinada no concreto através de placas de ancoragem de ferro fundido localizada nas extremidades. (ALBINO, 2018)

Perdas:

Em geral, as perdas de força nos cabos de protensão são separadas em imediatas e progressivas, de modo a identificar seus efeitos ao longo do tempo.

Perdas imediatas: atrito entre o cabo e bainha durante a protensão (somente pós-tração), retração do cabo na acomodação da ancoragem, encurtamento elástico do concreto.

Perdas progressivas: retração do concreto, fluência do concreto e relaxação do aço de protensão.

Quando é feito o cálculo de um elemento protendido é levado em conta todas as perdas, para o correto dimensionamento da protensão e consequentemente da estrutura. (ALBINO, 2018).

Controle da força de protensão:

O controle é feito com o alongamento do cabo e depende das perdas por atrito, comprimento do cabo, escorregamento das ancoragens e comprimento da pista. (ALBINO, 2018).

Classe de agressividade ambiental NBR 6118:2014:

O primeiro passo para cálculo e verificação de um elemento estrutural em concreto protendido ou armado é a definição da classe de agressividade do ambiente em que a edificação está inserida. A tabela 6.1 da NBR 6118:2014 apresenta a classe, grau de agressividade, classificação do ambiente e o risco de deterioração da estrutura. A tabela 1 deste trabalho foi adaptada da tabela 6.1 da NBR 6118:2014 para apresentar as classes de agressividade ambiental.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental - Adaptado tabela 6.1 NBR 6118:2014

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a,b)	
IV	Muito forte	Industrial (a,c)	Elevado
		Respingos de maré	

A descrição das letras (a,b,c) visualizadas na tabela acima segundo a NBR 6118:2014 são:

a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima serco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústria de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Estados limites NBR 6118:2014:

Os elementos protendidos são calculados para atenderem o estado limite de serviço que são classificados abaixo segundo a NBR 6118:2014.

Estado limite de formação de fissuras (ELS-F): estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a $f_{ct,f}$.

Estado limite de abertura de fissuras (ELS-W): estado em que as fissuras se apresentam com abertura iguais ao máximos especificados no item 13.4.2 da NBR 6118: 2014. A máxima abertura de fissuras em concreto protendido é 0,2mm.

Estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF): estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal.

Estado limite de descompressão (ELS-D): estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração restante na seção. Verificação usual no caso de concreto protendido.

Estado limite de descompressão (ELS-DP): estado no qual garante-se a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância a_p da face mais próxima da cordoalha ou da bainha de protensão.

Estado limite de compressão excessiva (ELS-CE): estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido. Usual no caso do concreto protendido na ocasião da aplicação da protensão.

Controle da fissuração e proteção das armaduras NBR 6118:2014:

Os elementos estruturais em concreto armado são inevitavelmente fissurados, já nas estruturas com armaduras ativas (concreto protendido) existe a menor probabilidade de fissuras, porém caso ocorra fissuras, as mesmas podem ser mais nocivas, devido ao fato da possibilidade de corrosão sob tensão das armaduras. Com isso as principais diretrizes de cálculo dos elementos estruturais protendidos são definidos pela tabela 13.4 da NBR 6118:2014, onde apresenta as exigências de durabilidade em relação ao nível de protensão. A tabela 2 foi adaptada da tabela 13.4 da NBR 6118:2014.

Tabela 2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental - Adaptado tabela 13.4 NBR 6118:2014

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	*
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4\text{mm}$	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3\text{mm}$	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pré-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	Combinação quase permanente
		ELS-F	
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	ELS-D (a)	Combinação rara
		Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	
		ELS-D (a)	Combinação frequente

A descrição da letra (a) visualizada na tabela acima segundo a NBR 6118:2014 são:

a) A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50\text{mm}$.

Metodologia

Para alcançar o objetivo foram calculadas duas vigas de cobertura de um armazém de fertilizantes com as solicitações de carregamentos reais (peso próprio, cargas oriundas de vento, sobrecarga de cobertura e sobrecarga das aduelas de concreto da galeria) no software VPRO, seguindo as diretrizes e procedimentos de cálculo da NBR 6118:2014. A viga **VPT01** foi definida como pré-fabricada em indústria utilizando o sistema de pré-tração e a viga **VNA02** foi calculada como pré-moldada no canteiro de obras com pós-tração não aderente. Para ambas as soluções foram adotadas a mesma seção transversal em formato I e o comprimento de 19,98 metros devido ao tamanho da baía.

Sobrecargas nas vigas VPT01 e VNA02:

Para melhor entendimento a figura 1 apresenta um esquema das cargas aplicadas nas vigas VPT01 e VNA02.

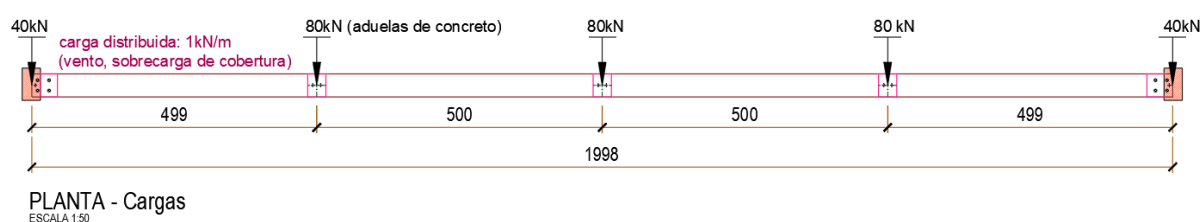


Figura 1 – Cargas aplicadas nas vigas VPT01 e VNA02. (Autor, 2020)

Classe de agressividade e cobrimento das armaduras:

Devido a edificação ser destinada para o armazenamento de fertilizantes, o ambiente segundo a NBR 6118:2014 se encontra na classe de agressividade IV, com elevado risco de deterioração da estrutura. Com isso o cobrimento definido para as vigas VPT01 e VNA02 foi de quatro centímetros.

Concreto:

Como a edificação se encontra em um ambiente de classe IV de agressividade, o concreto deve ter uma resistência característica igual ou maior de 40 MPa segundo a NBR 6118:2014, assim esse valor mínimo foi o adotado para o concreto. Além disso, foi definido uma relação água/cimento de 0,45.

Exigências da NBR 6118:2014:

Analisando a tabela 13.4 da NBR 6118:2014 verificou-se que para um ambiente com CAA IV e protensão do tipo pré-tração a viga VPT01 precisaria de um concreto protendido nível 3 (protensão completa). Na viga VNA02 por utilizar o sistema de pós-tração não aderente poderia conforme a tabela 13.4 utilizar uma protensão limitada (concreto protendido nível 2). Após essa análise o autor decidiu por utilizar protensão completa em ambas as vigas, desta forma necessitando atender as exigências relativas a fissuração do ELS-F e ELS-D, utilizando as combinações rara e frequente para atender os estados limites de serviço. Segundo a NBR 6118:2014 em elementos estruturais protendidos exigidos na combinação rara, a tensão de tração na fibra inferior não pode ultrapassar a resistência do concreto a tração ($f_{ct,f}$), já para a combinação frequente a seção de concreto deve estar toda comprimida, sem apresentar tensões de tração. As figuras 2 e 3 exemplificam melhor as exigências feitas pela NBR 6118:2014 para protensão completa.

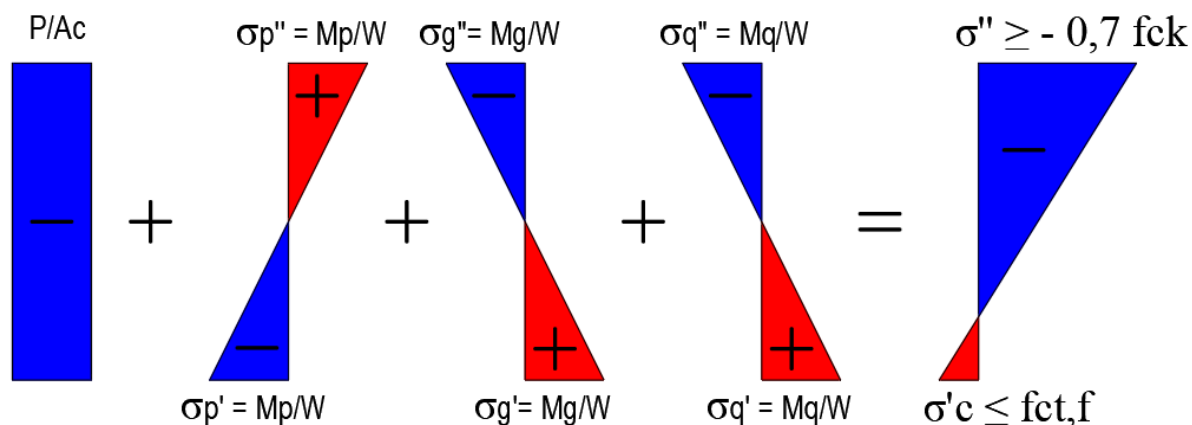


Figura 2 – Tensões limites combinação rara, para atender ELS-F. (Autor, 2020)

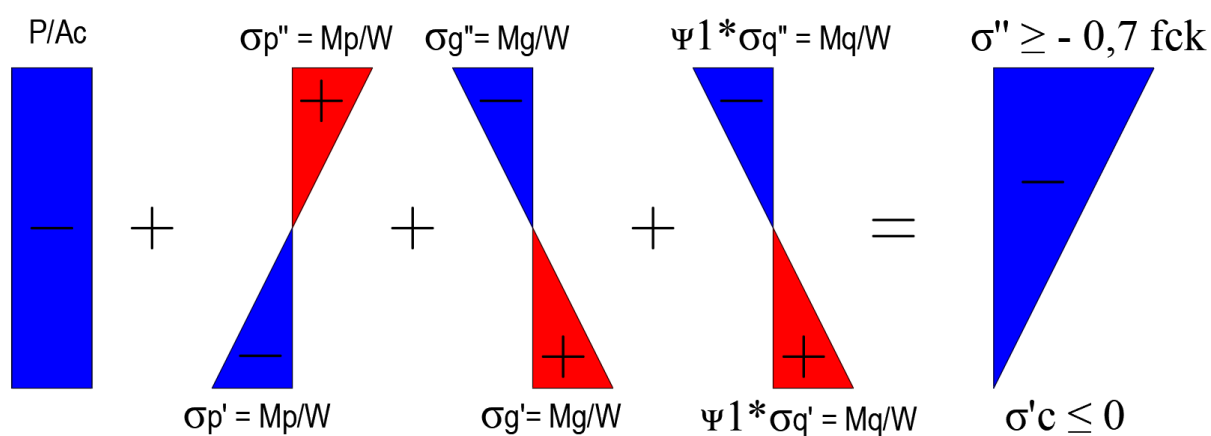


Figura 3 – Tensões limites combinação frequente, para atender ELS-D. (Autor, 2020)

Além de calcular a viga para atender ELS-F e ELS-D, também se verificou as tensões no ELU-ATO (estado limite último no ato da protensão), onde se admite que a segurança seja verificada no estágio I - concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais, desde que as tensões no concreto estejam entre os seguintes limites mostrados na equação 1:

$$0,7 f_{ck,j} \leq \sigma_c \leq 1,2 f_{ctm,j} \quad (1)$$

Onde :

$f_{ck,j}$ = é a resistência característica à compressão do concreto aos j dias;

$f_{ctm,j} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$ (resistência média à tração do concreto aos j dias).

Quando nas seções transversais existirem tensões de tração, deve haver armadura de tração calculada no estágio II. Para efeitos de cálculo, nessa fase da construção, a força nessa armadura pode ser considerada igual à resultante das tensões de tração no concreto no estágio I. Essa força não pode provocar, na armadura correspondente, acréscimos de tensão superiores a 150 MPa no caso de fios ou barras lisas e a 250 MPa em barras nervuradas. (VPRO,2016)

Por fim foi verificado o estado limite último (ELU), de onde obteve-se a armadura passiva utilizada.

Seção transversal, posição das cordoalhas e descrição da protensão na viga VPT01:

A figura 4 apresenta a seção transversal da viga VPT01 nos apoios e meio do vão. Também mostra a posição das cordoalhas.

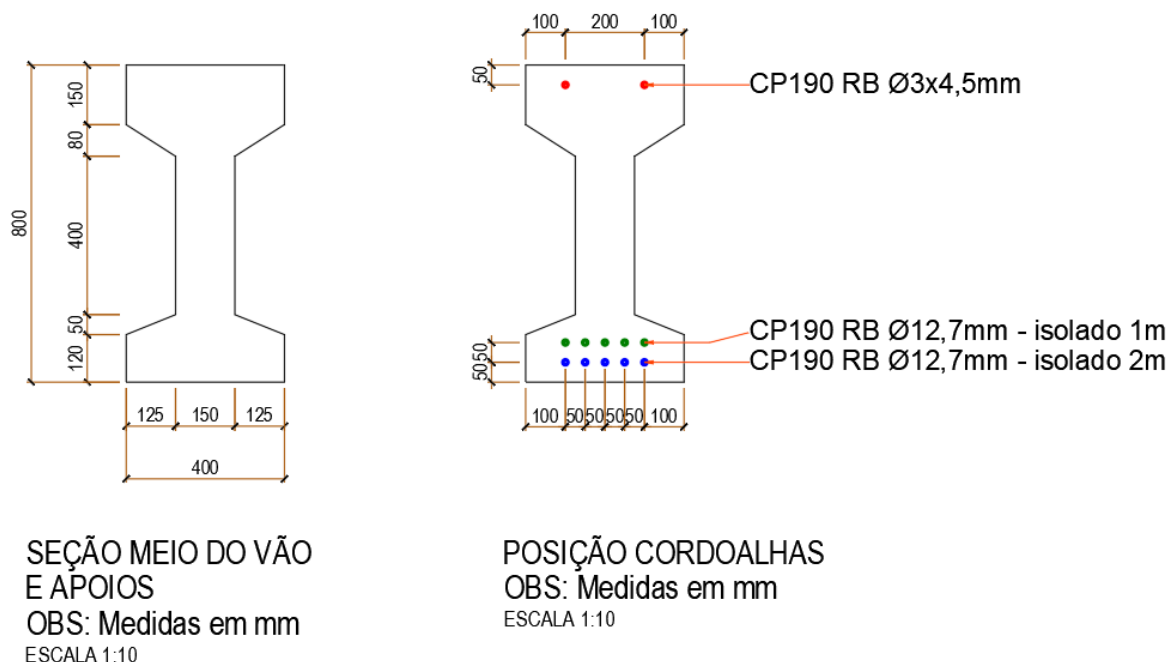


Figura 4 – Seção e posições das cordoalhas viga VPT01. (Autor, 2020)

Como descrito acima a viga VPT01 foi pré-tracionada, utilizando cordoalhas nuas CP190 RB de 3x4,5mm e 12,7mm, protendidas simultaneamente em indústria, sendo que a protensão foi transferida para a peça com um f_{ck} maior ou igual a 30 Mpa. A força inicial nas cordoalhas de 12,7mm foi de 145,5 kN e de 66,5 kN para as cordoalhas de 3x4,5mm.

O traçado das cordoalhas se manteve retilíneo (característico da pré-tração) e utilizou-se do artifício de isolar as cordoalhas nos apoios. As cordoalhas em azul na figura 6 foram isolados dois metros, e as verdes foram isoladas 1 metro. A figura 5 apresenta a viga VPT01 na interface do software VPRO®.

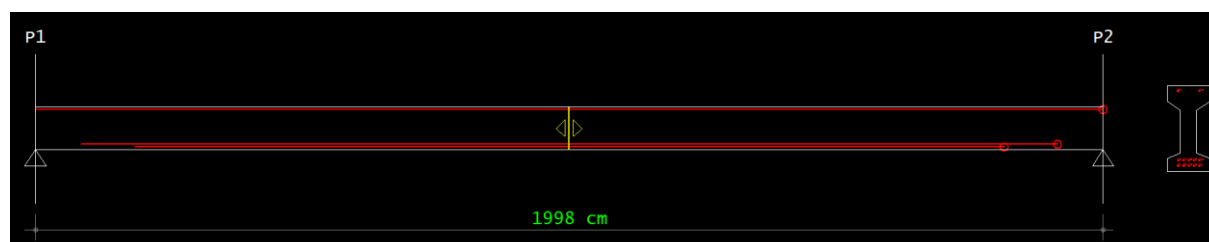


Figura 5 – Viga VPT01 no software VPRO®. (Autor, 2020)

Seção transversal, posição das cordoalhas e descrição da protensão na viga VNA02:

Devido a necessidade de acomodar as placas de ancoragens nas extremidades da viga VNA02, foi utilizado seções transversais diferentes para o meio do vão e apoios. A figura 6 apresenta estas seções transversais.

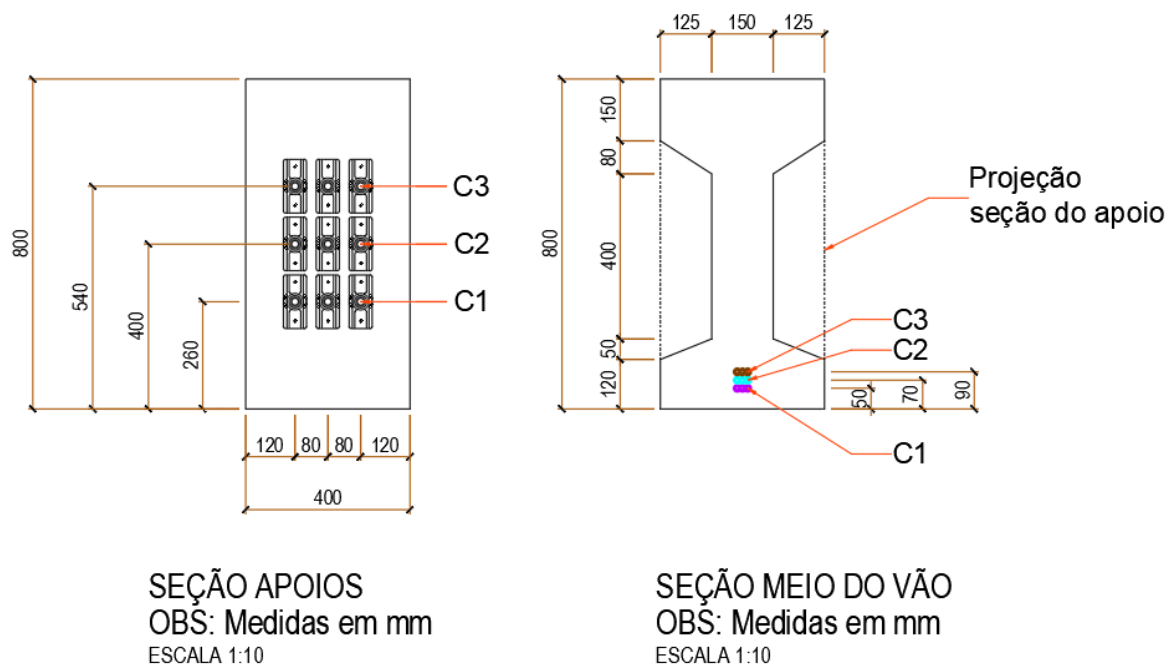


Figura 6 – Seções e posições das cordoalhas viga VNA02. (Autor, 2020)

Na viga VNA02 foi utilizado a pós-tração não aderente com três cabos poligonais, onde cada cabo possuía três cordoalhas CP190 RB 12,7mm (total de 9 cordoalhas na viga), protendidas uma por vez no canteiro de obras quando o concreto da viga atingiu 30 Mpa. A força inicial nas cordoalhas foi de 150 kN. A figura 7 mostra a viga VNA02 no software VPRO®.

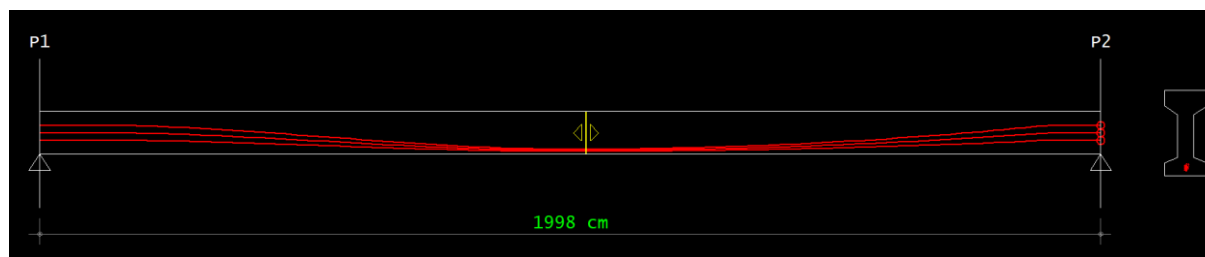


Figura 7 – Viga VNA02 no software VPRO®. (Autor, 2020)

Perdas de protensão:

As perdas por atrito, encunhamento, encurtamento elástico do concreto, fluência do concreto e retração foram calculadas para as vigas VPT01 e VNA02. A tabela 3 mostra os valores utilizados.

Tabela 3 – Valores de perdas utilizados para cálculo das vigas VPT01 e VNA02

	Perdas	
	Pré-tração	Pós-tração não aderente
Perdas por atrito	*	$\mu = 0,05 \text{ 1/rad}$ $k = 0,0005 \text{ 1/m}$
Perda por encunhamento	Recuo do cabo = 6mm Comprimento pista = 100m	Recuo do cabo = 6mm
Fluência do concreto	2,5	2,5
Retração	0,38‰	0,38‰

Orçamento:

O orçamento foi realizado com base em custos de material e mão de obra utilizados no estado do Paraná, não foi levado em consideração BDI, frete até a obra (caso VPT01) e custos de implantação de pista de protensão, cabeceiras, compra de macacos hidráulicos e fôrmas metálicas. As fôrmas utilizadas em ambas as vigas foram de madeira, para conseguir fazer um comparativo mais correto.

Resultados

Tensões:

Para atender as exigências da NBR 6118:2014 foi de suma importância verificar as tensões nos estados limites de serviços determinados na metodologia, desta forma as figuras 8, 9 e 10, apresentam as tensões fornecidas pelo software VPRO[®] nos pontos escolhidos pelo autor na viga VPT01 para as combinações rara, frequente e ato da protensão, respectivamente.

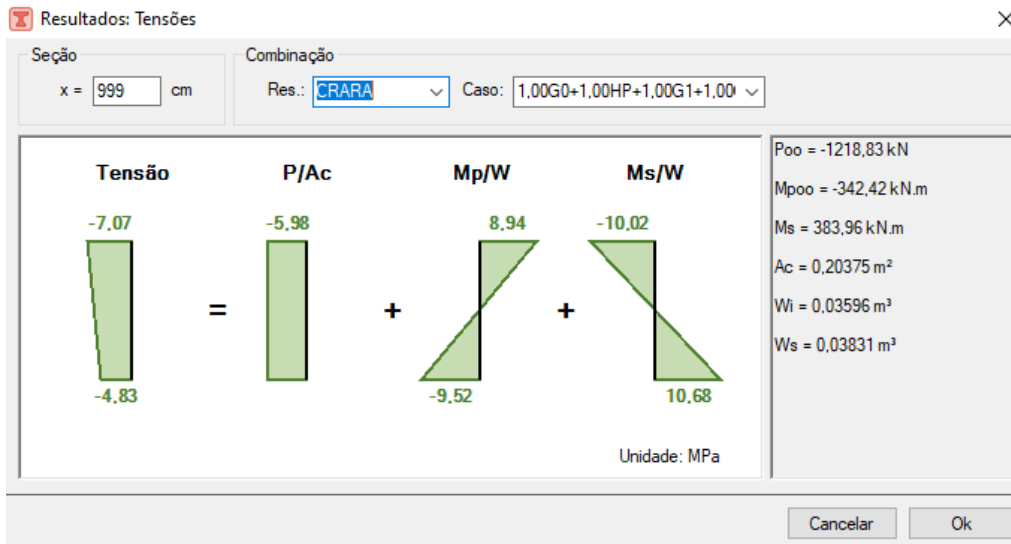


Figura 8 – Tensão viga VPT01, combinação rara. (Autor, 2020)

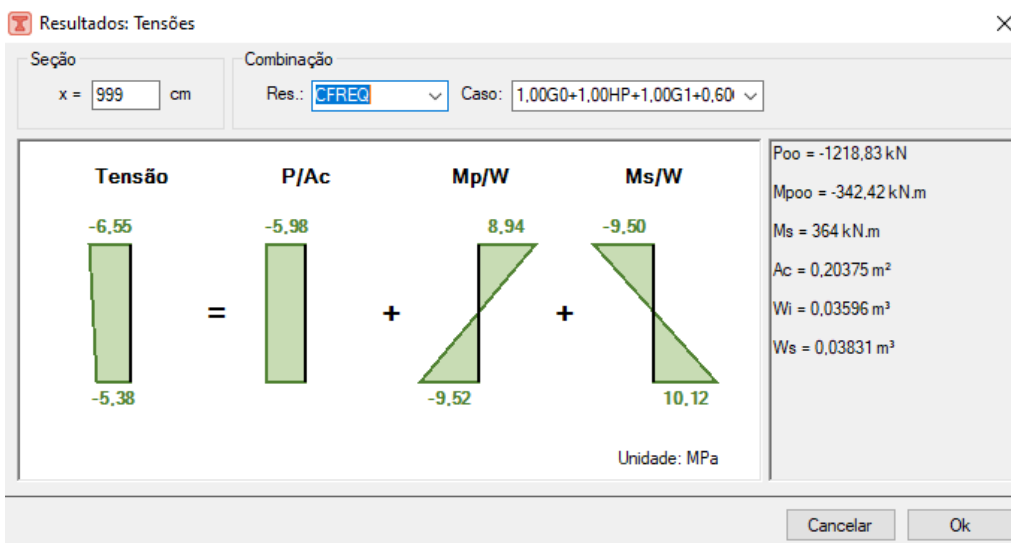


Figura 9 – Tensão viga VPT01, combinação frequente. (Autor, 2020)

Através das figuras acima foi possível visualizar que com o conjunto de armaduras ativas empregadas na viga VPT01, ela não apresenta tração no meio do vão para as combinações em estudo, ou seja, a viga está totalmente comprimida.

O autor escolheu apresentar as tensões na fibra inferior e superior no meio do vão, por se tratar do local onde há a pior situação de cálculo. Nos demais pontos da VPT01 até os apoios também se verificou apenas tensões de compressão.

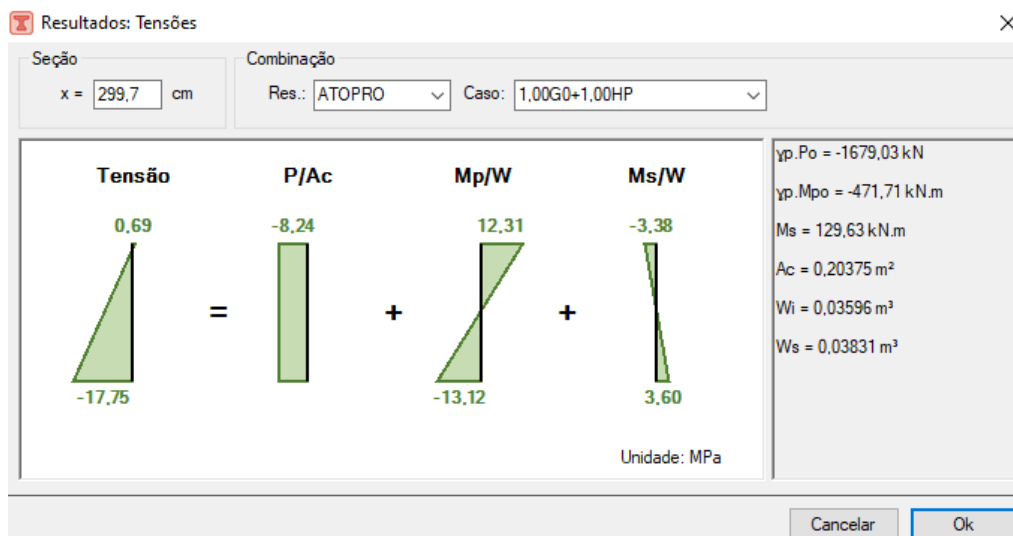


Figura 10 – Tensão viga VPT01, ato protensão. (Autor, 2020)

No ato da protensão optou-se por apresentar as tensões nas fibras a três metros dos apoios, logo após o artifício de isolamento das cordoalhas, pois esse é o ponto mais crítico para essa combinação. Aqui é verificado que há uma grande compressão na fibra superior chegando próxima do limite de -18,20 MPa, e na fibra inferior há uma pequena tração de 0,69 MPa, sendo que esse valor está dentro do limite de 3,16 MPa (o gráfico de tensões no ato da protensão é invertido no software VPRO®).

No anexo A é possível visualizar as tensões em todas as seções da viga VPT01.

As tensões na fibra superior e inferior da viga VNA02 também foram de compressão, não apresentando tração em nenhum ponto, nas combinações rara e frequente. Podemos visualizar nas figuras 11 e 12, respectivamente.

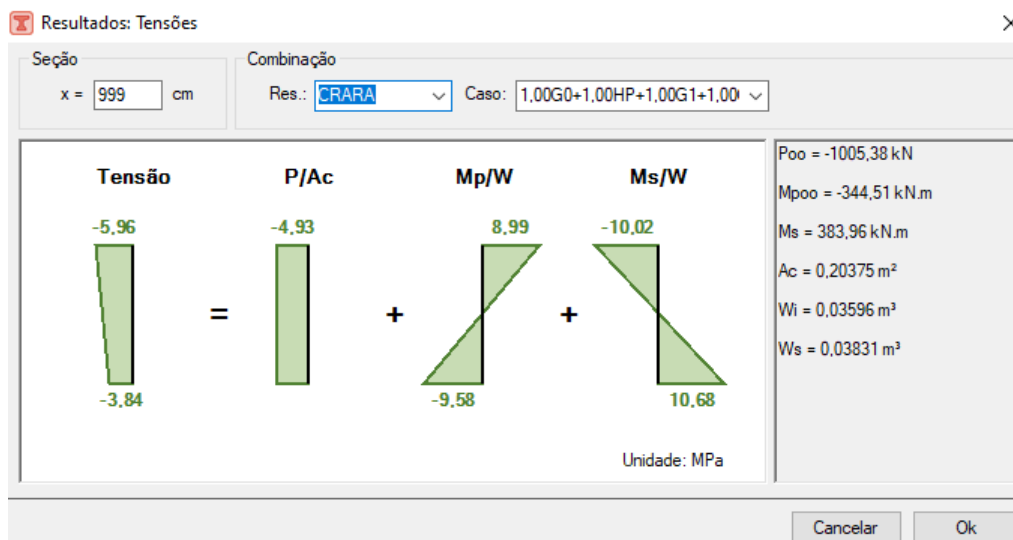


Figura 11 – Tensão viga VNA02, combinação rara. (Autor, 2020)

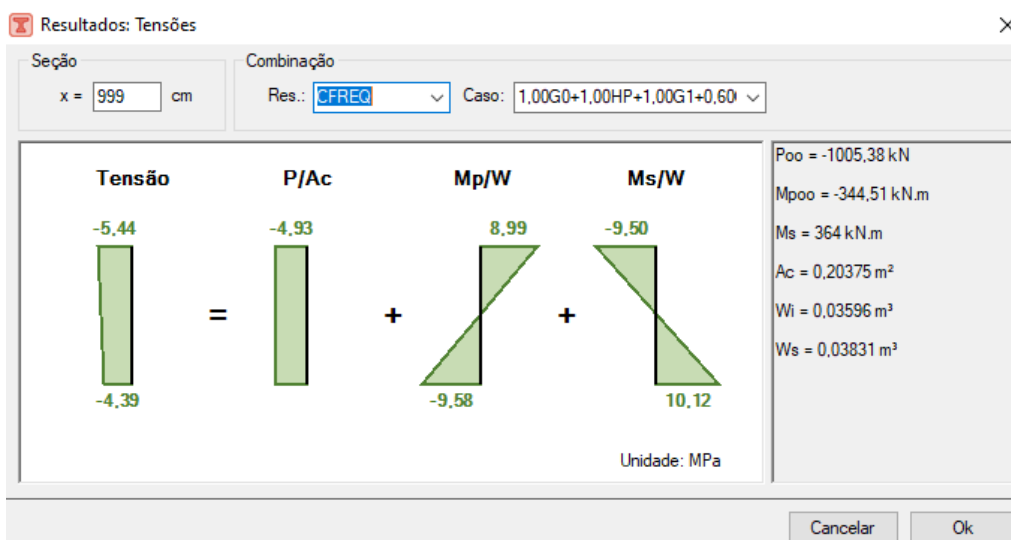


Figura 12 – Tensão viga VNA02, combinação frequente. (Autor, 2020)

Diferente da viga VPT01, no ato da protensão a viga VNA02 apresentou todas as fibras comprimidas, e o local de pior situação ficou no meio do vão, devido ao cabo ser no formato poligonal (o gráfico de tensões no ato da protensão é invertido no software VPRO®, sendo neste caso a tensão de -12,85 MPa na fibra superior, e a tensão na fibra inferior de -1,06 MPa). Essas tensões são mostradas na figura 13.

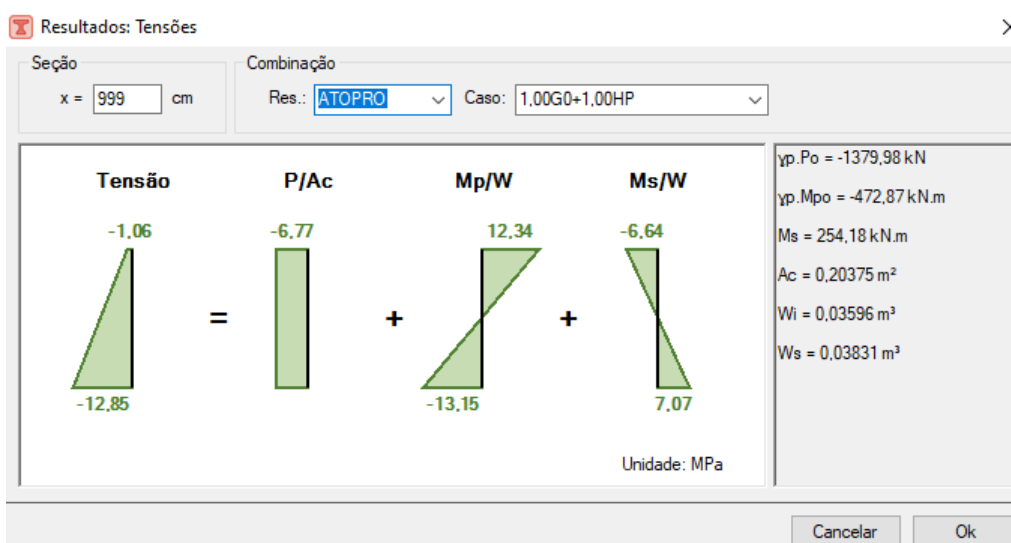


Figura 13 – Tensão viga VNA02, ato protensão. (Autor, 2020)

No anexo B é possível visualizar as tensões em todas as seções da viga VNA02 e verificar que a mesma se encontra toda comprimida

Armadura passiva:

Após a verificação das tensões obteve-se a armadura passiva das vigas VPT01 e VNA02 respectivamente nas figuras 14 e 15.

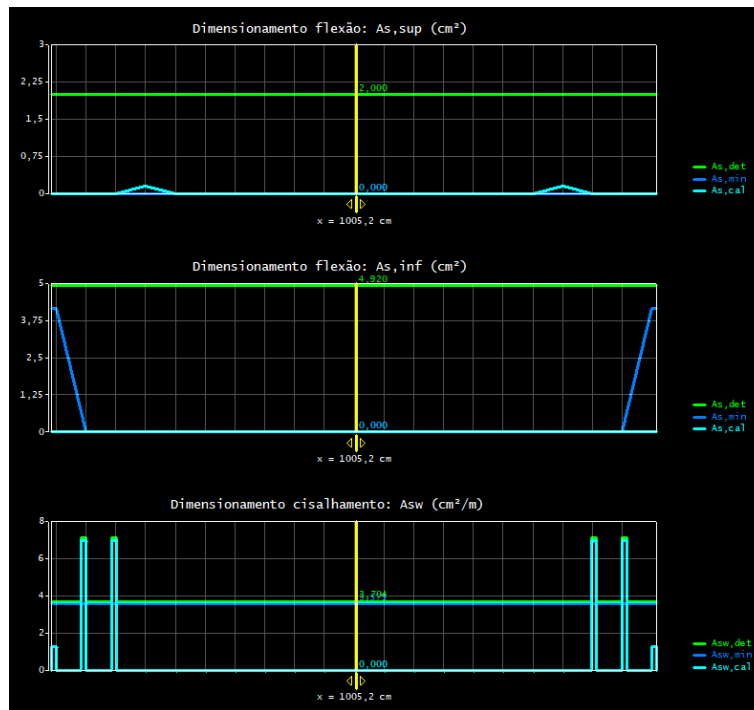


Figura 14 – Armadura passiva viga VPT01. (Autor, 2020)

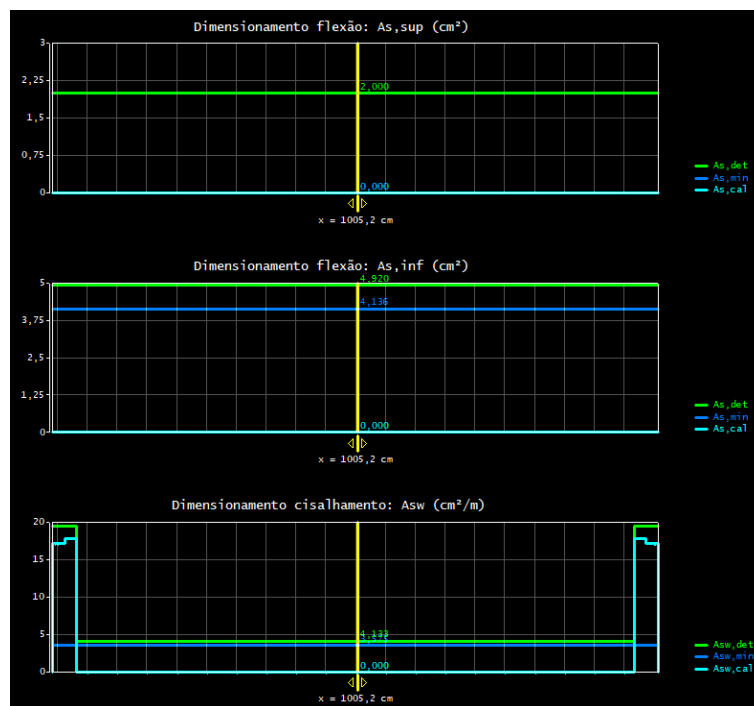


Figura 15 – Armadura passiva viga VNA02. (Autor, 2020)

Visualizando a figura 14, verificamos que na viga VPT01 só seria necessária armadura longitudinal passiva na fibra inferior dos apoios. Os pontos restantes poderiam ser determinados apenas uma armadura construtiva, já que o software verificou que não teria necessidade de uma armadura mínima.

No caso da viga VNA02 já é possível constatar na figura 15 que o cálculo apresenta uma armadura passiva longitudinal mínima na fibra inferior. A fibra superior continuou apenas com uma armadura construtiva.

O dimensionamento a cisalhamento mostrou uma maior diferença entre o sistema de pré-tração e pós-tração não aderente. Onde a VPT01 apresentou 7,143 cm²/m nos apoios (pior situação) e VNA02 obteve 17,82 cm²/m.

Análise econômica:

Finalizando os resultados apresentamos a análise econômica da viga VPT01 e VNA02, respectivamente nas tabelas 4 e 5;

Tabela 4 – Orçamento viga VPT01

Viga Protendida VPT01								
Descrição	Un	Qtde	Preço Unitário (R\$)			Preço Total (R\$)		Total Geral (R\$)
			Material	MO	Total	Material	MO	
Fôrmas	m ²	46,12	60,00	40,00	100,00	2767,20	1844,80	4612,00
Armadura passiva	Kg	315,85	4,00	4,00	8,00	1263,40	1263,40	2526,80
Concreto estrutural	m ³	4,08	350,00	150,00	500,00	1428,00	612,00	2040,00
Cordoalhas nuas 12,7mm	Kg	160,62	6,50	4,00	10,50	1044,03	642,48	1686,51
Cordoalhas nuas três fios 4,5mm	Kg	14,84	7,50	4,00	11,50	111,30	59,36	170,66
Cunhas	ud	24	5,67	0,00	5,67	136,08	0,00	136,08
Custo total						6750,01	4422,04	11172,05

Tabela 5 – Orçamento viga VNA02

Viga Protendida VNA02								
Descrição	Un	Qtde	Preço Unitário (R\$)			Preço Total (R\$)		Total Geral (R\$)
			Material	MO	Total	Material	MO	
Fôrmas	m ²	46,26	60,00	40,00	100,00	2775,60	1850,40	4626,00
Armadura passiva	Kg	389,64	4,00	4,00	8,00	1558,56	1558,56	3117,12
Concreto estrutural	m ³	4,31	350,00	150,00	500,00	1508,50	646,50	2155,00
Cordoalhas engraxadas 12,7mm	Kg	170,70	8,10	7,00	15,10	1382,67	1194,90	2577,57
Ancoragens	ud	18,00	6,90	0,00	6,90	124,20	0,00	124,20
Cunhas	ud	18,00	5,67	0,00	5,67	102,06	0,00	102,06
Pocket former	ud	9,00	1,55	0,00	1,55	13,95	0,00	13,95
Adaptador	ud	9,00	1,33	0,00	1,33	11,97	0,00	11,97
Tampão	ud	9,00	2,52	0,00	2,52	22,68	0,00	22,68
Tirant	ud	9,00	1,80	0,00	1,80	16,20	0,00	16,20
Pré-blocagem	Kg	170,70	0,00	0,90	0,90	0,00	153,63	153,63
Custo total						7516,39	5403,99	12920,38

Comparando os dois orçamentos verificou-se que a viga VPT01 possui um custo de produção menor que VNA02 em R\$ 1748,33. Essa diferença se deu principalmente na armadura passiva da viga VNA02 (R\$ 590,32), acessórios exclusivos do sistema de protensão não aderente (R\$ 437,61) e diferença no custo da cordoalha engraxada para cordoalhas nuas (R\$720,4).

Considerações Finais

A partir da análise dos resultados dos modelos das vigas com pré-tração e pós-tração não aderente observou-se que ambas atendem os requisitos de ELS e ELU estabelecidos pela NBR 6118:2014 com a mesma seção I no meio do vão. Também foi possível visualizar que com a utilização do cabo poligonal na VNA02 há uma maior eficiência da armadura ativa, reduzindo o número de cordoalhas, assim eliminando as cordoalhas de 3x4,5mm na fibra superior que foram utilizadas para equilibrar as tensões, além de não empregar o artifício de isolamento nos apoios. A armadura passiva reduziu 23,63% no sistema de pré-tração em comparação com a protensão não aderente, onde verificou-se que a viga VPT01 só necessitaria de armadura longitudinal nos apoios, entretanto optou-se por manter a armadura mínima da NBR 6118:2014, ficando a taxa de aço da armadura longitudinal passiva semelhante a viga VNA02. Com isso a maior redução de taxa de aço se deu na armadura transversal, já que a viga com pós-tração não aderente necessitou de um maior número de estribos nos apoios para resistir aos esforços. Outro fator que podemos destacar e que ficou de fácil compreensão é a necessidade de uma maior armadura longitudinal passiva na viga VNA02 (pós-tração não aderente), reforçando a teoria que quando não há aderência entre cordoalha e concreto a norma impõe a utilização de uma maior taxa de aço passivo para “costurar” as possíveis fissuras no estado limite último. Na questão da viabilidade econômica a viga VPT01 (pré-tração) se mostrou com um custo menor de 15,65%, todavia não estão incorporados no orçamento os valores de transporte, que dependendo da distância pode aumentar significativamente este custo. Outra situação que chamou atenção foi o custo elevado das fôrmas no orçamento, que tem a tendência de reduzir conforme há uma reutilização das mesmas. Ainda dentro desta análise econômica não se considerou a implantação do sistema de pré-tração em indústria, com a instalação de cabeceiras e pista de protensão. Ao mesmo tempo na pós-tração não aderente só haveria a necessidade de adquirir macaco e bomba hidráulica para execução da VNA02. Por fim acredita-se que a pós-tração não aderente em vigas pré-moldadas em canteiro é uma alternativa viável quando não há indústria de pré-fabricação próximo ou se é uma empresa pequena de pré-moldado afim de oferecer um serviço diferenciado ao cliente, sem precisar imobilizar altos recursos financeiros. Nos armazéns de fertilizantes a utilização do sistema de pós-tração não aderente é viabilizado por ser um ambiente muito agressivo, fazendo com que a cordoalha engraxada apresente uma maior segurança a corrosão, também pelo fato que geralmente essas obras são em lugares afastados, gerando altos custos de transporte. Para dar continuidade a este estudo, uma sugestão de trabalho futuro é acrescentar na viabilidade econômica os custos de transporte e implantação dos sistemas de pré-tração e pós-tração não aderente.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Projeto de estruturas de concreto - procedimento", NBR 6118/ 2014. Rio de Janeiro.

ALBINO, F.S., "Dimensionamento de Vigas Protendidas Parte I", Notas de Aula de Dimensionamento de Vigas Protendidas – Pós-graduação em Sistemas Estruturais, Instituto IDD, Curitiba, Brasil, 2018.

V-PRO SOFTWARE. Projeto de Vigas Protendidas – Manual do Usuário. Desenvolvido por Eng. Sander David Cardoso Junior. São Paulo, 2016.

Anexo A**Tabela 6 – Verificação ELS-F (combinação rara) viga VPT01**

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	0	0
2	0,999	-1,7	-0,15
3	1,998	-6,47	-1,17
4	2,997	-10,41	-1,46
5	3,996	-9,29	-2,61
6	4,995	-8,29	-3,63
7	5,994	-7,63	-4,32
8	6,993	-7,09	-4,87
9	7,992	-6,68	-5,3
10	8,991	-6,88	-5,01
11	9,99	-7,07	-4,83
12	10,989	-6,88	-5,01
13	11,988	-6,68	-5,3
14	12,987	-7,09	-4,87
15	13,986	-7,63	-4,32
16	14,985	-8,29	-3,63
17	15,984	-9,29	-2,61
18	16,983	-10,41	-1,46
19	17,982	-6,47	-1,17
20	18,981	-1,7	-0,15
21	19,98	0	0

Tabela 7 – Verificação ELS-D (combinação frequente) viga VPT01 - continua

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	0	0
2	0,999	-1,6	-0,26
3	1,998	-6,47	-1,17
4	2,997	-10,41	-1,46
5	3,996	-9,29	-2,61
6	4,995	-8,29	-3,63
7	5,994	-7,63	-4,32
8	6,993	-7,09	-4,87
9	7,992	-6,68	-5,3
10	8,991	-6,39	-5,56
11	9,99	-6,55	-5,38
12	10,989	-6,39	-5,56
13	11,988	-6,68	-5,3
14	12,987	-7,09	-4,87

Tabela 7 – Verificação ELS-D (combinação frequente) viga VPT01

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
15	13,986	-7,63	-4,32
16	14,985	-8,29	-3,63
17	15,984	-9,29	-2,61
18	16,983	-10,41	-1,46
19	17,982	-6,47	-1,17
20	18,981	-1,6	-0,26
21	19,98	0	0

Tabela 8 – Verificação ELU-ATO viga VPT01

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	0	0
2	0,999	-1,31	-1,11
3	1,998	-10,56	0,11
4	2,997	-17,75	0,69
5	3,996	-16,86	-0,17
6	4,995	-16,11	-0,89
7	5,994	-15,49	-1,49
8	6,993	-15,01	-1,95
9	7,992	-14,67	-2,28
10	8,991	-14,46	-2,48
11	9,99	-14,4	-2,54
12	10,989	-14,46	-2,48
13	11,988	-14,67	-2,28
14	12,987	-15,01	-1,95
15	13,986	-15,49	-1,49
16	14,985	-16,11	-0,89
17	15,984	-16,86	-0,17
18	16,983	-17,75	0,69
19	17,982	-10,56	0,11
20	18,981	-1,31	-1,11
21	19,98	0	0

Anexo B**Tabela 9 – Verificação ELS-F (combinação rara) viga VNA02**

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	-5,43	-4,71
2	0,999	-6,53	-3,49
3	1,998	-7,9	-2,06
4	2,997	-8,6	-1,35
5	3,996	-8,76	-1,2
6	4,995	-8,54	-1,44
7	5,994	-7,87	-2,1
8	6,993	-7,14	-2,79
9	7,992	-6,5	-3,37
10	8,991	-6,07	-3,75
11	9,99	-5,96	-3,84
12	10,989	-5,88	-3,94
13	11,988	-5,85	-4,01
14	12,987	-5,87	-4,04
15	13,986	-5,95	-4,02
16	14,985	-6,1	-3,93
17	15,984	-6,12	-3,99
18	16,983	-6,21	-3,95
19	17,982	-6,38	-3,81
20	18,981	-6,62	-3,58
21	19,98	-5,52	-4,81

Tabela 10 – Verificação ELS-D (combinação frequente) viga VNA02 - continua

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	-5,43	-4,71
2	0,999	-6,43	-3,6
3	1,998	-7,71	-2,26
4	2,997	-8,33	-1,63
5	3,996	-8,43	-1,56
6	4,995	-8,15	-1,85
7	5,994	-7,44	-2,56
8	6,993	-6,67	-3,29
9	7,992	-6	-3,9
10	8,991	-5,55	-4,3
11	9,99	-5,44	-4,39
12	10,989	-5,37	-4,49
13	11,988	-5,35	-4,55
14	12,987	-5,39	-4,55

Tabela 10 – Verificação ELS-D (combinação frequente) viga VNA02

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
15	13,986	-5,51	-4,49
16	14,985	-5,71	-4,35
17	15,984	-5,78	-4,34
18	16,983	-5,94	-4,24
19	17,982	-6,2	-4,01
20	18,981	-6,53	-3,68
21	19,98	-5,52	-4,81

Tabela 11 – Verificação ELU-ATO viga VNA02

Seção	x (m)	Tensão fibra superior (MPa)	Tensão fibra inferior (MPa)
1	0	-7,24	-6,28
2	0,999	-7,54	-5,9
3	1,998	-8,27	-5,14
4	2,997	-8,19	-5,26
5	3,996	-7,48	-6,03
6	4,995	-7,26	-6,33
7	5,994	-8,72	-4,96
8	6,993	-10,21	-3,55
9	7,992	-11,52	-2,3
10	8,991	-12,47	-1,41
11	9,99	-12,85	-1,06
12	10,989	-12,79	-1,14
13	11,988	-12,56	-1,37
14	12,987	-12,16	-1,77
15	13,986	-11,59	-2,33
16	14,985	-10,85	-3,06
17	15,984	-9,92	-3,96
18	16,983	-8,81	-5,02
19	17,982	-7,51	-6,26
20	18,981	-7,68	-6,03