

Passo-a-passo do programa com exemplo

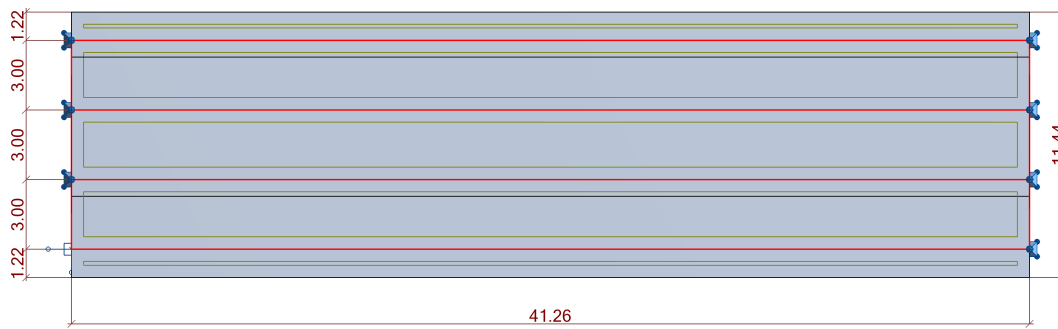
Este capítulo apresenta um passo-a-passo completo do programa com um exemplo. Os resultados obtidos em cada passo pelo programa são comparados aos obtidos pelos métodos apresentados no Capítulo 2. O Apêndice B.1 apresenta os dados relevantes da estrutura. Trata-se de um viaduto rodoviário isostático. A seção transversal apresenta quatro vigas pré-moldadas e uma laje de 20cm de espessura.

O primeiro passo para verificar esta estrutura é criar um modelo no **Robot**. Adotou-se o modelo apresentado na Figura 4.1. A laje é descrita por “claddings”, objetos que distribuem esforços mas não têm rigidez. A transversina de meio de vão não é modelada. A motivação por trás destas decisões são apresentadas mais a frente. Também é essencial observar os apoios adotados. Grande parte dos esforços oriundos da protensão são de compressão axial, porém esta parcela pode ser anulada caso os apoios sejam incorretamente definidos.

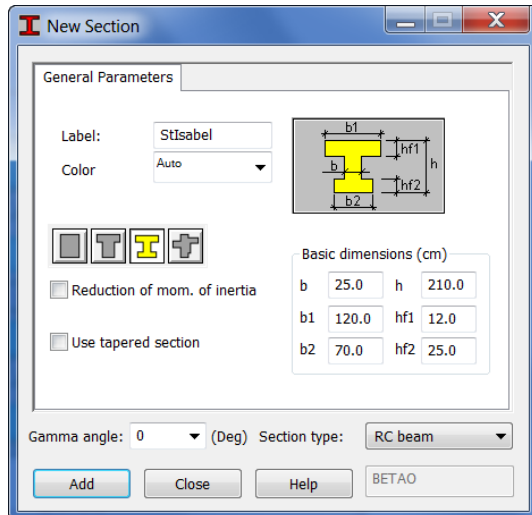
Este viaduto apresenta vigas pré-moldadas assentes em aparelhos de apoio de neoprene fretado. Tais aparelhos permitem um alto grau de deslocamento, condição esta que deve ser considerada no modelo. Por este motivo observa-se que todos os apoios exceto um são apenas verticais (restrição ao FZ), permitindo o deslocamento livre da estrutura no plano XY. Apenas um nó, o inferior esquerdo na figura, apresenta restrições a todos os deslocamentos e à rotação ao redor do eixo vertical. Caso todos os apoios fossem rígidos ao deslocamento no sentido do eixo axial, a viga não poderia se deformar. Todas as cargas axiais aplicadas pela protensão seriam absorvidas pelos apoios, sem comprimir a viga como seria de se esperar.

Nos casos de pórticos protendidos, no entanto, onde a viga é engastada em pilares, a perda de compressão devido à condição de contorno da viga é uma questão essencial à análise correta da mesma e logo deve ser considerada. É necessário estudar as condições de contorno da viga caso-a-caso para certificar que o modelo é representativo da realidade.

Tendo corretamente definido a geometria do modelo, prossegue-se para a criação dos casos de carga. Aqui é necessário considerar quais serão as fases da estrutura. Como se trata de uma viga pré-moldada, no momento da protensão dos cabos o único carregamento permanente atuante será de peso-próprio das vigas. É então necessário criar um carregamento que inclui apenas este carregamento permanente.



(a) Vista em planta



(b) Seção transversal das vigas longarinas

Propriedades	
Área (m ²)	0,7515
Perímetro (m)	7,500
I _y (m ⁴)	0,4015
y _i (m)	1,062
y _s (m)	1,038

Figura 4.1: Modelo do **Robot** do Viaduto de acesso a Santa Isabel

Após a protensão de todos os cabos as vigas serão içadas para suas posições finais e uma laje, transversina de meio de vão e cortinas *in loco* serão concretadas. Após o endurecimento destes elementos ocorrerá a pavimentação com 7cm de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e a instalação de guarda-rodas e guarda-corpos. Ao longo da vida-útil da ponte a pavimentação será recapeada. É então necessário criar carregamentos que representem estas diversas cargas ao longo da vida da estrutura. A carga de recapeamento é definida no item 7.1.2 da NBR 7187.⁴² Como a transversina não foi criada no modelo, seu peso-próprio é aplicado como cargas concentradas nas vigas. Neste exemplo estes carregamentos são simplificados, adotando que a laje é concretada, pavimentada e recapeada e os guarda-rodas e guarda-corpos são locados no mesmo momento (a combinação de carga é denominada “Perm”).

A ponte é então liberada ao tráfego e deve-se então carregar o modelo com o trem-tipo classe 45 (TB-45) definido na NBR 7188.⁴¹ Neste exemplo adota-se o trem-tipo simplificado permitido pelo item 5.2 desta norma, com cargas concentradas de 60kN e carga distribuída dentro do veículo. Quatro combinações de carga accidental são criadas, cada qual com o veículo percorrendo diferentes

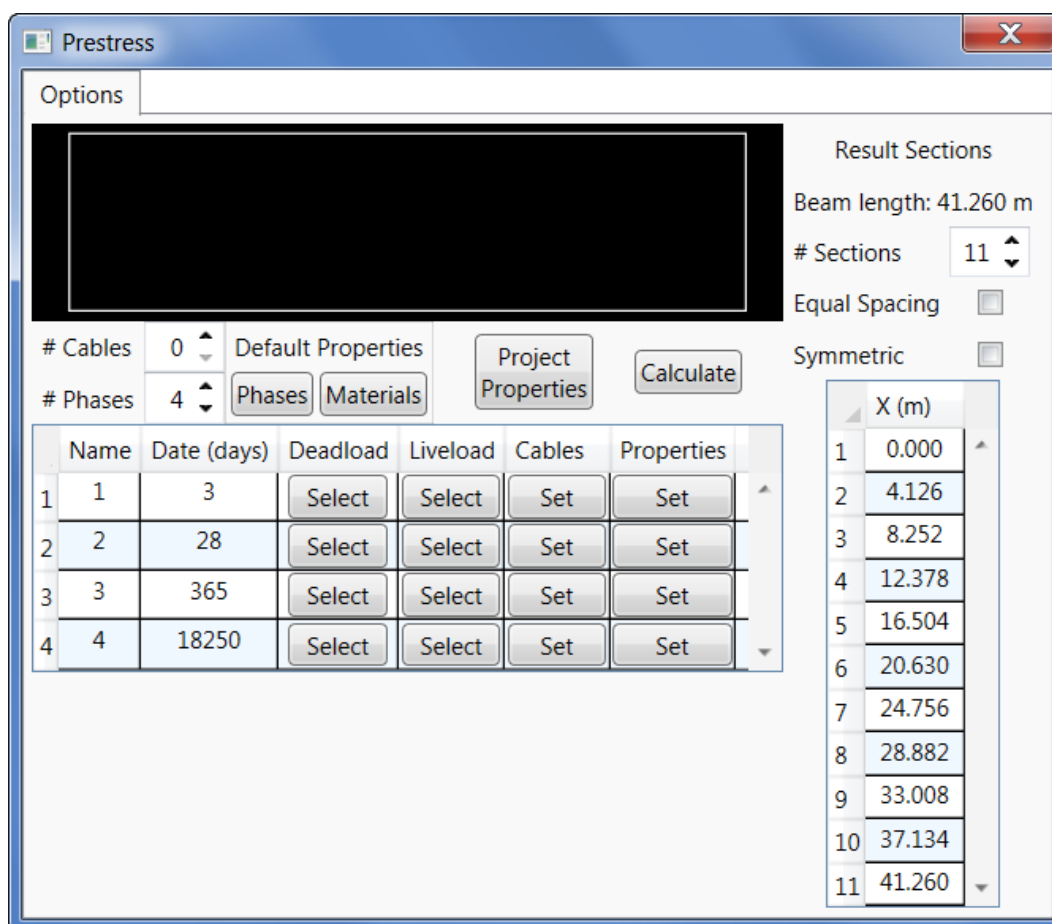


Figura 4.2: Aba de opções da viga do Viaduto de acesso a Santa Isabel antes da entrada de dados

trajetos e uma carga distribuída (combinações “Acidental1-4”). Estas combinações devem já incluir o coeficiente de impacto definido na NBR 7187.⁴²

Tendo em mãos então um modelo completo, com geometria e cargas solicitantes, pode-se então iniciar o **Prestress**. Utilizando o método da Seção 3.4, o programa é instalado e inicializado. Quando este solicita a viga a ser protendida, seleciona-se as barras da viga do balanço sem passeio, que é a mais solicitada. Neste modelo a viga é representada por apenas uma barra. Também seria permitido criar a viga em dois (ou mais) segmentos, com uma barra de um apoio à transversina de meio de vão e da transversina ao outro apoio, por exemplo.

Aparece então a janela já vista na Figura 3.6, repetida agora na Figura 4.2 com as propriedades deste exemplo. A ordem das operações agora não é mais importante, mas neste exemplo inicia-se conferindo as diferentes propriedades. É útil lembrar que as unidades adotadas pelo programa são iguais às definidas para o modelo no **Robot**, logo as janelas abaixo podem diferir das vistas pelo usuário.

As seções de resultados padrão, que são dadas a cada décimo de vão, são

Concrete Properties	
fck (MPa)	40
Slump (cm)	5 - 9
Concrete type	CPV-ARI

Cable Properties			
Elastic Modulus (MN/m²)	195000	Angular Loss (1/rad)	0.28
fptk (MN/m²)	1900	Linear Loss (rad/m)	0.0028
Area (cm²)	16.8	Anchorage Slip (cm)	0.7
Pull Stress (MN/m²)	1406	Relaxation	Low

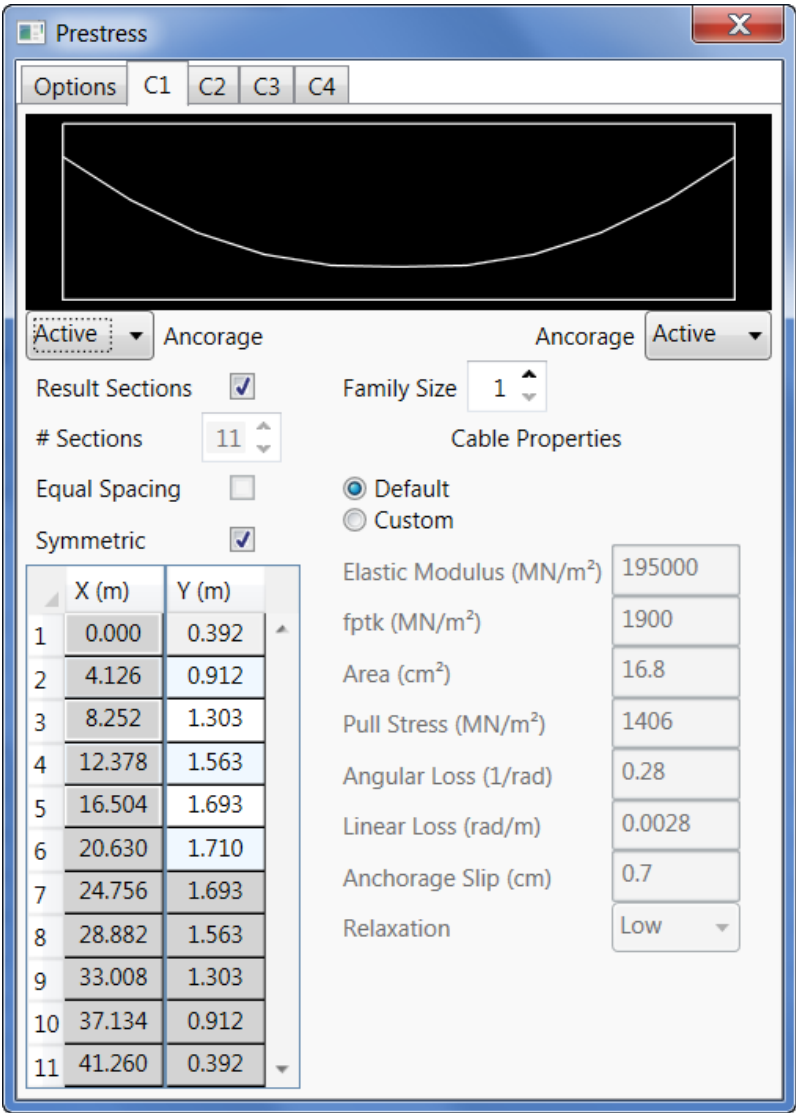
OK

Figura 4.3: Propriedades padrão dos materiais do viaduto de acesso a Santa Isabel

mantidas. Abrindo-se a janela de opções-padrão das fases (ver Figura 3.7(a)), vê-se que estas já satisfazem este caso. Já na janela de opções-padrão dos materiais mantêm-se as propriedades do concreto mas altera-se a área do cabo para $16,8\text{cm}^2$, a tensão de protensão para 1406MN/m^2 , e os coeficientes das perdas angulares e lineares para $0,28/\text{rad}$ e $0,0028\text{rad/m}$, respectivamente. O resultado final é apresentado na Figura 4.3. Na janela das propriedades do projeto (ver Figura 3.7(b)) tem-se os valores padrão de ψ_F e ψ_D , os fatores de redução de combinação para o ELS-F e ELS-D, respectivamente. Como isso se trata de uma ponte rodoviária sob protensão limitada, tem-se pelas NBR 6118¹ e NBR 8681³⁹ que $\psi_F = \psi_1 = 0,5$ e $\psi_D = \psi_2 = 0,3$, que já são os valores definidos.

Antes de entrar na tabela de fases, define-se os diferentes cabos de protensão. A viga apresenta cinco cabos, mas dois seguem sempre o mesmo traçado e logo podem ser considerados como uma família. Definem-se então apenas quatro cabos. Todos os cabos são protendidos por ambas as ancoragens e têm dados similares, logo a Figura 4.4 apresenta a janela para o cabo C1 e para os cabos restantes, apenas os traçados. A família C4 tem a distinção de ter *Family Size* = 2, uma vez que representa de fato dois cabos.

Com os cabos definidos, verifica-se agora as fases da vida da estrutura. O padrão do **Prestress** é ter quatro fases aos 3, 28, 365 e 18250 dias, conforme sugerido pelo PCI.³⁷ O usuário, no entanto, pode alterar tanto as datas quanto o número de fases. O Apêndice B.1 indica que a primeira leva de protensão ocorrerá quando o concreto atingir $f_{cj} \geq 30\text{MPa}$, mas não antes dos três dias. O item 12.3.3 da NBR 6118¹ indica que um concreto CPV-ARI de $f_{ck} \geq 40\text{MPa}$ atinge tal f_{cj} aos 5 dias, logo a primeira fase terá sua data alterada para este valor.



(a) Definição do cabo C1

	X (m)	Y (m)
1	0.000	0.842
2	4.126	1.350
3	8.252	1.689
4	12.378	1.858
5	16.504	1.880
6	20.630	1.880
7	24.756	1.880
8	28.882	1.858
9	33.008	1.689
10	37.134	1.350
11	41.260	0.842

(b) Cabo C2. As demais propriedades são iguais às do cabo C1

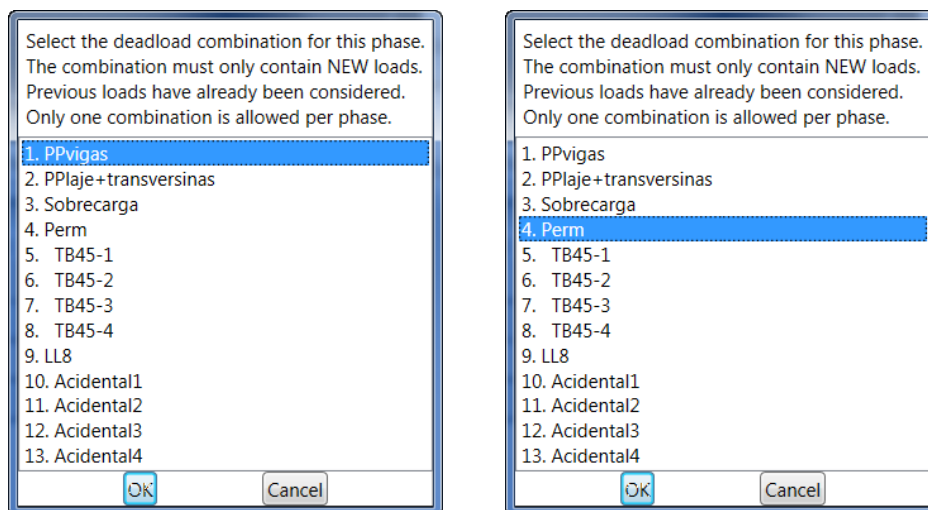
	X (m)	Y (m)
1	0.000	1.286
2	4.126	1.722
3	8.252	1.942
4	12.378	1.970
5	16.504	1.970
6	20.630	1.970
7	24.756	1.970
8	28.882	1.970
9	33.008	1.942
10	37.134	1.722
11	41.260	1.286

(c) Cabo C3. As demais propriedades são iguais às do cabo C1

	X (m)	Y (m)
1	0.000	1.720
2	4.126	1.941
3	8.252	1.970
4	12.378	1.970
5	16.504	1.970
6	20.630	1.970
7	24.756	1.970
8	28.882	1.970
9	33.008	1.970
10	37.134	1.941
11	41.260	1.720

(d) Cabo C4. As demais propriedades são iguais às do cabo C1, com exceção do fato de *Family Size* = 2

Figura 4.4: Definição dos cabos do Viaduto de acesso à Santa Isabel



(a) Acréscimo de carga permanente na fase 1

(b) Acréscimo de carga permanente na fase 2

Figura 4.5: Acréscimo de carga permanente nas fases do Viaduto de acesso à Santa Isabel

Em casos onde cabos são protendidos em diferentes datas sugere-se criar diferentes fases para cada data. Neste caso, porém, a segunda e última leva de cabos é protendida aos 28 dias, logo o restante das datas padrão são mantidas, assim como o total de quatro fases.

Para cada fase deve-se agora definir os carregamentos permanentes e acidentais que nela atuam e os cabos nela protendidos. Caso necessário também pode-se definir propriedades fora do padrão para cada fase (ver Figura 3.7(g)).

Como descrito acima, com a protensão dos cabos na primeira fase, a viga irá descolar da forma e ativar seu peso-próprio. Nesta fase tem-se então a atuação desta carga permanente. Já na segunda fase, a carga permanente é dada pela combinação de todos os demais esforços: peso-próprio da laje, da pavimentação, do recapeamento e dos guarda-rodas e guarda-corpos. O **Prestress** permite apenas um carregamento permanente por fase, logo todos estes esforços da segunda fase devem ser adicionados a uma combinação. Esta combinação, no entanto, não deve incluir o peso-próprio das vigas, uma vez que esta carga já foi considerada na fase anterior. Apenas carregamentos novos devem ser inclusos. Por este motivo, as demais fases não apresentam carregamentos permanentes. As cargas selecionadas podem ser vistas na Figura 4.5.

O mesmo procedimento deve ser repetido para as cargas acidentais. Neste caso, no entanto, o programa permite mais de uma carga por fase. O **Prestress** não cria combinações destas, mas adota para cada seção a combinação mais solicitante. Isso significa que cargas móveis que são compostas por diferentes

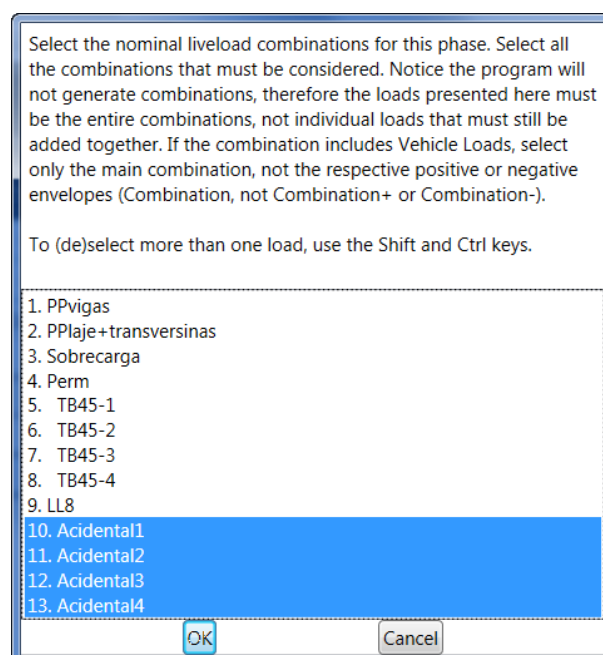


Figura 4.6: Carga accidental selecionada para as fases 2 a 4 do Viaduto de acesso à Santa Isabel

parcelas como o trem-tipo classe 45 (cargas concentradas e distribuídas) devem ser postos em combinações. Observa-se também que, caso o modelo já tenha sido calculado e as cargas accidentais apresentarem envoltórias do tipo “Acidental+” e “Acidental-”, estes não devem ser selecionados. Apenas o carregamento principal, sem “+” ou “-”, deve ser selecionado. Ao contrário das cargas permanentes, onde cargas já aplicadas não devem ser selecionadas novamente, aqui é necessário selecionar as cargas accidentais atuantes em todas as fases em que atuam. Isso permite a consideração de diferentes cargas accidentais ao longo da vida da estrutura devido a metodologia construtiva, por exemplo. Considerando que a carga accidental é aplicada aos 28 dias, logo após a protensão dos últimos cabos, deve-se então selecionar as cargas accidentais atuantes nas fases 2 a 4, conforme a Figura 4.6.

Agora só falta definir a ordem de protensão dos cabos, conforme apresentado na Figura 4.7. Na primeira fase, os cabos C2 e C3 são pretendidos nesta ordem. Na segunda fase são então os cabos C1 e C4-C5, nesta ordem.

Após todos estes passos, o **Prestress** está pronto para iniciar o cálculo assim que o usuário selecionar **Calculate**. A Figura 4.8 apresenta a aba de opções com todos os dados inseridos.

Quando o cálculo é iniciado, o **Prestress** começa com o cálculo das perdas. Os resultados obtidos pelo programa após cada perda serão agora comparados aos obtidos através de um cálculo manual independente considerando todas as perdas apresentadas na Seção 2.3. Os valores obtidos pelo programa

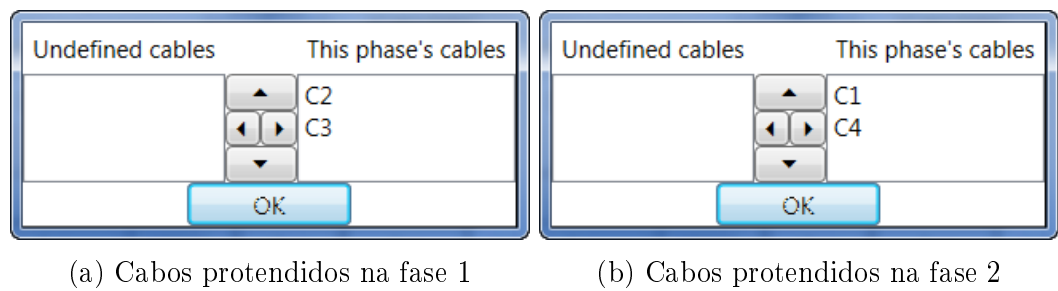


Figura 4.7: Cabos protendidos em cada fase do Viaduto de acesso à Santa Isabel

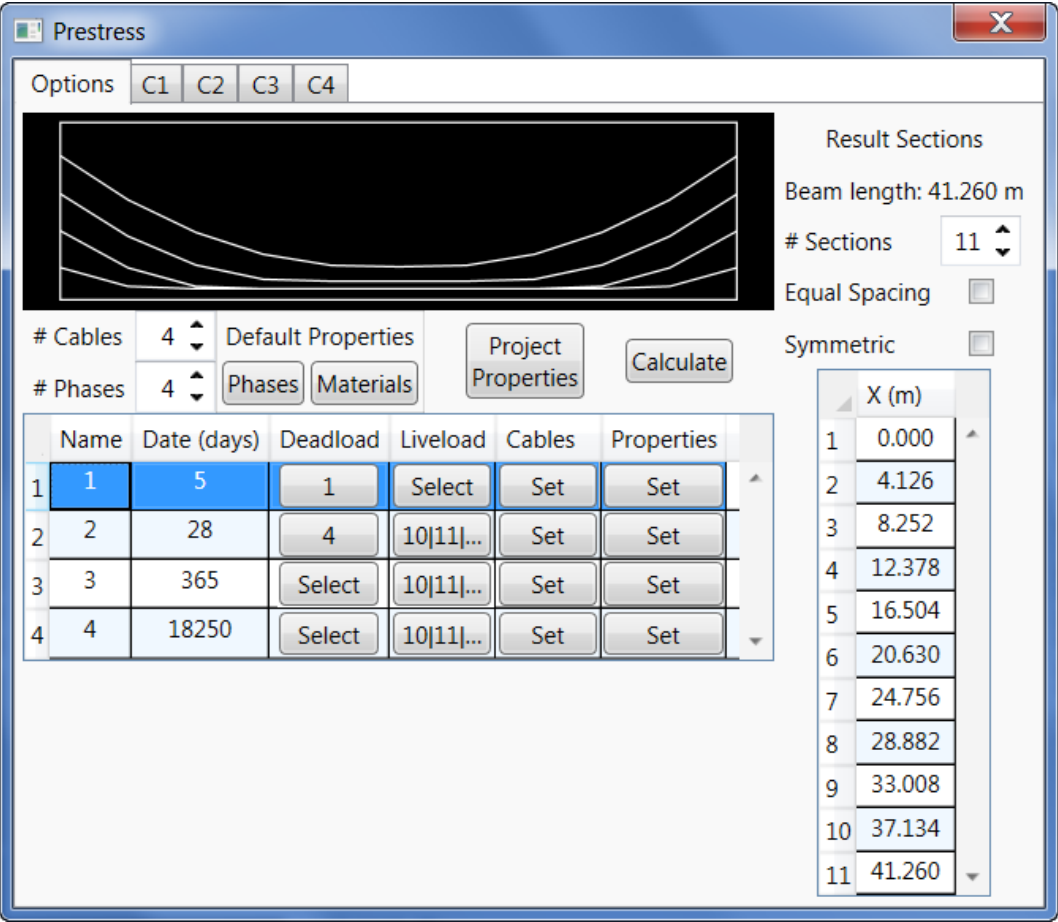


Figura 4.8: Aba de opções da viga do Viaduto de acesso a Santa Isabel após entrada de dados

Seção	C1	C2		C3	C4
		Prestress	Cálculo		
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	0.980	0.977	0.980	0.974	0.976
2	0.960	0.955	0.960	0.950	0.957
3	0.941	0.934	0.941	0.932	0.945
4	0.922	0.918	0.922	0.920	0.935
5	0.907	0.907	0.911	0.910	0.924
6	0.922	0.918	0.922	0.920	0.935
7	0.941	0.934	0.941	0.932	0.945
8	0.960	0.955	0.960	0.950	0.957
9	0.980	0.977	0.980	0.974	0.976
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabela 4.1: Perdas por atrito dos cabos do Viaduto de acesso à Santa Isabel

serão apresentados para todos os cabos, porém somente os do cabo C2 serão utilizados para a comparação de resultados. Vale mencionar que os valores apresentados aqui não podem ser obtidos pelo usuário, que recebe apenas os resultados finais.

A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para λ após as perdas por atrito. Os erros são da ordem de 0,5%, oriundos das aproximações de ângulo e traçado do cabo feitas pelo programa e o fato de o cálculo manual adotar que a parábola de $x \in [0; 16,504]$ m é perfeita, porém, ao se comparar o traçado de uma parábola perfeita com o apresentado no Apêndice B.1 observa-se que este não é exatamente parabólico. Ambos o cálculo a mão e pelo **Prestress** não consideram o fato do primeiro metro do traçado ser reto e não parabólico, conforme o item 18.6.1.5 da NBR 6118.¹

O programa então calcula as perdas por encunhamento das ancoragens. A Tabela 4.2 apresenta a fração da protensão inicial existente após estas perdas. O **Prestress** calculou que o ponto $X = 14,51$ m. Adotando a Equação (2-32) no cálculo independente, temos que $X = 14,03$ m. Como este valor é contido na parábola sem atingir a reta que implicaria em um $\alpha(x)$ não-linear, iremos adotar este valor. A diferença entre os valores obtidos para X é aceitável, uma vez que o método da Equação (2-32) considera um perfil de perdas por atrito linear e o **Prestress**, um perfil exponencial. O fato do X obtido pelo **Prestress** ser maior que o obtido a mão também é explicado por este fato, uma vez que a área entre $P(0)$ e $P(x)$ obtida por um perfil exponencial é menor que a de um perfil linear, logo o perfil exponencial tem que chegar a um X maior para obter a mesma área. A proximidade dos valores de X (erro de 3%), no entanto, demonstra que o valor obtido pelo **Prestress** é razoável. As perdas obtidas também são bem próximas, com um erro médio da ordem

Seção	C1	C2		C3	C4
		Prestress	Cálculo		
0	0.863	0.855	0.866	0.848	0.863
1	0.883	0.878	0.886	0.874	0.887
2	0.903	0.900	0.906	0.898	0.906
3	0.923	0.921	0.925	0.916	0.917
4	0.922	0.918	0.922	0.920	0.928
5	0.907	0.907	0.903	0.910	0.924
6	0.922	0.918	0.922	0.920	0.928
7	0.923	0.921	0.925	0.916	0.917
8	0.903	0.900	0.906	0.898	0.906
9	0.883	0.878	0.886	0.874	0.887
10	0.863	0.855	0.866	0.848	0.863

Tabela 4.2: Perdas por encunhamento das ancoragens dos cabos do Viaduto de acesso à Santa Isabel

de 0,8%.

Agora o programa inicia o cálculo das perdas progressivas, incluindo a deformação elástica do concreto. Estas perdas são calculadas por fases. A Tabela 4.3 apresenta as perdas por deformação elástica do concreto devido à protensão do cabo C3 na primeira fase. Neste caso apenas o cabo C2 é alterado, logo os resultados do cabo C3 são iguais aos obtidos na Tabela 4.2. A fim de resumir este item, as perdas do cabo C2 entre as fases 1 e 2 por cada parcela são apresentadas na Tabela 4.4. Para as demais fases são apresentadas somente os resultados finais, considerando todas as perdas, na Tabela 4.5. Os resultados para o cabo C2 nas seções extremas e no meio do vão são comparados a seguir a outros obtidos pelo método tradicional.

As perdas por deformação elástica são comparadas apenas para a primeira fase. Nesta fase os cabos C2 e C3 são protendidos nesta ordem. Isto significa que o cabo C2 sofre perdas devido à protensão do cabo C3, enquanto que este não sofre perdas devido à sua própria protensão. No momento da protensão destes cabos, no entanto, a viga descola da forma e ativa seu peso-próprio. Desta forma, ambos os cabos sofrem “perdas” nesta fase. No caso do cabo C3, no entanto, como este sofre apenas a ação do peso-próprio, o resultado é de fato um acréscimo de tensão e não uma perda.

Para o cálculo do efeito da protensão do cabo C3 no C2, o programa gera uma carga equivalente provisória e o **Robot** resolve o modelo para este carregamento. Com a soma dos esforços obtidos para este carregamento e o peso-próprio das vigas, é então apenas uma questão de calcular as perdas. Adotando as propriedades da seção definida no **Robot** (ver Figura 4.1) e os esforços obtidos no mesmo, tem-se

Seção	C2	C3
0	0.846	0.848
1	0.867	0.874
2	0.893	0.898
3	0.921	0.916
4	0.921	0.920
5	0.912	0.910
6	0.921	0.920
7	0.921	0.916
8	0.893	0.898
9	0.867	0.874
10	0.846	0.848

Tabela 4.3: Perdas por deformação elástica do concreto devido à primeira fase de protensão dos cabos do Viaduto de acesso à Santa Isabel

– Seção extrema

$$M_g = 0 \text{ kNm}$$

$$N_p = -1990,8 \text{ kN}$$

$$M_p = -450,6 \text{ kNm}$$

$$\text{Equação (2-35)} \Rightarrow \Delta\lambda = -0,009$$

$$\lambda = 0,857$$

– Meio do vão

$$M_g = 3922,8 \text{ kNm}$$

$$N_p = -2136,3 \text{ kN}$$

$$M_p = -1956,4 \text{ kNm}$$

$$\text{Equação (2-35)} \Rightarrow \Delta\lambda = 0,005$$

$$\lambda = 0,908$$

Comparando as perdas calculadas com as do **Prestress**, observa-se que estão bem de acordo, com o **Prestress** também apresentando uma perda de 0,9% na seção extrema e um aumento de tensão de 0,5% no meio do vão.

As perdas por deformação elástica são parte do porquê das lajes serem modeladas como “claddings” e a transversina de vão não ser considerada. Caso um modelo fosse feito com esses elementos presentes na rigidez da estrutura, os resultados neste caso ficariam gravemente comprometidos.

As vigas deste viaduto são pré-moldadas, o que significa que são protendidas antes de serem locadas na estrutura e antes da laje colaborar para a

rigidez do viaduto. Se o modelo fosse feito com a laje e a transversina, todos os esforços aplicados na estrutura seriam resistidos em parte pelas mesmas e pelas demais vigas, de tal forma que a viga não sofreria a totalidade dos esforços de protensão, como é de se esperar. Neste modelo, por exemplo, a força axial e o momento de protensão atuantes na viga seriam reduzidos em quase 50%.

A forma mais correta de modelar este viaduto seria criando etapas construtivas, com uma etapa inicial apresentando apenas a viga e outra com a totalidade da estrutura. O cálculo da deformação elástica visto aqui seria feito nesta primeira etapa, sem a interferência do restante do viaduto. Porém, conforme já observado na Seção 2.1, é impossível utilizar um modelo com etapas construtivas em conjunto com o **Prestress** (ou qualquer outro *add-in* do **Robot**).

De fato, até o modelo adotado sem a laje e a transversina não é exato. A força no meio do vão obtida pelo **Robot** de 2136,3kN não é igual ao resultado da conta manual $0,910 \cdot 140,6 \cdot 16,8 = 2149,5\text{kN}$. Este pequeno erro ocorre devido à rigidez das cortinas que resistem à flexão decorrente da compressão da longarina.

Repetindo o cálculo das perdas do cabo C2 por deformação elástica, agora para a protensão dos cabos C1 e C4-C5 e das cargas aplicadas na fase 2:

– **Seção extrema**

$$M_g = 0\text{kNm}$$

$$N_p = -6077,8\text{kN}$$

$$M_p = -1371,8\text{kNm}$$

$$\text{Equação (2-35)} \Rightarrow \Delta\lambda = -0,029$$

$$\lambda = 0,828$$

– **Meio do vão**

$$M_g = 7286,2\text{kNm}$$

$$N_p = -6469,4\text{kN}$$

$$M_p = -5387,8\text{kNm}$$

$$\text{Equação (2-35)} \Rightarrow \Delta\lambda = -0,018$$

$$\lambda = 0,890$$

Novamente, os valores de $\Delta\lambda$ obtidos pelo programa são idênticos aos obtidos pelo cálculo à mão.

Seção	Deformação elástica	Relaxação do aço	Retração do concreto	Fluência do concreto
0	0.817	0.804	0.801	0.776
1	0.833	0.818	0.815	0.787
2	0.861	0.844	0.841	0.808
3	0.895	0.876	0.873	0.840
4	0.900	0.881	0.878	0.849
5	0.894	0.875	0.872	0.845
6	0.900	0.881	0.878	0.849
7	0.895	0.876	0.873	0.840
8	0.861	0.844	0.841	0.808
9	0.833	0.818	0.815	0.787
10	0.817	0.804	0.801	0.776

Tabela 4.4: Perdas progressivas do cabo C2 entre a fase 1 e 2 ($t \in [5,28]$ dias) da vida do Viaduto de acesso à Santa Isabel. As perdas são calculadas de forma individual, da esquerda para a direita.

A seguir tem-se o cálculo a mão das perdas tradicionalmente consideradas progressivas (fluência e retração do concreto e relaxação do aço) pelo método descrito no item 9.6.3.4.2 da NBR 6118¹ e descrito pela Equação (2-63) até o final da vida útil da estrutura ($t \in [5,18250]$ dias). Os dados necessários são

$$\text{Equação (2-64)} \Rightarrow h = 20\text{cm}$$

$$\text{Tabela 8.1 da NBR 6118}^1 \Rightarrow \epsilon_{cs}(t, t_0) = -0,23\%$$

$$\text{Tabela 8.1 da NBR 6118}^1 \Rightarrow \phi(t, t_0) = 3,0$$

$$\text{Equação (2-66)} \Rightarrow \rho_p = 0,0112$$

então podemos calcular

– **Seção extrema**

$$\sigma_{c,p0g} = 13102,4\text{kN}/\text{m}^2$$

$$\sigma_{p0} = 1202130,0\text{kN}/\text{m}^2$$

$$\text{Equação (2-65)} \Rightarrow \chi = 0,0171$$

$$\text{Equação (2-67)} \Rightarrow \eta = 1,015$$

$$\therefore \Delta\lambda = -0,171$$

$$\lambda = 0,657$$

– **Meio do vão**

$$\sigma_{c,p0g} = 11898,7\text{kN}/\text{m}^2$$

Seção	$t \in [28,365)$	$t \in [365,18250)$
0	0.702	0.660
1	0.701	0.655
2	0.721	0.671
3	0.757	0.706
4	0.774	0.724
5	0.776	0.728
6	0.774	0.724
7	0.757	0.706
8	0.721	0.671
9	0.701	0.655
10	0.702	0.660

Tabela 4.5: Perdas progressivas do cabo C2 entre as demais fases da vida do Viaduto de acesso à Santa Isabel

$$\sigma_{p0} = 1275242,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Equação (2-65)} \Rightarrow \chi = 0,0216$$

$$\text{Equação (2-67)} \Rightarrow \eta = 2,391$$

$$\therefore \Delta\lambda = -0,142$$

$$\lambda = 0,740$$

Comparando estes valores aos do **Prestress**, observamos erros de 0,5% e 1,6%. Dado o fato já mencionado na Seção 2.3 de que o erro esperado no cálculo de perdas progressivas é da ordem de $\pm 30\%$, estes valores são satisfatórios.

Após o cálculo o programa gera um arquivo de resultados. Este arquivo tem o mesmo nome (com extensão .xlsx) e é salvo na mesma pasta do modelo. Os resultados são apresentados em cinco folhas, vistas na Figura 4.9. A primeira contém alguns dos coeficientes adotados no cálculo e o alongamento teórico de cada cabo. O alongamento é obtido considerando apenas as perdas por atrito. As demais folhas apresentam os resultados obtidos para cada fase. Embora o bordo inferior do vão central no final da vida-útil não satisfaça estritamente o ELS-D, com uma tração de 0,1MPa sob a ação da carga acidental quase-permanente, este valor é considerado evidentemente aceitável. Desta forma, a viga satisfaz o estado limite de serviço ao longo da sua vida.

Uma peculiaridade dos resultados a observar é que o momento nas seções extremas nunca é nulo, como seria de se esperar em uma viga bi-apoiada. Isto ocorre devido a um comportamento inesperado do **Robot**, que nas extremidades reduz os esforços a valores irrisórios. A Figura 4.10 apresenta um exemplo disto. O **Prestress** é então obrigado a obter para as extremidades os esforços nos pontos a $0,01\%L$ de distância, onde L é o vão da viga.

Outro resultado do **Prestress** é visto no **Robot**. Os esforços finais de cada fase da vida da estrutura permanecem no modelo, cada um denominado “Phase[X]-Prestress”, onde [X] é o número da fase. O usuário pode adotar estes carregamentos se desejar utilizar os **Robot** para quaisquer outros dimensionamentos da viga (ao cisalhamento, por exemplo).

Há uma observação a ser feita em relação ao cálculo deste viaduto. Conforme já mencionado, o fato do **Prestress** ser impedido de calcular estruturas com fases construtivas leva a erros. O modelo no **Robot** foi criado com cuidado para minimizar estes erros. Há, no entanto, um erro que não foi mencionado acima. Após a protensão dos cabos e subsequente içamento das vigas pré-moldadas, a laje é concretada *in-loco*. Quando esta atingir sua resistência final, ela trabalhará em conjunto com a viga. Os esforços que serão resistidos pela viga incluindo a laje colaborante não serão apenas acidentais, mas também os oriundos das perdas de protensão, que podem ser consideradas como gerando esforços opostos aos da protensão.

Isto significa que o modelo correto para este viaduto não deveria apenas ter uma fase construtiva apenas com as vigas pré-moldadas e outro com o viaduto completo. A seção transversal da viga também deveria mudar entre as fases, com a etapa inicial apresentando apenas a seção da viga isolada e a final a seção considerando a laje colaborante, conforme o item 14.6.2.2 da NBR 6118.¹ Como tais modelos não podem utilizar o **Prestress**, o usuário terá que decidir qual seção utilizar no cálculo: se adotar a seção isolada como acima, todas as perdas progressivas e subseqüentes tensões estarão erradas; se utilizar a seção composta, o erro estará nos carregamentos equivalentes de protensão, nas perdas por deformação elástica e nas tensões iniciais.

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$s = 0.2$$

$$\psi_1 = 0.5$$

$$\psi_2 = 0.3$$

Alongamentos (cm)

Cabo 1 28.1867

Cabo 2 28.1472

Cabo 3 28.3016

Cabo 4 28.4097

(a) Dados do projeto e alongamentos teóricos dos cabos

Figura 4.9: Resultados do **Prestress** para o Viaduto de acesso a Santa Isabel

Seção		Momentos (kNm)		Δ Protensão		σ Solicitante (MN/m²)			Δσ Prot (MN/m²)	σ Total (MN/m²)					Verificar
		Δ Perm	Acidental		M (kNm)	N (kN)	Δ Perm	Acidental		Perm + Prot	Perm + Prot + Acidental				
			+	-				Max			Min	ELS-D	ELS-F	ELS-CE	
1	Sup	1.6	0.0	0.0	-25.7	3976.8	0.00	0.00	0.00	-5.23	-4.97	-4.97	-6.04	-	
	Inf						0.00	0.00	0.00	-5.36	-5.36	-5.09	-5.09	-6.19	-
2	Sup	1412.2	0.0	0.0	-1985.3	4111.3	-3.65	0.00	0.00	-0.34	-3.99	-3.97	-4.04	-	
	Inf						3.73	0.00	0.00	-10.72	-6.99	-6.45	-6.45	-8.65	-
3	Sup	2510.6	0.0	0.0	-3258.3	4260.2	-6.49	0.00	0.00	2.76	-3.74	-3.60	-3.60	-	
	Inf						6.64	0.00	0.00	-14.28	-7.65	-6.93	-6.93	-9.86	-
4	Sup	3295.1	0.0	0.0	-3785.5	4385.6	-8.52	0.00	0.00	3.95	-4.57	-4.37	-4.37	-	
	Inf						8.71	0.00	0.00	-15.84	-7.13	-6.34	-6.34	-9.59	-
5	Sup	3765.9	0.0	0.0	-3851.9	4405.6	-9.74	0.00	0.00	4.10	-5.64	-5.44	-5.44	-	
	Inf						9.96	0.00	0.00	-16.05	-6.09	-5.29	-5.29	-8.58	-
6	Sup	3922.8	0.0	0.0	-3812.6	4361.3	-10.14	0.00	0.00	4.06	-6.09	-5.89	-5.89	-	
	Inf						10.37	0.00	0.00	-15.88	-5.51	-4.72	-4.72	-7.97	-
7	Sup	3765.9	0.0	0.0	-3851.9	4405.6	-9.74	0.00	0.00	4.10	-5.64	-5.44	-5.44	-	
	Inf						9.96	0.00	0.00	-16.05	-6.09	-5.29	-5.29	-8.58	-
8	Sup	3295.1	0.0	0.0	-3785.4	4385.6	-8.52	0.00	0.00	3.95	-4.57	-4.37	-4.37	-	
	Inf						8.71	0.00	0.00	-15.84	-7.13	-6.34	-6.34	-9.59	-
9	Sup	2510.6	0.0	0.0	-3258.3	4260.2	-6.49	0.00	0.00	2.76	-3.74	-3.60	-3.60	-	
	Inf						6.64	0.00	0.00	-14.28	-7.65	-6.93	-6.93	-9.86	-
10	Sup	1412.2	0.0	0.0	-1985.3	4111.3	-3.65	0.00	0.00	-0.34	-3.99	-3.97	-3.97	-	
	Inf						3.73	0.00	0.00	-10.72	-6.99	-6.45	-6.45	-8.65	-
11	Sup	1.6	0.0	0.0	-25.7	3976.8	0.00	0.00	0.00	-5.23	-5.23	-4.97	-4.97	-	
	Inf						0.00	0.00	0.00	-5.36	-5.36	-5.09	-5.09	-6.19	-

(b) Resultados da primeira fase

Figura 4.9: Resultados do **Prestress** para o Viaduto de acesso a Santa Isabel (cont.)

Seção		Momentos (kNm)		Δ Protensão		σ Solicitante (MN/m²)			Δσ Prot (MN/m²)	σ Total (MN/m²)				Verificar	
		Δ Perm	Acidental		M (kNm)	N (kN)	Δ Perm	Acidental		Perm + Prot	Perm + Prot + Acidental				
			+	-				Max			Min	ELS-D	ELS-F		ELS-CE
1	Sup	-5.3	91.6	0.0	-1343.0	5747.6	0.01	0.00	-0.24	-4.18	-9.39	-8.92	-8.92	-11.09	-
	Inf						-0.01	0.24	0.00	-11.20	-16.57	-15.67	-15.62	-19.14	-
2	Sup	2158.7	1307.0	0.0	-3299.0	5903.6	-5.58	0.00	-3.38	0.67	-8.90	-8.88	-8.88	-12.29	-
	Inf						5.71	3.46	0.00	-16.58	-17.86	-15.46	-14.76	-22.09	-
3	Sup	3860.6	2448.0	0.0	-4258.5	6081.5	-9.98	0.00	-6.33	2.92	-10.80	-10.52	-10.52	-17.41	-
	Inf						10.21	6.47	0.00	-19.35	-16.79	-13.17	-11.87	-22.00	-
4	Sup	5091.8	3357.8	0.0	-4903.6	6261.3	-13.17	0.00	-8.68	4.35	-13.39	-12.97	-12.97	-22.48	-
	Inf						13.46	8.88	0.00	-21.30	-14.97	-10.45	-8.67	-20.72	-
5	Sup	5845.6	3893.7	0.0	-5290.4	6387.7	-15.12	0.00	-10.07	5.18	-15.58	-15.11	-15.11	-26.11	-
	Inf						15.46	10.30	0.00	-22.49	-13.12	-8.11	-6.05	-19.09	-
6	Sup	6115.7	3995.2	0.0	-5320.7	6373.7	-15.81	0.00	-10.33	5.28	-16.63	-16.16	-16.16	-27.42	-
	Inf						16.17	10.56	0.00	-22.55	-11.89	-6.80	-4.69	-17.85	-
7	Sup	5845.6	3890.5	0.0	-5290.4	6387.7	-15.12	0.00	-10.06	5.18	-15.58	-15.11	-15.11	-26.10	-
	Inf						15.46	10.29	0.00	-22.49	-13.12	-8.11	-6.05	-19.09	-
8	Sup	5091.8	3361.7	0.0	-4903.6	6261.3	-13.17	0.00	-8.69	4.35	-13.39	-12.97	-12.97	-22.49	-
	Inf						13.46	8.89	0.00	-21.30	-14.97	-10.44	-8.66	-20.72	-
9	Sup	3860.6	2446.5	0.0	-4258.5	6081.5	-9.98	0.00	-6.33	2.92	-10.80	-10.52	-10.52	-17.41	-
	Inf						10.21	6.47	0.00	-19.35	-16.79	-13.17	-11.87	-22.00	-
10	Sup	2158.7	1307.1	0.0	-3298.9	5903.5	-5.58	0.00	-3.38	0.67	-8.90	-8.88	-8.88	-12.29	-
	Inf						5.71	3.46	0.00	-16.58	-17.86	-15.45	-14.76	-22.09	-
11	Sup	-5.3	91.5	0.0	-1343.0	5747.6	0.01	0.00	-0.24	-4.18	-9.39	-8.92	-8.92	-11.09	-
	Inf						-0.01	0.24	0.00	-11.20	-16.57	-15.67	-15.62	-19.14	-

(c) Resultados da segunda fase

Figura 4.9: Resultados do **Prestress** para o Viaduto de acesso a Santa Isabel (cont.)

Seção		Momentos (kNm)		Δ Protensão		σ Solicitante (MN/m²)			Δσ Prot (MN/m²)	σ Total (MN/m²)				Verificar		
		Δ Perm	Acidental		M (kNm)	N (kN)	Δ Perm	Acidental		Perm + Prot	Perm + Prot + Acidental					
			+	-				Max			Min	ELS-D	ELS-F		ELS-CE	
1	Sup	0.0	91.6	0.0		201.9	-1033.2	0.00	0.00	-0.24	0.85	-8.54	-8.11	-8.11	-10.10	-
	Inf							0.00	0.24	0.00	1.91	-14.66	-13.85	-13.81	-16.93	-
2	Sup							0.00	0.00	-3.38	-0.14	-9.04	-9.03	-9.03	-12.43	-
	Inf	0.0	1307.0	0.0		664.8	-1183.9	0.00	3.46	0.00	3.33	-14.52	-12.29	-11.60	-18.24	-
3	Sup							0.00	0.00	-6.33	-0.70	-11.50	-11.25	-11.25	-18.08	-
	Inf	0.0	2448.0	0.0		902.2	-1227.8	0.00	6.47	0.00	4.02	-12.77	-9.35	-8.05	-17.36	-
4	Sup							0.00	0.00	-8.68	-0.93	-14.32	-13.95	-13.95	-23.37	-
	Inf	0.0	3357.8	0.0		977.2	-1199.2	0.00	8.88	0.00	4.18	-10.79	-6.48	-4.70	-15.90	-
5	Sup							0.00	0.00	-10.07	-0.97	-16.55	-16.13	-16.13	-27.03	-
	Inf	0.0	3893.7	0.0		962.8	-1140.3	0.00	10.30	0.00	4.06	-9.06	-4.25	-2.19	-14.40	-
6	Sup							0.00	0.00	-10.33	-0.93	-17.55	-17.13	-17.13	-28.30	-
	Inf	0.0	3995.2	0.0		914.1	-1078.8	0.00	10.56	0.00	3.85	-8.04	-3.14	-1.03	-13.40	-
7	Sup							0.00	0.00	-10.06	-0.97	-16.55	-16.13	-16.13	-27.02	-
	Inf	0.0	3890.5	0.0		962.9	-1140.3	0.00	10.29	0.00	4.06	-9.06	-4.25	-2.19	-14.40	-
8	Sup							0.00	0.00	-8.69	-0.93	-14.32	-13.95	-13.95	-23.38	-
	Inf	0.0	3361.7	0.0		977.3	-1199.2	0.00	8.89	0.00	4.18	-10.79	-6.47	-4.69	-15.90	-
9	Sup							0.00	0.00	-6.33	-0.70	-11.50	-11.25	-11.25	-18.07	-
	Inf	0.0	2446.5	0.0		902.3	-1228.0	0.00	6.47	0.00	4.02	-12.77	-9.35	-8.06	-17.36	-
10	Sup							0.00	0.00	-3.38	-0.14	-9.04	-9.03	-9.03	-12.43	-
	Inf	0.0	1307.1	0.0		665.0	-1184.2	0.00	3.46	0.00	3.33	-14.52	-12.29	-11.60	-18.24	-
11	Sup							0.00	0.00	-0.24	0.85	-8.54	-8.11	-8.11	-10.10	-
	Inf	0.0	91.5	0.0		201.9	-1033.2	0.00	0.24	0.00	1.91	-14.66	-13.85	-13.81	-16.93	-

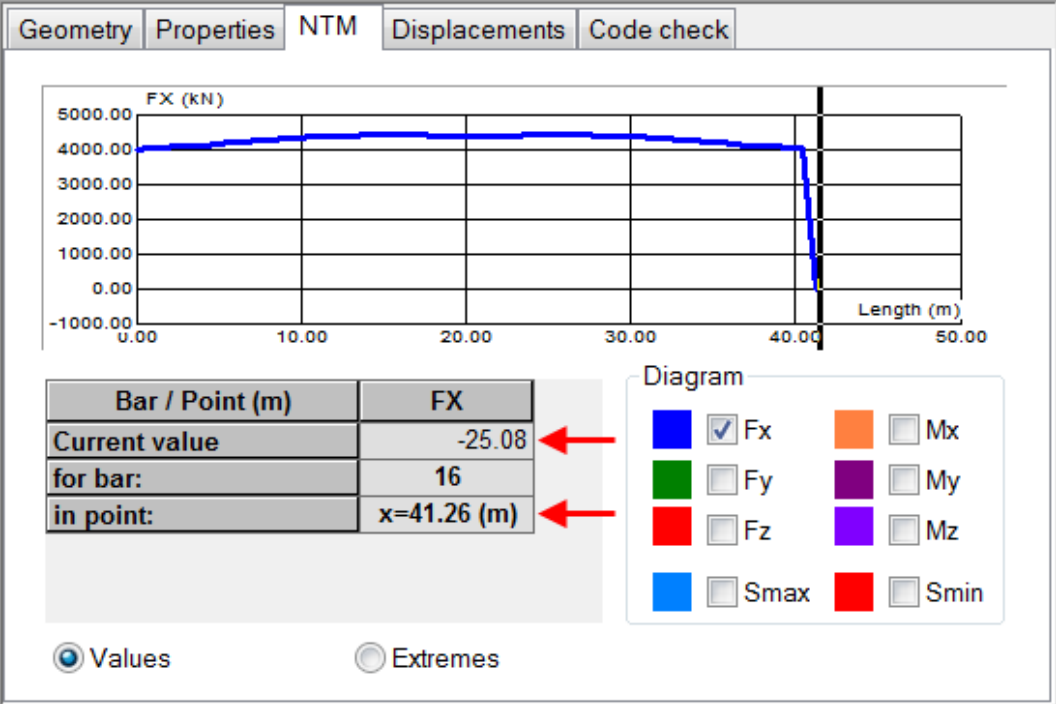
(d) Resultados da terça fase

Figura 4.9: Resultados do **Prestress** para o Viaduto de acesso a Santa Isabel (cont.)

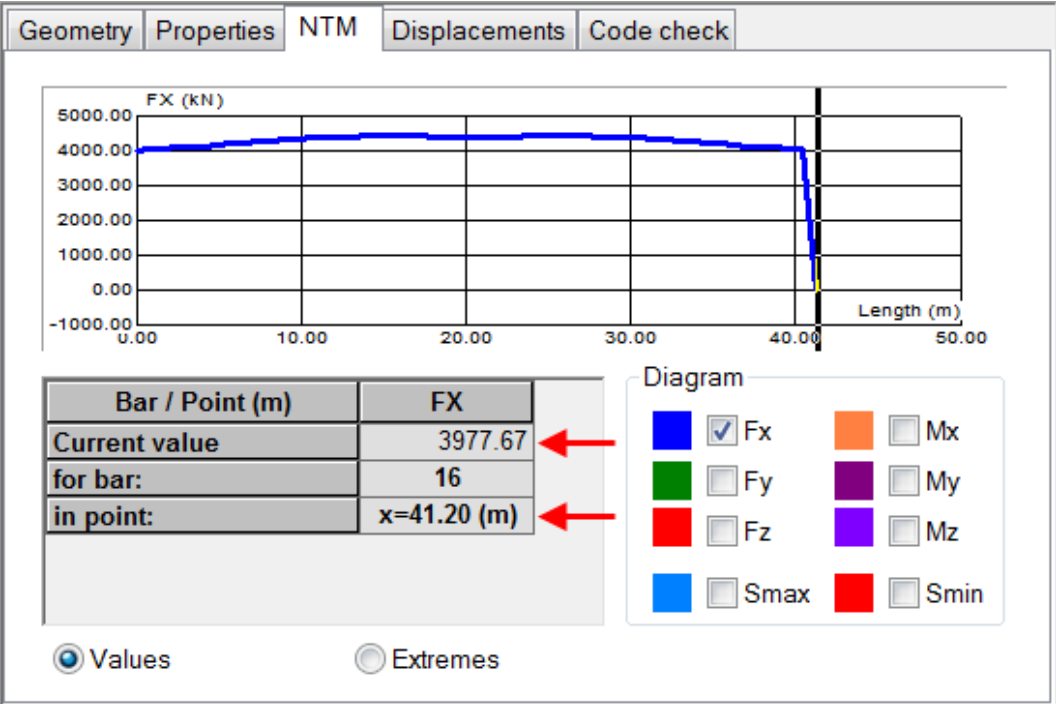
Seção		Momentos (kNm)		Δ Protensão		σ Solicitante (MN/m²)			Δσ Prot (MN/m²)	σ Total (MN/m²)				Verificar
		Δ Perm	Acidental		M (kNm)	N (kN)	Δ Perm	Acidental		Perm + Prot	Perm + Prot + Acidental			
			+	-				Max			Min	ELS-D	ELS-F	
1	Sup	0.0	91.6	0.0	-615.5	0.00	0.00	-0.24	0.57	-7.97	-7.57	-7.57	-9.44	-
	Inf					0.00	0.24	0.00	1.07	-13.59	-12.83	-12.79	-15.69	-
2	Sup					0.00	0.00	-3.38	-0.07	-9.11	-9.11	-9.11	-12.50	-
	Inf	0.0	1307.0	0.0	-704.2	0.00	3.46	0.00	1.97	-12.55	-10.42	-9.73	-15.96	-
3	Sup	0.0	2448.0	0.0	-786.7	0.00	0.00	-6.33	-0.46	-11.96	-11.73	-11.73	-18.51	-
	Inf					0.00	6.47	0.00	2.59	-10.18	-6.89	-5.60	-14.37	-
4	Sup	0.0	3357.8	0.0	-835.2	0.00	0.00	-8.68	-0.66	-14.98	-14.64	-14.64	-24.00	-
	Inf					0.00	8.88	0.00	2.93	-7.86	-3.70	-1.92	-12.52	-
5	Sup	0.0	3893.7	0.0	-842.1	0.00	0.00	-10.07	-0.73	-17.28	-16.90	-16.90	-27.72	-
	Inf					0.00	10.30	0.00	3.01	-6.05	-1.38	0.67	-10.92	-
6	Sup	0.0	3995.2	0.0	-823.6	0.00	0.00	-10.33	-0.72	-18.27	-17.89	-17.89	-28.99	-
	Inf					0.00	10.56	0.00	2.95	-5.09	-0.33	1.78	-9.99	-
7	Sup	0.0	3890.5	0.0	-842.1	0.00	0.00	-10.06	-0.73	-17.28	-16.90	-16.90	-27.72	-
	Inf					0.00	10.29	0.00	3.01	-6.05	-1.39	0.67	-10.92	-
8	Sup	0.0	3361.7	0.0	-835.3	0.00	0.00	-8.69	-0.66	-14.98	-14.64	-14.64	-24.01	-
	Inf					0.00	8.89	0.00	2.93	-7.86	-3.69	-1.91	-12.52	-
9	Sup	0.0	2446.5	0.0	-786.7	0.00	0.00	-6.33	-0.46	-11.96	-11.73	-11.73	-18.51	-
	Inf					0.00	6.47	0.00	2.59	-10.18	-6.89	-5.60	-14.37	-
10	Sup	0.0	1307.1	0.0	-704.3	0.00	0.00	-3.38	-0.07	-9.11	-9.11	-9.11	-12.50	-
	Inf					0.00	3.46	0.00	1.97	-12.55	-10.41	-9.72	-15.96	-
11	Sup	0.0	91.5	0.0	-615.5	0.00	0.00	-0.24	0.57	-7.97	-7.57	-7.57	-9.44	-
	Inf					0.00	0.24	0.00	1.07	-13.59	-12.83	-12.79	-15.69	-

(e) Resultados da quarta fase

Figura 4.9: Resultados do **Prestress** para o Viaduto de acesso a Santa Isabel (cont.)



(a) Esforço axial no ponto $x = 41.26\text{m}$



(b) Esforço axial no ponto $x = 41.20\text{m}$

Figura 4.10: Esforços axiais do Viaduto de acesso a Santa Isabel. Observa-se que o esforço no fim da barra é diferente do obtido para uma seção a apenas 6cm de distância